

Knjiga v prvem delu deluje kot hladen tuš, ko z realnimi podatki in izračuni (in ne s pridevniki, kot opozarja avtor) pokaže, da je prehod na izključno trajnostne vire energije možen le z radikalnimi posegi in ne zgolj z manjšimi lepotnimi in navidezno všečnimi potezami. Ta osvežitev je potrebna, da lahko razmišljamo o realnih rešitvah, pri katerih od predlaganih usmeritev za posameznika in skupnih vizij še posebno izstopa možnost rabe sončne energije iz puščavskih predelov, ki opogumlja in daje upanje za celoten planet ...

prof. dr. Marko Marhl,

Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko

Knjiga Davida MacKaya je edinstvena tako zaradi posebnega obravnavanja sedanjih in prihodnjih razpoložljivih virov energije kot tudi njene rabe. Avtorju je uspelo vnesti tudi dobro mero kritičnosti do poplave raznovrstnih in pogostokrat nasprotujočih si mnenj glede energetike. Ta se ne krešejo samo med pravimi strokovnjaki, ampak, kot avtor pravilno ugotavlja, še posebej v laični javnosti, med novinarji, politiki in predstavniki različnih interesnih skupin. Tudi v Sloveniji smo priče tovrstnim aktivnostim. Še posebej za zadnje omenjene skupine predstavlja knjiga Davida MacKaya izjemno dober priročnik in neke vrste poduk. Nekateri izsledki avtorja morda nimajo ustrezne strokovne podlage, prav tako pa v knjigi obravnava energijo in moč nekoliko posebno. Kljub temu dá knjiga zelo veliko misliti o naši energetski prihodnosti in o njenem pravilnem načrtovanju, hkrati pa tudi opozarja, da je čas za pogosto sprenevedanje mimo ter da so potrebni resni, strokovni, hitri, a vendar premišljeni in konec koncev do človeštva pošteni ukrepi. Ukrepi brez lobijev in njihove nenasitne pristranskosti.

izr. prof. dr. Andrej Kitanovski,

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

MacKay bralcu na zanimiv način pokaže, kako zelo močno je današnji način življenja odvisen od energije, pridobljene iz fosilnih goriv. Ta odvisnost postane očitna, ko energetske potrebe Velike Britanije primerja z njenimi brezogljničnimi viri. Ob tem nam približa tudi dejstvo, da zanesljiva in neprekinjena oskrba s trajnostno energijo še zdaleč ni lahka ter samoumevna. V tem pogledu tudi v Sloveniji čisto nič ne izstopamo, saj smo tudi mi kar močno odvisni tako od uvoženih kot domačih virov fosilnih goriv. Poleg tega smo si z Britanci dovolj blizu tudi v sodobnem načinu življenja z vsemi njegovimi načini in možnostmi porabe energije. Poseben čar pa daje knjigi prikaz prepletenosti in soodvisnosti porabe in proizvodnje, ki je tako značilna za uravnoteženo oskrbo z energijo in hkrati nujno potrebna za stabilen sistem. Prav uravnotežena oskrba z energijo pa je tista potreba vsake države, ki velja tako za Slovenijo kot Veliko Britanijo. In zaradi te univerzalne potrebe po uravnoteženem energetskem sistemu je knjiga zelo uporabna in zlahka prenosljiva tudi na slovenske razmere, ne glede na to, da avtor uporablja britanske podatke.

doc. dr. Tomaž Žagar,

Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko, direktor ARAO

Reševanje vprašanja zagotavljanja dolgoročne vzdržnosti energetskega sektorja je ena od ključnih razvojnih tem sedanjosti, ki bo krojila našo prihodnost. David MacKay je v svoji knjigi z otipljivimi številkami in na otroško preprost način uspel zaobjeti tematiko, ki se dotika vsakogar. Knjiga je učbenik za energetske opismenjevanje, razbija zakoreninjene energetske mite, nudi pogled v prihodnost in tako podaja izhodišča za strateški premislek.

Zdaj ni več izgovora, zakaj se dva milijona slovenskih energetikov ne bi aktivno vključilo v snovanje novega energetskega koncepta.

Danijel Levičar,

*v. d. generalnega direktorja Direktorata za energijo,
Ministrstvo za infrastrukturo in prostor RS*

Prihodnost oskrbe z energijo je eden ključnih in globalnih izzivov človeštva, zato ima trajnostno naravnano izobraževanje tudi na tem področju izjemno pomembno vlogo. Knjiga, ki je pred vami, je lahko kamenček v mozaiku znanja in vedenja s tega področja, predvsem pa predstavlja enega od gradnikov vzgoje in izobraževanja postmodernega državljanstva. Predvsem mlade je treba spodbuditi, da se soočijo z energijskimi izzivi prihodnosti. K temu lahko pripomore tudi strokovna literatura, ki je napisana tako, da je vsakomur razumljiva in da spodbudi zanimanje vseh generacij za vprašanja, ki že zdaj in bodo tudi v prihodnje vse bolj zadevala vse generacije.

dr. Jernej Pikalo,

minister, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport RS

Knjiga Davida MacKaya pritegne z izvirnostjo, ki enostavno razloži enega najkompleksnejših vprašanj sodobne družbe: kako s trajnostno energetiko omogočiti blaginjo prebivalstvu in omejiti človekov vpliv na naravo. Zelo me veseli, da je knjiga izzvala tudi slovensko stroko, ki je za domače bralce pripravila ustrezne podatke za Slovenijo.

dr. Romana Jordan,

poslanka, Evropski parlament

To je prijetno presenetljiva knjiga, ki na preprost način pojasnjuje osnovne zamisli energetske učinkovitosti in obnovljivih virov energije. V bralcu želi vzbuditi zanimanje in tudi občutek za stvarno oceno in primerjavo različnih energetskih konceptov med seboj. Kljub kopici podatkov, ki jih urejeno podaja skozi primere, je prav zaradi preprostega in neposrednega sloga zanimivo branje. Toplo jo priporočam vsem, ki jih zanima področje obnovljive energije ter njen pomen in vpliv na sodobno družbo.

izr. prof. dr. Andrej Gubina,

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

Štoparski vodnik po energiji!

prof. dr. Dean Korošak,

*direktor, zavod RAZ:UM, Univerza v Mariboru
(nosilec projekta krepitev energetske pismenosti EN-LITE)*

Knjiga brez olepšav opisuje velik razkorak v našem vsakodnevnem življenju, med energijo, ki jo dejansko porabimo, in med energijskim potencialom, ki ga imajo dandanes obnovljivi viri energije. Spodbuja nas k velikim korakom in spremembam našega življenjskega sloga v smeri bolj vzdržnega razvoja. Knjiga je hkrati tudi odličen učbenik za srednje šole, še zlasti pa za univerzitetno stopnjo. Napisana je tako jasno, da jo brez težav lahko razumejo tudi družboslovci!

prof. dr. Lučka Kajfež Bogataj,
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta

Strategije razvoja elektroenergetskega sistema ne moremo graditi na pridevnikih in čustvih, kot je v knjigi do običajnih kvazienergetskih razprav slikovito kritičen tudi David MacKay. Potrebujemo številke, znanje in odgovorne odločitve, ki lovijo razumno ravnotežje med zanesljivostjo sistema, ekonomsko učinkovitostjo ter družbeno in okoljsko vzdržnostjo. Tej viziji je podrejeno vodenje Eles; zato iskreno podpiramo projekt krepitev energetske pismenosti EN-LITE in izid slovenskega prevoda te pomembne in prepričljive knjige, ki skuša energetiko rešiti ideološko-interesnih in aktivističnih spon ter jo ponovno vrniti stroki in realizmu.

Aleksander Mervar,
direktor, ELES, d. o. o.

Obvezno branje za vso Slovenijo, ki nujno potrebuje trezen razmislek in ozaveščeno razpravo o tem, kje smo in kam lahko na področju energetike odgovorno gremo. Želim si, da bi nas pri tem namesto čustev vodili predvsem realistične kalkulacije in jasno zavedanje o tem, kateri pristopi so preizkušeno zanesljivi, nizkoogljični in hkrati ekonomsko vzdržni.

Martin Novšak,
direktor, GEN energija d. o. o.

Knjiga sistematično podaja znanja o ravnanju z energijo. Ta so v pomoč pri ravnanju z njo, predvsem trajnostnemu in tudi tistemu z manj ogljika. Vse to je šele osnova za umno izkoriščanje virov energije. Kar pozabljamo in česar ne poudarjamo, je globalni boj za energetske vire in temne posledice tega.

dr. Franc Žlahtič,
*predsednik, Slovenski nacionalni komite
Svetovnega energetskega sveta*

V knjigi je mesto naših avtorjev več kot primerno. Primere britanskega načina uvajanja OVE in nizkoogljične družbe je vredno prebrati, a s primernim razmislekom o tem, kaj in zakaj je primerno za naše razmere. Imamo drugačno strukturo industrije in energetike, nadpovprečen delež obstoječih OVE v EU, hude posledice nenadzorovanega tranzita itd. Slovenija potrebuje celostno energetske politiko, s posebnim poudarkom na gospodarni in premišljeni implementaciji OVE in URE, omrežij, druge infrastrukture. Posnemanje dobrih praks je priporočljivo, vendar ne za vsako ceno, zaradi katere smo potem pod črto na domačem in tujem trgu manj konkurenčni.

Alenka Avberšek,
izvršna direktorica, Gospodarska zbornica Slovenije

David MacKay v svoji knjigi zelo prepričljivo in poljudno pojasni nekatera dejstva o energetiki, ki se jih mnogi ne zavedajo. Poleg tega, da je knjiga primerna za splošno javnost, bi jo moral natančno prebrati prav vsak, ki se strokovno ukvarja s katerikoli področjem energetike.

dr. Igor Jenčič,
*vodja, Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo,
Institut »Jožef Stefan«*

Knjižnih del o aktualnih vprašanjih človekovega bivanja je že kar nekaj na knjižnih policah, upam pa si trditi, da nobeno na tako hudo domusen, a hkrati nazoren način ne nastavlja okoljsko-energetskega ogledala sodobnemu človeku kot MacKayevo. Na Energetiki.NET smo tako z veseljem pristopili k projektu EN-LITE in prevzeli svoj del odgovornosti – to je prevod in izdaja pričujoče knjige v slovenskem jeziku. Pri tem smo skušali kar se da ohraniti avtorjev slog, kar pa zaradi razlik v metaforiki angleškega in slovenskega jezika ni bilo vedno najlažje. Ohranili smo tudi vse avtorjeve izračune (če kateri ne drži, avtor sam v spletni izdaji knjige poziva bralce k popravkom) in spletne povezave, ki se – kot vemo – lahko skozi leta tudi spremenijo ali izginejo. Kljub temu je knjiga vredna vašega branja!

Alenka Žumbar Klopčič,
direktorica in urednica, Energetika.NET

Branje o realnih alternativah naše energetske prihodnosti, ki strezni. Prepričljivo svarilo pred naivnimi miti in legendami o odrešilnih potencialih nekaterih virov energije.

Opustimo puhlice in čustva ter se prepustimo čaru fizikalnih osnov in na številkah temelječih kalkulacij, kot jih podaja prof. MacKay. Da bi to (vsaj odslej) zmogli tudi v slovenski energetiki ...

Mojca Drevenšek,
*Consensus, d. o. o.
(partner projekta krepitev energetske pismenosti EN-LITE)*

Težko bi rekel, da je knjiga vznemirljivo branje, ponuja pa vznemirljivo znanje. Kdor se odloči prebrati samo eno knjigo o energetiki, naj prebere to.

Staš Zgonik,
novinar, Mladina

Slovenija porabi 54 odstotkov več energije na enoto BDP, kot je evropsko povprečje; zaradi energetske potratnosti vsako leto uničimo 600 milijonov evrov. Računalniška pismenost je že del splošne izobrazbe za preživetje posameznika, energetska pismenost pa vse bolj postaja pogoj za preživetje človeštva. Kot je pred desetletji informacijska revolucija premagala najbolj zadržte zagovornike "slovenskih posebnosti", tako nam bo hitrejše priznanje energetske revolucije omogočilo obstanek in blaginjo. Ta knjiga je pomembno pomagalo vsem razsodnim pri odločanju!

Gorazd Marinček,
predsednik, Slovenski E-Forum

Trajnostna energija – brez razgretega ozračja

Trajnostna energija – brez razgretega ozračja

David J. C. MacKay



Energetika.NET



En.založba

Knjiga je izšla v okviru mednarodnega projekta krepite energetske pismenosti EN-LITE.



Partnerji projekta:



Strokovna in finančna podpora:



British Embassy
Ljubljana

Projekt podpira Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, Direktorat za energijo.



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA INFRASTRUKTURO IN PROSTOR

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana
620.9(082)
502.171:531.62
MACKAY, David J. C.
Trajnostna energija - brez razgretega ozračja / David J. C. Mackay;
[prevajalki Maja Ropret in Andreja Krašna]. - Ljubljana: Energetika.NET, 2013
ISBN 978-961-93583-0-6
269604096

Vsem, ki se ne bodo mogli zanašati
na dve milijardi let nakopičenih zalog energije

Predgovor k slovenskemu prevodu knjige

Trajnostna energija – brez razgretega ozračja

To je knjiga o energijskem računanju. Za primer sem vzel Veliko Britanijo, vendar lahko vsebino prenesemo na katero koli državo.

Slovenija je Veliki Britaniji v mnogo pogledih precej podobna: povprečen prebivalec Slovenije porabi približno 110 kWh primarne energije na dan (približno toliko kot povprečni Britanec), več kot polovica te energije izvira iz fosilnih goriv – nafte, premoga in plina, slovenski ogljikovi izpusti na prebivalca pa so blizu britanskim ne glede na to, da Slovenija proizvede približno petindvajsetkrat več hidroenergije in trikrat več jedrske energije na prebivalca. Z vidika te knjige je morda najpomembnejša razlika gostota prebivalstva, ki je v Sloveniji (100 ljudi na kvadratni kilometer) dvainpolkrat manjša. Zato bi utegnili imeti pri zagotavljanju trajnostne energije malenkost lažje delo – ampak samo malenkost! Ni preprosto izdelati načrta trajnostne energije, ki se izide, ni pa nemogoče.

Zahvaljujem se Britanskemu veleposlaništvu v Ljubljani, zavodu RAZ:UM (Raziskovalno, razvojno in umetniško središče Univerze v Mariboru), podjetju Consensus in Energetiki.NET, ki so v okviru projekta krepite energetske pismenosti EN-LITE omogočili slovenski prevod.

Upam, da boste ob branju uživali toliko, kot sem jaz ob pisanju.

David J. C. MacKay, FRS, profesor *regius* tehniških ved, Univerza v Cambridgeu, glavni znanstveni svetovalec britanskega ministrstva za energijo in podnebne spremembe

Elektronska različica slovenskega prevoda knjige je prosto dostopna prek povezav na spletnem mestu projekta krepite energetske pismenosti EN-LITE: www.en-lite.si in na spletnem mestu knjige: www.withouthotair.com.

Predgovor

O čem govori ta knjiga

Zavzemam se za to, da v Veliki Britaniji zmanjšamo izpuste puhlic – puhlic o trajnostni energiji. Vsi govorijo, kako pomembno je, da opustimo fosilna goriva, nas spodbujajo k »dejanjem, ki vodijo do sprememb«, a veliko tega, kar naj bi domnevno vodilo do sprememb, se v končnem seštevku ne izide.

Raven izpustov puhlic je visoka, ker ljudi prevzamejo čustva (na primer o vetrnih ali jedrskih elektrarnah), nihče pa ne govori o številkah. Če že omenjajo številke, jih izberejo tako, da so slišati bombastično, da naredijo vtis in da v debatah nabirajo točke, ne prispevajo pa k resni razpravi.

To je knjiga o številkah brez ovinkarjenja. Z njo želim bralca voditi mimo čeri besedičenja k dejanjem, ki zares vodijo do sprememb, in strategijam, ki se izidejo.

Knjiga je brezplačna

Knjige nisem napisal, da bi zaslužil. Napisal sem jo, ker je trajnostna energija pomembna. Če želite do nje za lastno uporabo priti brezplačno, si kar postrezite: na voljo je na spletnem naslovu www.withouthotair.com.

Knjiga je brezplačna v še enem pomenu: v skladu z licenco Creative Commons Attribution-Non-Commercial-Share-Alike 2.0 UK: England & Wales lahko brezplačno uporabljate vse gradivo v tej knjigi, razen ilustracij in podpisanih fotografij. (Te so izvzete, ker so mi avtorji dovolili zgolj uporabo svojega dela, ne pa tudi dajanja v uporabo pod licenco Creative Commons.) Posebej dobrodošla je uporaba mojega gradiva za izobraževalne namene. Za vsako sliko v knjigi je na moji spletni strani na voljo ločena datoteka v boljši kakovosti.

Kako knjigo uporabljati

Nekatera poglavja se začnejo s citatom. Nikar ne mislite, da se zato z avtorjem citata strinjam; vzemite ga kot provokacijo, kot hipotezo, ki jo je treba kritično pretestiti.

Veliko začetnih poglavij (oštevilčenih z 1, 2, 3 ...) dopolnjujejo daljša tehnična poglavja (A, B, C ...). Ta se začnejo na strani 254.

Ob koncu vsakega poglavja so dodatne opombe in napotila k virom in literaturi. Oznake za opombe, posejane po besedilu, se mi zdijo moteče, zato jih v knjigi ni. Če jih obožujete, jih lahko za lastno uporabo dodate sami – za skoraj vsako pomembnejšo trditev v besedilu je na koncu poglavja opomba z navedbo vira ali dodatnimi informacijami.

Besedilo vsebuje tudi napotila k spletnim virom. Pri pošastno dolgih spletnih naslovih sem uporabil storitev TinyURL in v besedilo vstavil majceno kodo – takole: [yh8xse] –, ki jo najdete na koncu knjige na strani 344. yh8xse je kodificiran zapis za krajši URL, v tem primeru: <http://tinyurl.com/yh8xse>. Seznam vseh spletnih naslovov iz knjige je v celoti na voljo na <http://tinyurl.com/yh8xse>.

Vesel bom odzivov in popravkov. Zavedam se, da občasno streljam kozle; v prvih osnutkih knjige sem se pri nekaterih številkah zmotil za dvakratnik. Upam, da so napake, ki so še ostale, manjše, a kljub temu predvidevam, da bom v nadaljnjem procesu učenja o trajnostni energiji podatke še posodabljal.

Kako knjigo citirati:

David J. C. MacKay. *Trajnostna energija – brez razgretega ozračja*.

UIT Cambridge, 2008. ISBN 978-0-9544529-3-3. Brezplačno dostopna na spletni strani www.withouthotair.com.



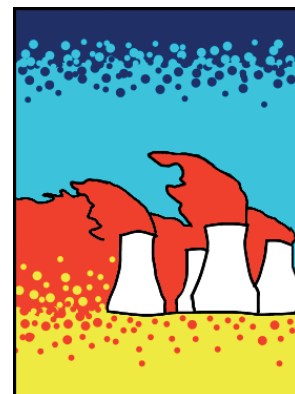
Kazalo

1. del Številke, ne pridevniki	1
1 Razlogi	2
2 Bilanca	22
3 Avtomobili	29
4 Vetrna energija	32
5 Letala	35
6 Sončna energija	38
7 Ogrevanje in hlajenje	50
8 Hidroenergija	55
9 Osvetlitev	57
10 Vetrna energija na morju	60
11 Zabavna elektronika	68
12 Energija valovanja	73
13 Hrana in kmetijstvo	76
14 Energija plimovanja	81
15 Stvari in predmeti vsakdanje rabe	88
16 Geotermalna energija	96
17 Javne službe	100
18 Lahko preživimo z obnovljivimi viri energije?	103
2. del Do opaznih sprememb	113
19 Vsako VELIKO dejanje šteje	114
20 Boljši promet	118
21 Pametnejše ogrevanje	140
22 Učinkovita raba elektrike	155
23 Trajnostna fosilna goriva?	157
24 Jedrska energija?	161
25 Življenje na račun obnovljive energije drugih?	177
26 Nihanja in hranilniki	186
27 Pet energetskega načrta za Veliko Britanijo	203
28 Stroški in kaj ti zares pomenijo	214
29 Kaj zdaj	222
30 Energetski načrti za Evropo, Ameriko in svet	231
31 Poslednja možna razprava, zajemanje ogljika	240
32 Odgovarjati z da	250
Zahvale	251
3. del Tehnična poglavja	253
A Avtomobili II	254
B Vetrna energija II	263

C	Letala II.....	269
D	Sončna energija II.....	283
E	Ogrevanje II.....	289
F	Energija valov II.....	307
G	Energija plimovanja II.....	311
H	Stvari in predmeti vsakdanje rabe II.....	322
4. del	Koristni podatki.....	327
I	Na kratko o enotah.....	328
J	Prebivalstvo in površine.....	338
K	Oris trajnostnih energetske priložnosti za Slovenijo.....	342
	Bibliografija.....	348
	O avtorju.....	357

1. del

Številke, ne pridevniki



1 Razlogi

*Živimo v času, ko čustva in občutki štejejo več kot resnica,
o znanosti pa smo zelo slabo poučeni.*

James Lovelock

V zadnjem času sem prebral dve knjigi, eno je napisal fizik, drugo pa ekonomist. V knjigi *Out of Gas* David Goodstein, fizik s kalifornijskega tehnološkega inštituta, opisuje pretečo energijsko krizo kot posledico »konca naftne dobe«. Kriza se bo začela kmalu, napoveduje: udarila bo, a ne ko bomo načrpali zadnjo kapljo nafte, temveč ko načrpana nafta ne bo več zadostila povpraševanju – morda že leta 2015 ali 2025. Tudi če bi kot po čudežu od tega trenutka dalje vso našo energijsko požrešnost nasitili z jedrsko energijo, pravi Goodstein, bi naftno krizo v kakšnih dvajsetih letih preprosto nadomestila jedrska kriza, saj pojemajo tudi zaloge urana.

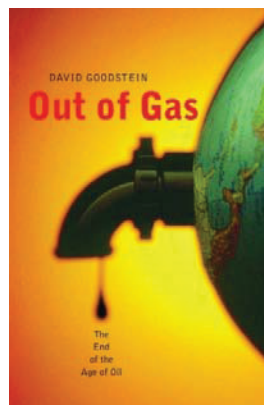
V knjigi *The Skeptical Environmentalist* Bjørn Lomborg naslika povsem drugačno sliko. »Vse je v redu.« Prav zares, »vse gre na bolje«. In to še ni vse, »svet ne drvi v veliko energijsko krizo«, in »energije je več kot dovolj«.

Kako lahko dva pametna človeka prideta do tako različnih zaključkov? Temu sem moral priti do dna.

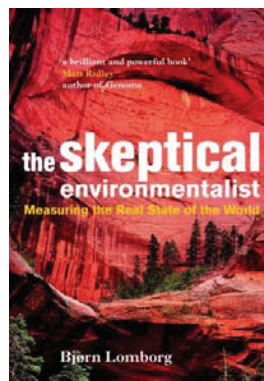
Energija se je med novice v Veliki Britaniji uvrstila leta 2006. Razplamtela se je razprava, ki so jo podžigale vesti o velikih podnebnih spremembah in potrojitev cen zemeljskega plina v pičlih šestih letih. Kako bi morala Velika Britanija pokriti svoje potrebe po energiji? Kaj pa svet?

Poglejmo primer. Vetrna ali jedrska energija? Večjo polarizacijo mnenj si med pametnimi ljudmi težko zamislimo. Med razpravo o predlaganem povečanju uporabe jedrske energije je Michael Meacher, nekdanji britanski okoljski minister, rekel: »Če hočemo zmanjšati izpuste toplogrednih plinov za 60 % /.../ do leta 2050, to lahko dosežemo zgolj in samo z obnovljivimi viri.« Sir Bernard Ingham, nekdanji javni uslužbenec, pa je v podporo jedrski okrepitvi povedal: »Vsakdo, ki se za zapolnitev [energijske] vrzeli zanaša na obnovljive vire, živi v popolni pravljici in je, če vprašate mene, sovražnik naroda.«

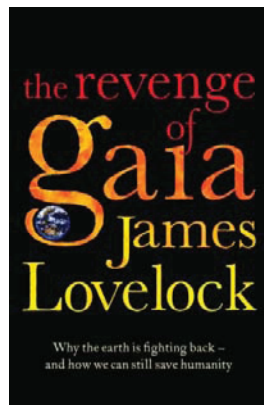
Podobna nesoglasja lahko poslušamo znotraj ekološkega gibanja. Vsi se strinjajo, da je nujno storiti *nekaj*, ampak *kaj*? Jonathon Porritt, predsednik Komisije za trajnostni razvoj, piše: »Na tej točki je vsak predlog za nov jedrski program neupravičen in /.../ vsak tak predlog bi bil neskladen z [vladno] strategijo trajnostnega razvoja.« Piše tudi: »Strategija, ki ne vključuje jedrske energije, lahko zagotovi in mora zagotoviti celoten prihranek izpustov ogljika, ki ga potrebujemo do leta 2050 in naprej, in varen dostop do zanesljivih virov energije.« Po drugi strani pa okoljevarstvenik James Lovelock v svoji knjigi *Gaja se maščuje* piše: »Za vzpostavitev trajnostnega razvoja je že veliko prepozno.« Po njegovem mnenju je energija iz jedrske cepitve »edino učinkovito zdravilo, ki ga trenutno



David Goodstein, *Out of Gas* (2004)



Bjørn Lomborg, *The Skeptical Environmentalist* (2001)



James Lovelock, *Gaja se maščuje: o pregrevanju Zemlje in usodi človeštva* (2006) © Allen Lane

premoremo«, četudi ga ne priporočajo kot dolgoročen univerzalni recept za naš oboleli planet. Kopenske vetrne elektrarne so »zgolj /.../ manever, s katerim [naši voditelji] izkazujejo svoje okoljske reference«.

Pri tej razgreti razpravi gre v osnovi za številke. Koliko energije lahko zagotovi posamezni vir, po kakšni gospodarski in družbeni ceni in s kakšnim tveganjem? Toda konkretne številke se redko omenja. V javnih razpravah slišimo samo: »Jedrska energija je vreča brez dna« ali »imamo ogromno valovanja in vetra.« Težava pri takšnem govorjenju je, da ni dovolj vedeti, da je nekaj ogromno: vedeti moramo, koliko »ogromno« na eni strani pomeni v primerjavi z »ogromno« na drugi strani, torej z *našo ogromno porabo energije*. Za to primerjavo ne potrebujemo pridevnikov, temveč številke.

Kadar že uporabimo številke, se njihov pomen pogosto zamegljuje z velikansko vrednostjo. Niso uporabljene za potrebe informiranja, temveč da se napravi vtis, nabira točke v debatah. »Prebivalci Los Angelesa vsak dan prevozijo 229 milijonov kilometrov, kar je enako razdalji od Zemlje do Marsa.« »Vsako leto je uničenih 11 milijonov hektarjev tropskega pragozda.« »V morje odvržemo 6,4 milijona ton smeti na leto.« »Britanci zavržejo 2,6 milijarde kosov kruha na leto.« »Z letno količino odpadnega papirja v Veliki Britaniji bi napolnili 103.448 dvonadstropnih avtobusov.«

Če bi vse neučinkovite ideje za reševanje energijske krize položili v ravno vrsto, bi segle do Lune in nazaj ... Malo sem zašel.

In kakšna je posledica pomanjkanja tehtnih števil in dejstev? Poplava norih znanstveno analfabetskih nesmislov. BBC deli nasvete o tem, kako lahko vsakdo prispeva k reševanju planeta – na primer: »Izklopite polnilec za mobilni telefon, kadar ni v uporabi.« In če kdo ugovarja, da polnilci niso zares največji porabnik energije, pridejo nad nas z mantro: »Vsaka malenkost šteje.« Vsaka malenkost šteje? Bolj realistična mantra je:

Če vsakdo prispeva malo, bomo malo tudi dosegli.

K dnevnim nesmislom prispevajo tudi podjetja, ko nam pripovedujejo, kako krasna so ali kako nam lahko pomagajo, da »prispevamo po svojih močeh«. BP* na spletni strani denimo razglša, kako nameravajo z zamenjavo barve, ki jo uporabljajo za barvanje BP-jevih ladij, zmanjšati onesnaženje z ogljikovim dioksidom (CO₂). Kaj temu res kdo nasede? Saj bo menda vsakdo dojel, da se je treba posvečati tistemu, kar je v tankerju, ne pa prebarvani zunanosti, če želimo bistveno zmanjšati izpuste CO₂ naše družbe? BP je zasnoval tudi storitev »targetneutral.com«, spletno odvezo za ogljik, kjer obljubljajo »nevtralizacijo« vseh vaših ogljikovih izpustov in ceno, ki »ne gre v nebo« – tako je, vaše onesnaženje z ogljikovim dioksidom je mogoče počistiti za samo 40 funtov na leto. Kako se lahko to izide? – Če bi podnebne spremembe zares lahko preprečili za 40 funtov na prebivalca, bi to lahko postorila vlada in še bi finančnemu ministru v žepu ostalo nekaj fičnikov!

*British Petroleum.

Še večje graje so vredna podjetja, ki skrb za okolje izkoriščajo s ponudbami »baterij na vodo«, »biorazgradljivih mobilnih telefonov«, »prenosnih ročnih vetrnih turbin« in druge nesmiselne ropotije.

Zavajajo tudi aktivisti. Ljudje, ki zagovarjajo prednosti obnovljivih virov pred jedrsko energijo, denimo pravijo: »Z vetrnimi zmogljivostmi na morju bi lahko napajali vsa britanska gospodinjstva.« In še: »Nove jedrske elektrarne k boju proti podnebnim spremembam ne bodo veliko prispevale,« češ da bi 10 novih jedrskih elektrarn »izpuste zmanjšalo samo za približno 4 %«. »Ta argument je zavajajoč, saj se polje primerjave sredi razprave zamenja od »števila gospodinjstev« do »zmanjšanja izpustov«. V resnici je količina električne energije iz imenitnih vetrnic, ki »bi lahko napajale vsa britanska gospodinjstva«, *povsem enaka* količini, ki bi jo proizvedlo 10 jedrskih elektrarn! »Napajanje vseh britanskih gospodinjstev« predstavlja samo 4 % vseh britanskih izpustov.

Najhujši prestopniki v kraljestvu nesmislov pa so najverjetneje ljudje, ki bi resnično morali biti pametnejši – medijski založniki, ki širijo nesmisle –, na primer New Scientist s svojim člankom o »avtomobilu na vodni pogon«*.

V okolju, v katerem ljudje ne razumejo števil, je časopisom, aktivistom, podjetjem in politikom dovoljeno res prav vse.

Potrebujemo preproste številke in te morajo biti razumljive, primerljive in lahko zapomnljive.

Opremljeni s številkami bomo bolje pripravljeni na vprašanja, ki so navedena v nadaljevanju.

1. Ali država, kot je Velika Britanija, realno lahko preživi z lastnimi obnovljivimi viri energije?
2. Bi se izognili energijski krizi, če bi vsi nastavili termostate eno stopinjo bliže zunanji temperaturi, vozili manjši avto in izklopili polnilec za mobilni telefon, kadar ni v uporabi?
3. Bi bilo treba bistveno povečati davek na motorna goriva? Bi bilo treba prepoloviti hitrostne omejitve na cestah?
4. Je človek, ki zagovarja vetrnice namesto jedrskih elektrarn, »sovražnik naroda«?
5. Če podnebne spremembe predstavljajo »hujšo grožnjo kot terorizem«, bi morale vlade kriminalizirati »povečevanje potovanj« in sprejemati zakone proti »nagovarjanju k potrošnji«?
6. Bomo s preходом k »naprednim tehnologijam« lahko odpravili onesnaževanje z ogljikovim dioksidom brez spremembe življenjskega sloga?
7. Bi morali ljudi spodbujati k vegetarijanski prehrani?
8. Bi morale biti število prebivalcev Zemlje šestkrat manjše?

* Za tragične podrobnosti glejte opombe tega poglavja (str. 19). (Vsako poglavje ima opombe z literaturo, viri in podrobnostmi o navedenih trditvah. Da ne bi motil bralca, oznak za opombe ne bom več vključeval v besedilo.)



Slika 1.1 Ta Greenpeaceov letak sem dobil s preostalo oglasno pošto maja 2006. So oboževane vetrnice sposobne nadomestiti osovražene hladilne stolpe?

Zakaj razpravljamo o energetski politiki

Dandanašnje razprave o energiji vodijo trije različni razlogi.

Prvič, fosilna goriva so omejen vir. Ne zdi se nemogoče, da bi poceni nafte (ki poganja naše avtomobile in tovornjake) in poceni plina (ki ogreva številne stavbe) zmanjkalo za časa našega življenja. Zato iščemo alternativne vire energije. Glede na to, da so fosilna goriva dragocen vir, ki se uporablja za proizvodnjo plastike in vse mogoče ustvarjalne namene, bi jih morda res veljalo prihraniti in uporabiti pametneje, kot da jih preprosto pokurimo.

Drugič, zanima nas varnost oskrbe z energijo. Tudi če so fosilna goriva kje na svetu še na voljo, mogoče nočemo biti odvisni od njih, če bi s tem naše gospodarstvo izpostavili kapricam zaupanja nevrednih tujcev. (Upam, da zaznate moj ironični ton.) Če sklepamo po sliki 1.2, je vrhunec »naših« fosilnih goriv nedvomno že mimo. Veliki Britaniji grozi še poseben problem z varnostjo oskrbe, ki mu pravimo »energijska vrzel«. V prihodnjem desetletju bo prenehalo obratovati precej starih elektrarn na premog in jedrskih elektrarn (slika 1.3), zato obstaja nevarnost, da bo povpraševanje po električni energiji občasno preseгло ponudbo, če ne bomo uresničili ustreznih načrtov.

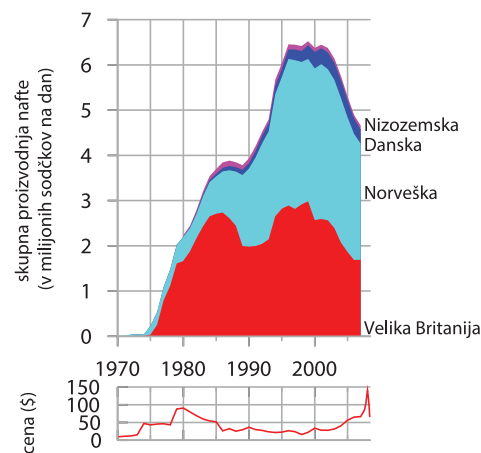
Tretjič, raba fosilnih goriv zelo verjetno spreminja podnebje. Za podnebne spremembe je krivih več človekovih ravnanj, največ pa k njim prispeva povečanje učinka tople grede, ki ga povzroča ogljikov dioksid (CO_2). Večina izpustov ogljikovega dioksida je posledica sežiganja fosilnih goriv. In te v prvi vrsti sežigamo za energijo. Če želimo preprečiti podnebne spremembe, torej moramo izbrati nov način pridobivanja energije. Podnebni problem je večinoma energijski problem.

Ne glede na to, kaj od tega trojega vas pripravi k ukrepanju, potrebujemo številke o energiji in politične strategije, ki se izidejo.

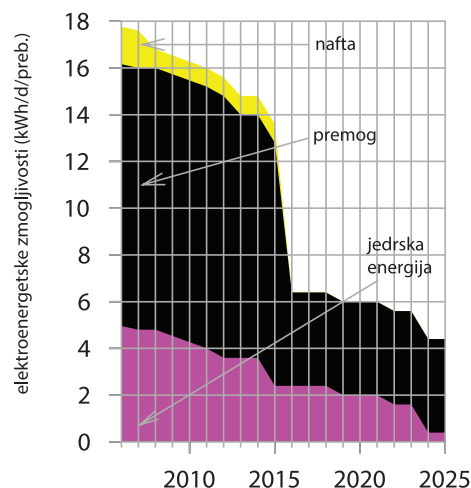
Pri prvih dveh točkah gre za preprosta sebična razloga za drastično zmanjšanje rabe fosilnih goriv. Pri tretji točki, podnebnih spremembah, pa je razlog bolj altruističen – bremena podnebnih sprememb ne bomo nosili mi, temveč prihodnje generacije v naslednjih stoletjih. Nekateri za podnebne spremembe ne čutijo odgovornosti. Slišali jih boste reči: »Kakšen smisel ima, da karkoli naredim, če se je pa Kitajcem zmešalo?« Zato bom zdaj še malo ostal pri podnebnih spremembah, saj sem med pisanjem te knjige izvedel nekaj zanimivih podatkov, ki osvetlujejo ta etična vprašanja. Če vas podnebne spremembe ne zanimajo, mirno preskočite k naslednjemu podpoglavju na strani 16.

Podnebni razlog

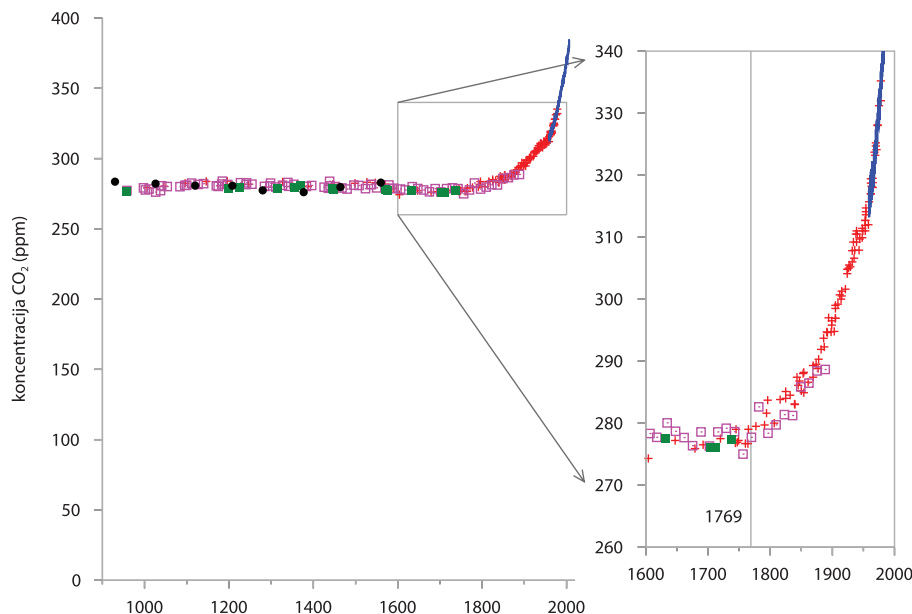
Povezavo s podnebnimi spremembami dokazujemo v treh korakih. Prvič, človek s sežiganjem fosilnih goriv povečuje koncentracijo ogljikovega dioksida. Drugič, ogljikov dioksid je toplogredni plin. Tretjič, s povečevanjem učinka tople grede se zvišujejo povprečne globalne temperature (in nastopijo še mnoge druge posledice).



Slika 1.2 Ali »naših« fosilnih goriv zmanjkuje? Skupna proizvodnja surove nafte iz Severnega morja in cena nafte leta 2006 v dolarjih na sodček.



Slika 1.3 Energijska vrzel kot posledica zaprtja britanskih elektrarn po projekciji energetskega podjetja EDF. Graf prikazuje predvidene zmogljivosti jedrskih elektrarn, elektrarn na premog in elektrarn na nafto v kilovatnih urah na dan na prebivalca. Gre za največjo zmogljivost posameznega vira energije.



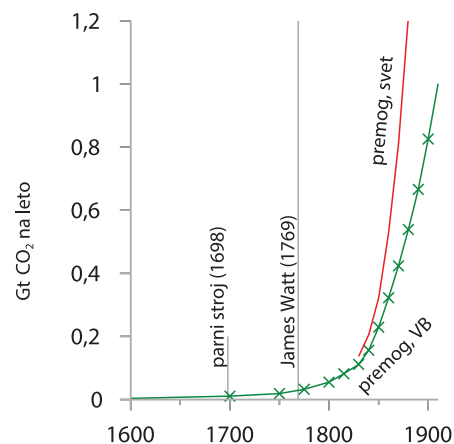
Slika 1.4 Koncentracija ogljikovega dioksida (CO_2) (v delcih na milijon) za zadnjih 1100 let, izmerjena v zraku, ujetem v vzorcih v ledenih vrtnah (do leta 1977) in neposredno na Havajih (od leta 1958 dalje).

Med letoma 1800 in 2000 se je utegnilo nekaj zgoditi. Označil sem leto 1769, ko je James Watt patentiral svoj parni stroj. (Prvi uporabljeni parni stroj so iznašli 70 let pred tem, leta 1698, toda Wattov je bil veliko učinkovitejši.)

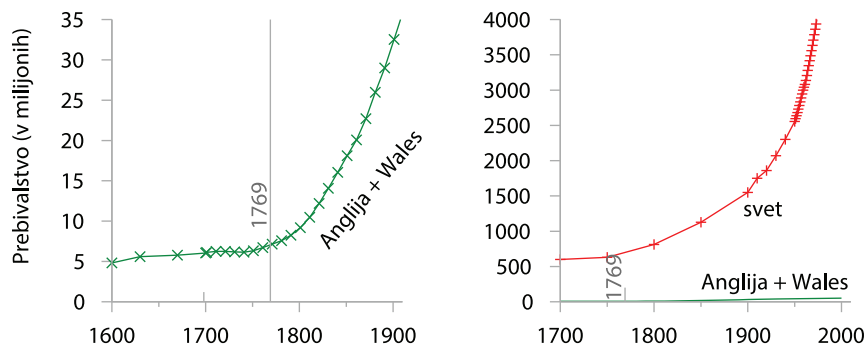
Začnimo z dejstvom, da se koncentracija ogljikovega dioksida povečuje. Slika 1.4 prikazuje meritve koncentracije CO_2 v zraku za obdobje od leta 1000 do danes. Nekateri »skeptiki« trdijo, da je nedavno povečanje koncentracije CO_2 naravni pojav. Ali »skeptik« pomeni »osebo, ki ni niti poškilila v podatke«? Se vam ne zdi, da se je med letoma 1800 in 2000 *nekaj* vendarle utegnilo zgoditi? Nekaj, kar ni bilo del naravnih procesov v predhodnih tisoč letih?

Nekaj se je v resnici zgodilo, in sicer industrijska revolucija. Na grafu sem označil leto 1769, ko je James Watt patentiral svoj parni stroj. Prvi uporabljeni parni stroj sicer izvira iz leta 1698, toda industrijsko revolucijo je zares sprožil šele učinkovitejši Wattov parni stroj. Večinoma so ga uporabljali za črpanje vode iz premogovnikov. Slika 1.5 ponazarja, kaj se je dogajalo z britanskim premogovništvom od leta 1769 dalje. Količina izkopa je prikazana v milijardah ton CO_2 , sproščenega ob sežiganju premoga. Leta 1800 so premog uporabljali za pridobivanje železa, gradnjo ladij, ogrevanje stavb, pogon lokomotiv in drugih strojev ter seveda za delovanje črpalk, s katerimi so izpod angleških in valižanskih gričev lahko postrgali še več premoga. Velika Britanija je bila izjemno bogato obdarjena s premogom: ob začetku revolucije je bila količina ogljika, ki se je skrival v premogu pod Veliko Britanijo, približno enaka količini ogljika v nafti pod Savdsko Arabijo.

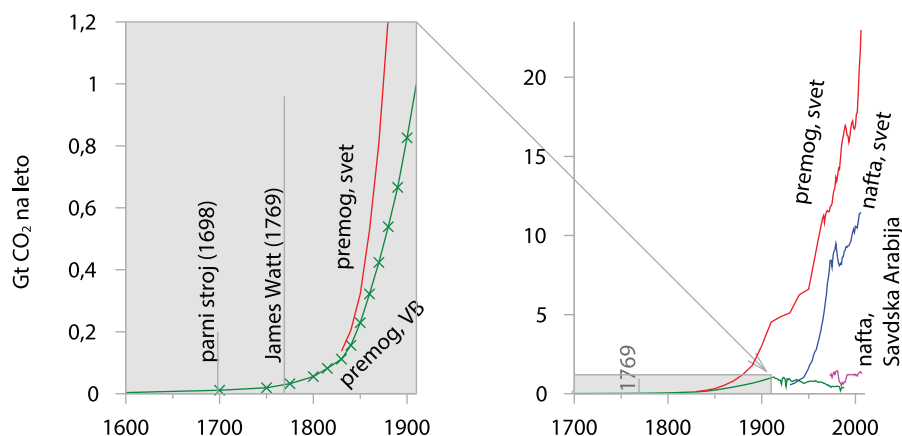
V 30 letih, med letoma 1769 in 1800, se je britanska letna proizvodnja premoga podvojila. V naslednjih 30 letih (1801–1830) se je še enkrat podvojila. Naslednja podvojitev se je zgodila v 20 letih (1831–1850), še naslednja spet v 20 letih (1851–1870). Ta premog je Veliki Britaniji omogočil, da se je razbohotila. Blaginja, ki se je naselila v Anglijo in Wales, se je izražala v stoletje trajajoči rasti prebivalstva brez primere:



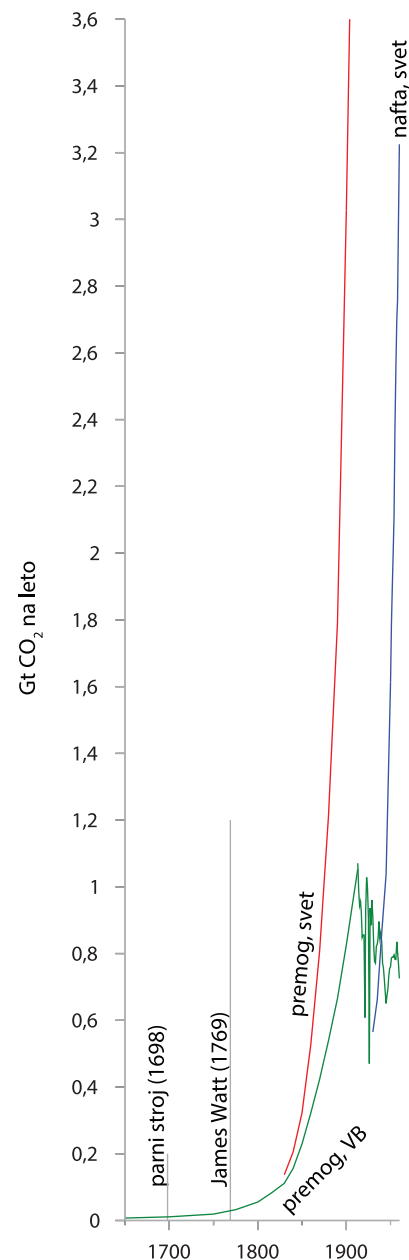
Slika 1.5 Zgodovina britanske in svetovne proizvodnje premoga od leta 1600 do 1910. Raven proizvodnje je prikazana v milijardah ton CO_2 – nepredstavljiva enota, vem, toda ne skrbite: kmalu jo bomo prenesli v razumljivejše okvire.



S širjenjem revolucije so se za industrijsko kurjenje premoga ogrele tudi druge države. Slika 1.6 prikazuje britansko in svetovno proizvodnjo premoga v enakem merilu kot slika 1.5, le da je zgodovinsko okno premaknjeno za 50 let naprej. V Veliki Britaniji je proizvodnja premoga doživela vrhunec leta 1910, svetovna proizvodnja premoga pa se je še vedno podvajala vsakih 20 let. Zgodovino pridobivanja premoga je težko prikazati na enem samem grafu. Če bi hoteli v istem merilu ponazoriti, kaj se je zgodilo v *naslednjih* 50 letih, bi morala knjiga v višino meriti en meter! To težavo lahko rešimo tako, da prilagodimo skalo na ordinatni osi.



Lahko pa ordinatno os neenakomerno stisnemo, da na istem grafu hkrati vidimo majhne in velike količine. Dober način stiskanja osi se imenuje logaritemska skala in prav to sem uporabil pri spodnjih dveh grafih na sliki 1.7 (str. 9). Na logaritemski skali vsa desetkratna povečanja (od 1 do 10, od 10 do 100, od 100 do 1000) ponazarja enaka razdalja na papirju. Na njej je količina, ki narašča za stalen letni odstotek (temu pravimo »eksponentna rast«), videti kot ravna črta. Logaritemski grafi so sijajni, če hočemo pojasniti rast. Navadni grafi na slikah na straneh 6 in 7 povedo, da sta britanska in svetovna proizvodnja premoga izjemno narasli in da se je izjemno povečalo tudi britansko in svetovno prebivalstvo, vendar pa relativne stopnje rasti v teh navadnih grafih niso vidne. Logaritemski grafi omogočajo primerjavo stopenj rasti. Če na primer pogledamo nagib



Slika 1.6 Kaj je sledilo: zgodovina britanske in svetovne proizvodnje premoga od leta 1650 do 1960 z enako skalo kot na sliki 1.5.

krivulj prebivalstva, lahko vidimo, da je stopnja rasti svetovnega prebivalstva v zadnjih 50 letih nekoliko večja od stopnje rasti prebivalstva Anglije in Walesa leta 1800.

Med letoma 1769 in 2006 se je svetovna proizvodnja premoga povečala za 800-krat. In še vedno se povečuje. Pridobivamo tudi druga fosilna goriva – srednji graf na sliki 1.7 prikazuje proizvodnjo nafte –, toda pri izpustih CO₂ še vedno kraljuje premog.

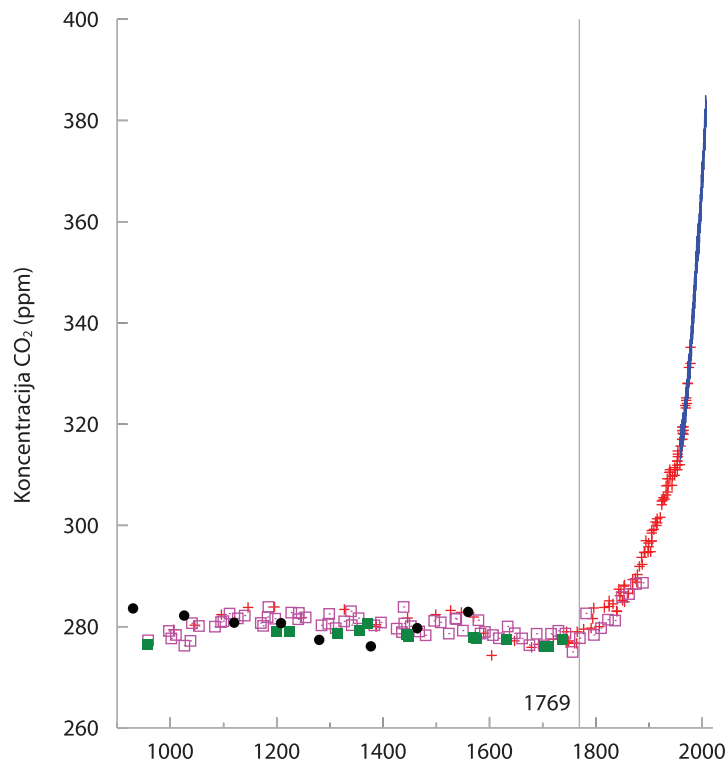
Sežiganje fosilnih goriv je glavni razlog za povečanje koncentracije CO₂. To je dejstvo, ampak samo malo: od četice podnebnih neaktivistov se razlega vztrajno brenčanje. Kaj pravijo? Prisluhnimo Dominicu Lawsonu, kolumnistu *Independenta*.

»Sežiganje fosilnih goriv v atmosfero prispeva približno **sedem gigaton** CO₂ na leto, kar se sliši precej. Vendar pa biosfera in oceani v atmosfero prispevajo približno **1900 gigaton** oz. **36.000 gigaton** CO₂ na leto – ... med drugim smo zato nekateri skeptični do vloge, ki jo pripisujejo človekovemu sežiganju goriv pri učinku toplogrednih plinov. Zmanjševanje človekovih izpustov CO₂ je megalomanija, pretirano poudarjanje človekovega vpliva. Politiki ne morejo spremeniti vremena.«

Vedno si vzamem čas in prisluhnem skeptikom; vsega, kar rečejo, ne morem označiti za prazno slamo – ampak neodgovorno novinarstvo, kot ga zganja Dominic Lawson, zasluži pošteno klofuto.

Prva težava s tem, kar nam Lawson servira: *vse tri številke* (**sedem**, **1900** in **36.000**) so *napačne*! Pravilne številke so **26**, **440** in **330**. A pustimo te napake, pojdimo k Lawsonovi glavni točki, sorazmerni neznatnosti človekovih izpustov.

Ja, naravni tokovi CO₂ so večji od dodatnega toka, ki smo ga vključili pred 200 leti, ko smo se resno lotili sežiganja fosilnih goriv. Toda silno zavajajoče je številčno opredeliti samo velike naravne tokove v atmosfero, ne pa omeniti tudi skoraj povsem enakih tokov iz atmosfere spet nazaj v biosfero in oceane. Stvar je v tem, da so bili ti *naravni* tokovi v atmosfero in iz nje tisočletja v skoraj popolnem ravnovesju. Zato sploh ni bistveno, da so ti naravni tokovi večji od človekovih izpustov. Naravni tokovi *so se medsebojno izničili*. Zato je bila koncentracija CO₂ v atmosferi in oceanih kljub njihovi velikosti v zadnjih nekaj tisoč letih *stalna*. Sežiganje fosilnih goriv pa ustvarja *nov* tok ogljika, ki se kljub svoji majhnosti *ne izniči*. Vzemimo preprosto analogijo s kontrolo potnih listov v prostoru za prihode na letališču. Vsako uro prispe tisoč potnikov in vestnih uradnikov je ravno dovolj, da obdelajo **tisoč potnikov na uro**. Vrsta sicer je, a zaradi usklajenosti dotoka potnikov in hitrosti storitve se ne daljša. Zdaj pa si zamislite, da zaradi meggle z manjšega letališča sem preusmerijo dodatno skupino letov. V prostor za prihode pride dodatnih **50 potnikov na uro**, kar je glede na prvotno število tisoč potnikov na uro majhen prirastek. Uprava vsaj na



Slika 1.7 Zgornji graf prikazuje koncentracijo ogljikovega dioksida (CO_2) (v delcih na milijon) za zadnjih 1100 let – iste podatke, kot so prikazani na Sliki 1.4.

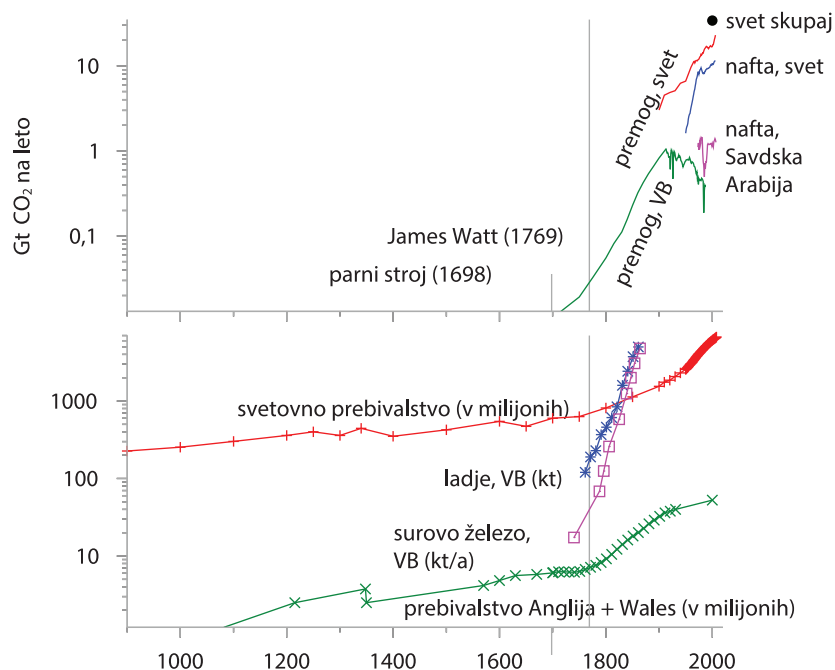
Tu sta portreta Jamesa Watta in njegovega parnega stroja iz leta 1769.



Srednji graf prikazuje (v logaritemski skali) zgodovino britanske proizvodnje premoga, savdske proizvodnje nafte, svetovne proizvodnje premoga, svetovne proizvodnje nafte in (točka desno zgoraj) skupno vrednost vseh izpustov toplogrednih plinov leta 2000. Vse proizvodne vrednosti so izražene v enotah s tem povezanih izpustov CO_2 .

Spodnji graf prikazuje (v logaritemski skali) nekaj posledic industrijske revolucije: skokovito povečanje angleškega prebivalstva in pozneje še svetovnega, občutno rast britanske proizvodnje surovega železa (v tisočih ton na leto) ter rast tonaže britanskih ladij (v tisočih ton).

V primerjavi z navadnimi grafi na predhodnih straneh nam logaritemska skala na istem diagramu omogoča prikaz tako angleškega kot svetovnega prebivalstva ter opazovanje zanimivih lastnosti obeh.



začetku ne odpre novih okenc in uradniki še naprej obdelajo samo tisoč potnikov na uro. Kaj se torej zgodi? Počasi, a zanesljivo *se vrsta podaljša*. Sežiganje fosilnih goriv nesporno povečuje koncentracijo CO₂ v atmosferi in površinskih plasteh oceanov. Temu dejstvu ne oporeka noben znanstvenik. Pri koncentraciji CO₂ človek *šteje*.

Torej. Sežiganje fosilnih goriv znatno povečuje koncentracijo CO₂. Je to pomembno? »Ogljik je naraven!« nas opominjajo naftni *spin doktorji*. »Ogljik je življenje!« Če CO₂ ne bi imel nobenih škodljivih učinkov, potem ogljikovi izpusti dejansko ne bi bili pomembni. Toda ogljikov dioksid je toplogredni plin. Ne najmočnejši, vendarle pa je pomemben. Če ga dodaš v atmosfero, bo učinkoval, kot toplogredni plini pač učinkujejo: absorbiral bo infrardeče sevanje (toploto), ki prihaja od Zemlje, in ga izseval dalje v naključno smer; ta naključna preusmeritev atmosferskega toplotnega prometa deluje kot odeja, ovira odtok toplote s planeta. Zato ogljikov dioksid prispeva h globalnemu segrevanju ozračja. To dejstvo ne temelji na kompleksnih zgodovinskih evidencah globalnih temperatur, temveč na preprostih fizikalnih lastnostih molekul CO₂. Toplogredni plini so odeja in CO₂ je ena plast odeje.

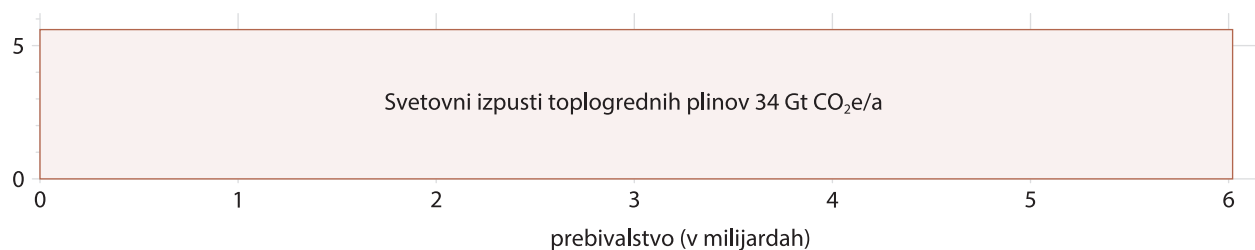
Če torej človeštvu uspe podvojiti ali potrojiti koncentracijo CO₂ (čemu se z redno prakso vztrajno približujemo), kaj se zgodi? Tu je veliko nejasnosti. Znanost o podnebjju ni preprosta. Podnebje je zapletena, nervozna mrcina in ni povsem jasno, kolikšno segretje bi povzročila podvojitev CO₂. Najboljši klimatski modeli se menda ujemajo v tem, da bi podvojitev koncentracije CO₂ imela približno enak učinek kot povečanje sevanja Sonca za 2 % in bi povprečno temperaturo na Zemlji krcnila za 3 °C navzgor. To bi bilo »slabo«, kot rečejo zgodovinarji. Ne bom zdrdral litanij verjetnih drastičnih posledic, saj verjamem, da ste jih že slišali. Zadržimo se z: »Grenlandski led bi se postopno stalil in v obdobju nekaj 100 let bi se morska gladina dvignila za približno 7 metrov.« Najmočnejše udarijo po prihodnjih generacijah. Takšnih temperatur na Zemlji ni bilo že vsaj 100.000 let in možno je, da bi se ekosistem tako drastično spremenil, da bi Zemlja prenehala zagotavljati nekatere dobrine in storitve, ki jih zdaj jemljemo za samoumevne.

Modeliranje podnebja je zahtevno in obremenjeno z negotovostjo. Toda negotovost o tem, kako natančno se bo podnebje odzvalo na dodatne toplogredne pline, ni opravičilo za neukrepanje. Če bi z veliko hitrostjo vozili motor po megli ob robu pečine, bi s tem, da nimate dobrega zemljevida pečine, lahko opravičili *nezmanjšanje* hitrosti?

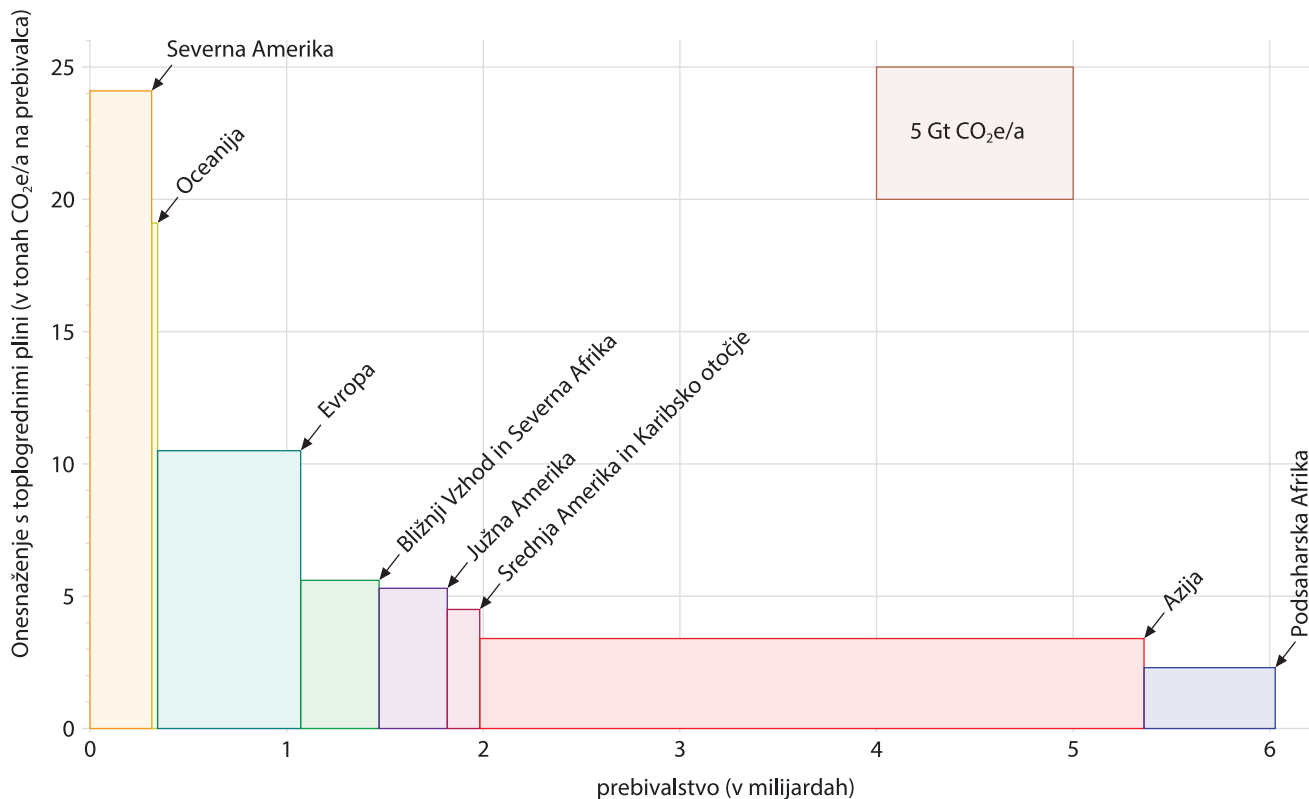
Kdo bi potemtakem moral zmanjšati hitrost? Kdo bi moral počistiti ogljikove izpuste? Kdo je odgovoren za podnebne spremembe? To je seveda etično vprašanje, ne znanstveno, a etične razprave morajo biti osnovane na dejstvih. Poglejmo zdaj dejstva o izpustih toplogrednih plinov. Najprej nekaj besed o enotah, v katerih jih merimo. Med toplogredne pline štejemo ogljikov dioksid, metan in dušikov oksid. Vsak ima svoje fizikalne lastnosti, po konvenciji pa vse izpuste plinov izražamo v »ekvivalentni količini ogljikovega dioksida«, pri čemer »ekvivalenten« pomeni »z enakim učinkom segrevanja ozračja v obdobju 100 let«. Eno tono ekvivalenta ogljikovega dioksida okrajšano zapišemo kot »1 t CO₂e«, eno milijardo ton (tisoč milijonov ton) pa kot »1 Gt CO₂e« (ena gigatona). V tej knjigi 1 t pomeni eno metrično tono (1000 kg).

Leta 2000 so bili svetovni izpusti toplogrednih plinov približno 34 milijard ton ekvivalenta CO₂ na leto (34 Gt CO₂e/leto). Nepredstavljiva številka. Lahko pa jo spremenimo v bolj predstavljlivo in osebno, če jo delimo s številom ljudi na planetu, 6 milijardami, in tako dobimo onesnaženje s toplogrednimi plini *na prebivalca*, ki znaša približno 5,5 tone CO₂e na leto na prebivalca. Tako lahko svetovne izpuste ponazorimo s pravokotnikom, v katerem dolžina predstavlja prebivalstvo (6 milijard), širina pa izpuste na prebivalca.

Onesnaženje s toplogrednimi plini
(v tonah CO₂e/leto na prebivalca)



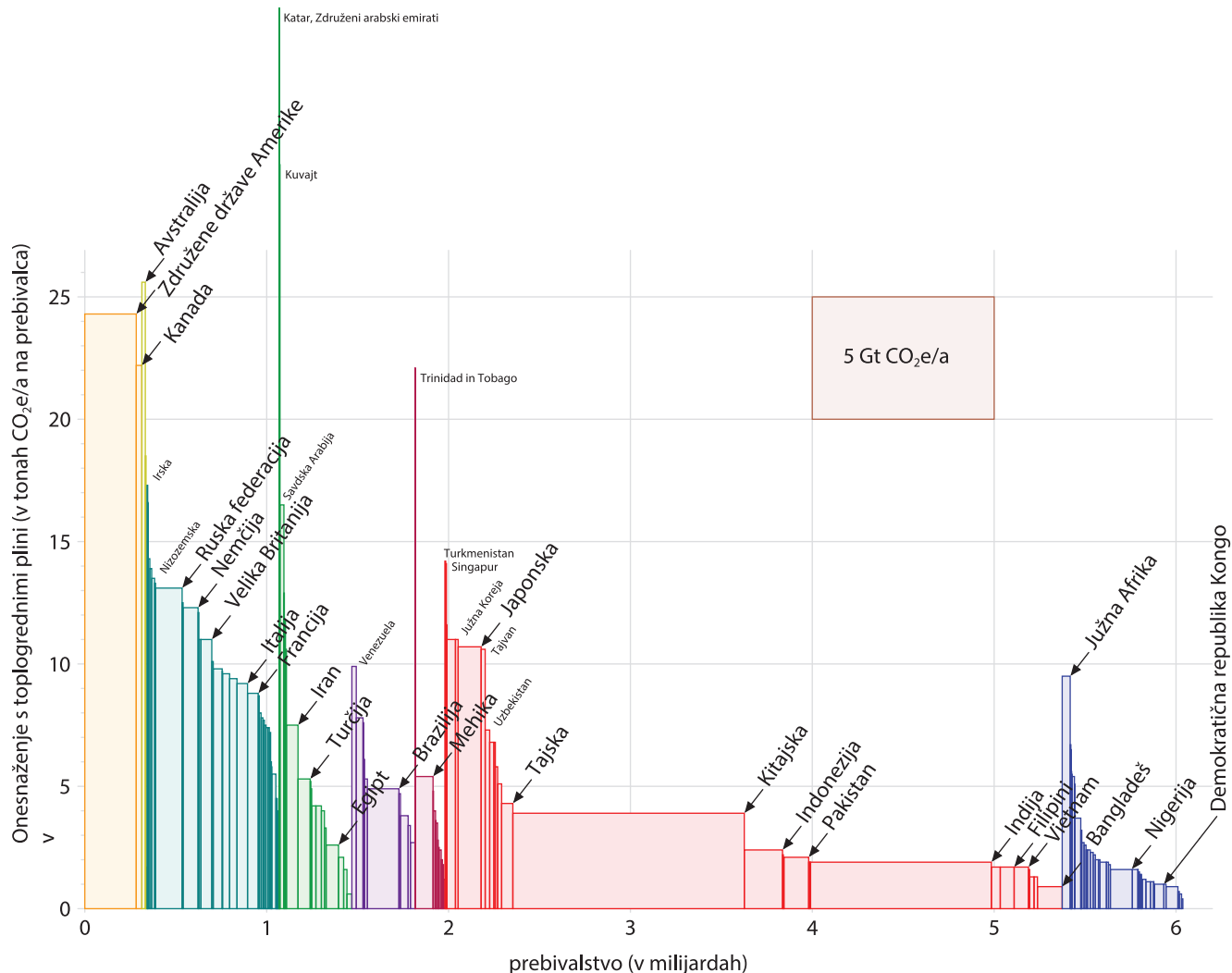
Drži, da smo vsi ustvarjeni enako, toda vsi ne proizvajamo 5,5 tone CO₂ na leto. Izpuste iz leta 2000 lahko razčlenimo in prikažemo, kako se 34-milijardni pravokotnik porazdeli med regije sveta:



Na tem grafu, ki uporablja enako skalo kot prejšnji, je svet razdeljen na osem regij. Površina vsakega pravokotnika predstavlja izpuste toplogrednih plinov ene od regij. Dolžina pravokotnika pomeni prebivalstvo regije, širina pa povprečne izpuste na prebivalca v tej regiji.

Leta 2000 so bili izpusti toplogrednih plinov na prebivalca v Evropi dvakrat večji od svetovnega povprečja, v Severni Ameriki pa štirikrat večji.

Razčlenjevanje lahko nadaljujemo in vsako regijo razdelimo na države. Tu postane stvar zares zanimiva ...

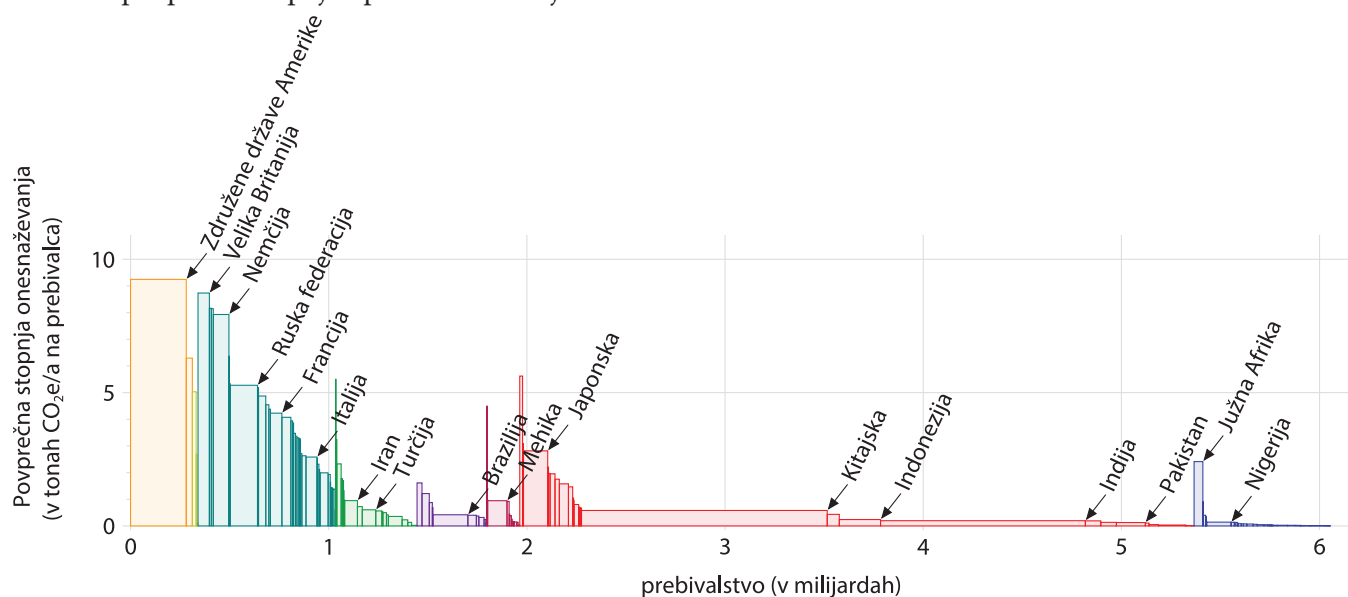


Glavne države z največjimi izpusti na prebivalca so Avstralija, ZDA in Kanada. Med vidnejšimi državami, ki sledijo, so evropske države, Japonska in Južna Afrika. Med evropskimi državami je Velika Britanija v trdnem povprečju. Kaj pa Kitajska, ta poredna, »ponorela« država? Že res, da je površina kitajskega pravokotnika približno enaka ameriškemu, dejansko pa so izpusti na prebivalca v tej državi *pod* svetovnim povprečjem. Indijski izpusti na prebivalca so manj kot *polovica* svetovnega povprečja. In treba se je zavedati, da je precej industrijskih izpustov Kitajske ter Indije povezanih s proizvodnjo *blaga za bogate države*.

Če torej velja, da je za zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov »nekaj treba storiti«, kdo je posebej odgovoren, da ukrepa? Kot sem rekel, je to etično vprašanje. Si pa težko zamislim etični sistem, po katerem odgovornosti ne nosijo predvsem države na levem delu diagrama – države, katerih izpusti so dvakrat, trikrat ali štirikrat večji od svetovnega povprečja. Države, ki najlažje plačajo. Države, kot so Velika Britanija in ZDA, na primer.

Zgodovinska odgovornost za podnebne učinke

Če vzamemo, da je človekova dejavnost škodljivo vplivala na podnebje in da ga nekdo mora spraviti v red, kdo naj to plača? Nekateri pravijo: »Naj plača tisti, ki onesnažuje.« Slike na predhodnih straneh so pokazale, kdo onesnažuje danes. Toda ni pomembna samo trenutna stopnja onesnaževanja s CO₂, temveč kumulativni *skupni* izpusti; veliko izpuščenega ogljikovega dioksida (približno tretjina) ostane v ozračju vsaj 50 ali 100 let. Če sprejmemo etično razmišljanje, naj »plača tisti, ki onesnažuje«, potem se moramo vprašati, kako velik je zgodovinski odtis posamezne države. Naslednja slika prikazuje kumulativne izpuste CO₂ posameznih držav, izražene v povprečni stopnji izpustov v obdobju med letoma 1880 in 2004.

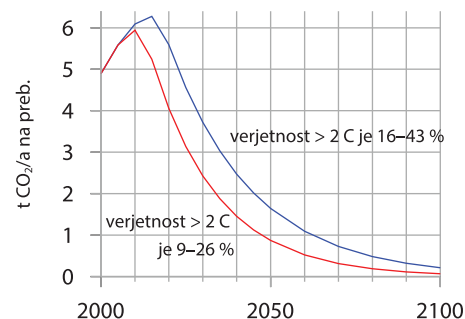


Čestitke, Velika Britanija! Uvrstila se je na stopničke za zmagovalce. Danes smo morda res povprečna evropska država, na seznamu zgodovinskih onesnaževalcev na prebivalca pa nas prekosijo samo ZDA.

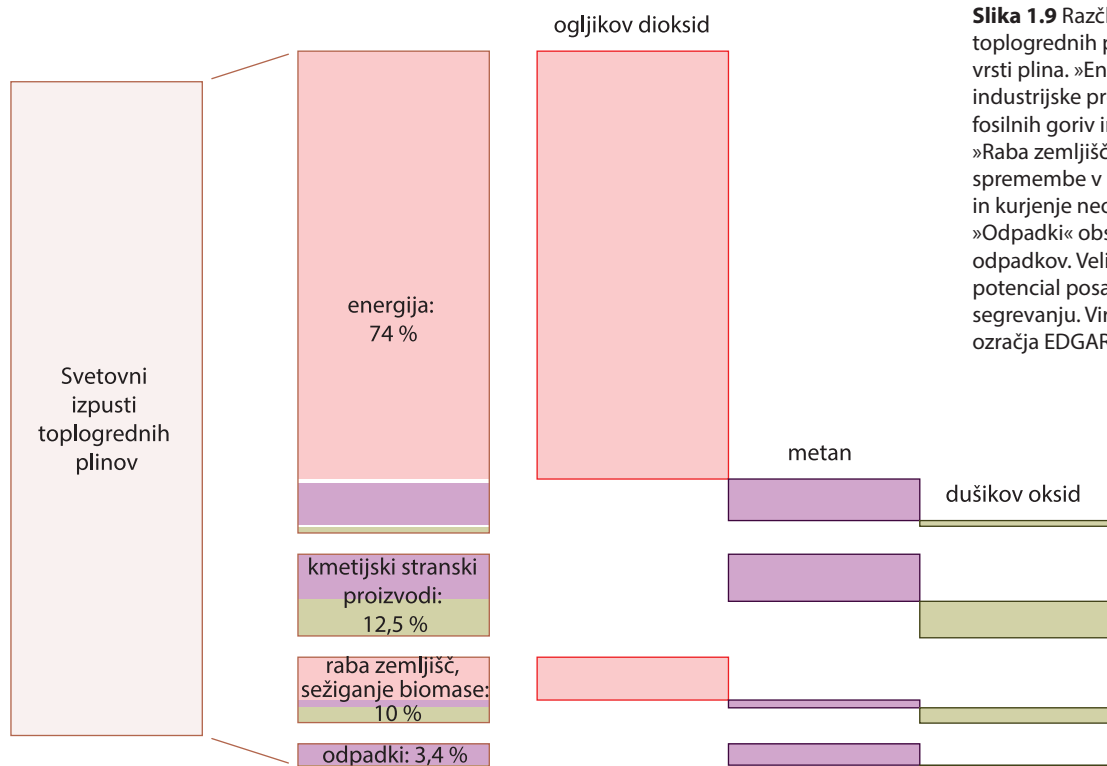
Dobro, dovolj etike. Kaj bi po mnenju znanstvenikov morali storiti, da se izognemo nevarnosti temperaturnega dviga za 2 °C (nad to mejo namreč napovedujejo kup negativnih posledic)? Sklep je očiten. Znebiti se moramo naše fosilne razvade, in to hitro. Nekatere države, tudi Velika Britanija, so se zavezale k vsaj 60-odstotnemu zmanjšanju izpustov toplogrednih plinov do leta 2050, a treba je poudariti, da 60-odstotni rezi, četudi radikalni, po vsej verjetnosti ne bodo prinesli odrešitve. Če bi do leta 2050 svetovne izpuste postopno zmanjšali za 60 %, je bolj verjetno kot ne, da bodo globalne temperature narasle za več kot 2 °C, pravijo klimatologi. Kako veliki so rezi, na katere bi morali ciljati, vidimo na Sliki 1.8. Slika prikazuje dva potencialno varna scenarija izpustov, ki sta ju v

poročilu Inštituta za raziskave javnih politik predstavila Baer in Mastrandrea (2006). Spodnja krivulja predpostavlja, da se od leta 2007 dalje skupni globalni izpusti zmanjšujejo za približno 5 % na leto. Zgornja krivulja pa predpostavlja nekoliko poznejši začetek upada in 4-odstotno zmanjšanje globalnih izpustov na leto. Oba scenarija predvidevata zmerno verjetnost, da se izognemo dvigu temperatur za 2 °C nad predindustrijsko raven. Po spodnjem scenariju je verjetnost, da bo dvig temperatur *presegel* 2 °C, ocenjena na 9–26 %. Po zgornjem scenariju je verjetnost presežka 2 °C ocenjena na 16–43 %. Mimogrede, ti dve potencialno varni krivulji izpustov predvidevata veliko ostrejše reze kot katerikoli od scenarijev, ki sta jih predstavila Medvladni odbor za podnebne spremembe (IPCC) in Sternovo poročilo (2007).

Ti dve potencialno varni poti zahtevata 70- oz. 85-odstotno zmanjšanje globalnih izpustov do leta 2050. Kaj bi to pomenilo za državo, kot je Velika Britanija? Če prikimamo ideji »krčenja in zblíževanja«, po kateri naj bi vse države težile k temu, da bi sčasoma dosegle enake ravni izpustov na prebivalca, potem mora Velika Britanija meriti na več kot 85-odstotno zmanjšanje: s sedanjih 11 ton CO₂e na leto na prebivalca bi morala do leta 2050 priti na približno **1 tona na leto na prebivalca**. To je tako oster rez, da bi bilo najbolje reči *ne fosilnim gorivom*.



Slika 1.8 Globalni izpusti po dveh scenarijih, ki jih predstavita Baer in Mastrandrea, izraženih v tonah CO₂ na leto na prebivalca ob svetovnem prebivalstvu šest milijard. Po obeh scenarijih naj bi obstajala skromna verjetnost, da se izognemo dvigu temperatur za več kot 2 °C nad predindustrijsko raven.



Slika 1.9 Razčlenitev svetovnih izpustov toplogrednih plinov (2000) po vzroku in po vrsti plina. »Energija« vključuje elektrarne, industrijske procese, transport, predelavo fosilnih goriv in rabo energije v stavbah. »Raba zemljišč, sežiganje biomase« pomeni spremembe v rabi zemljišč, krčenje gozdov in kurjenje neobnovljive biomase, kot je šota. »Odpadki« obsegajo odlaganje in obdelavo odpadkov. Velikosti nakazujejo 100-letni potencial posameznega vira pri globalnem segrevanju. Vir: Podatkovna baza za raziskave ozračja EDGAR.

Še zadnje o podnebnem razlogu: čeprav izpuste toplogrednih plinov povzroča vrsta človekovih dejavnosti, je daleč največji povzročitelj **raba energije**. Nekateri neukrepanje v zvezi s svojo rabo energije opravičujejo z izgovori v stilu: »Metan iz kravje prebave segreva ozračje bolj kot reaktivna letala.« Ja, stranski proizvodi v kmetijstvu so leta 2000 prispevali osmino izpustov toplogrednih plinov. Toda raba energije je prispevala tri četrtine (slika 1.9). Podnebni problem je predvsem energijski problem.

Opozorila bralcu

Dovolj o podnebnih spremembah. Predpostavil bom, da imamo dobre razloge, da opustimo fosilna goriva. Kakršenkoli že je vaš razlog, vam s to knjigo želim priskočiti na pomoč pri razumevanju števil in preračunavanju, da boste lažje ocenjevali politične strategije; in zgraditi trdno osnovo dejstev, da boste lahko presodili, *kateri predlogi se izidejo*. Ne trdim, da so izračuni in številke v tej knjigi novi; knjige Goodsteina, Lomborga in Lovelocka, ki sem jih omenil, so na primer polne zanimivih števil in hitrih grobih izračunov, na spletu pa je še polno drugih koristnih virov (glejte opombe na koncu vsakega poglavja).

S to knjigo želim številke predstaviti na preprost in zapomnljiv način; pokazati želim, kako lahko do njih pridete sami; in vam stanje predstaviti tako jasno, da bo razmišljujoč bralec lahko sam prišel do osupljivih zaključkov. Nočem vam servirati svojih zaključkov. Prepričanja so močnejša, če do njih pridemo sami, kot če smo poučeni. Razumevanje je kreativen proces. Upam, da vam bo branje te knjige okrepilo samozavest, da si vse potrebno lahko izračunate sami.

Rad bi poudaril, da so izračuni, ki jih bomo naredili, namenoma nenatančni. Poenostavitev je ključ do razumevanja. Prvič, zaokrožene številke si lažje zapomnimo. Drugič, z zaokroženimi vrednostmi hitreje računamo. Na primer, v tej knjigi ima Velika Britanija 60 milijonov prebivalcev, ves svet pa 6 milijard. Brez težav poiščem natančnejše vrednosti, toda natančnost bi ovirala tok misli. Če preberemo, da so svetovni izpusti toplogrednih plinov leta 2000 dosegli 34 milijard ton ekvivalenta CO₂ na leto, potem lahko brez kalkulatorja v hipu ugotovimo, da je bil povprečen izpust na prebivalca 5 do 6 ton ekvivalenta CO₂ na leto. Ta grobi izračun ni natančen, je pa dovolj točen, da spodbudi zanimive razprave. Če izveste, da se pri povratnem čezoceanskem letu sprostita skoraj dve toni CO₂ na potnika, potem s podatkom o povprečnih izpustih (5-in-nekaj-čez ton na prebivalca na leto) ugotovite, da eno samo takšno potovanje z letalom na leto predstavlja več kot tretjino človekovih povprečnih ogljikovih izpustov.

Svoje izračune rad navežem na vsakdanje izkušnje, ne na prečesavanje neosebnih nacionalnih statistik. Če na primer želim oceniti tipično hitrost vetra v Cambridgeu, se vprašam: »Sem pri kolesarjenju po navadi hitrejši od vetra?« Odgovor je da. Iz tega lahko sklepam, da je hitrost vetra

v Cambridgeu le redko večja od moje običajne hitrosti pri kolesarjenju, ki je 20 km/h. Te vsakdanje ocene podprem z izračuni drugih in uradnimi statistikami. (Najdete jih v opombah ob koncu vsakega poglavja.) Knjiga ni mišljena kot dokončna zakladnica supernatančnih števil. Prej je mišljena kot prikaz, kako uporabljati približne številke za konstruktivne dogovore.

V izračunih za primer večinoma uporabljam Veliko Britanijo, včasih tudi Evropo, Ameriko ali ves svet, gotovo pa boste z lahkoto napravili nove izračune za državo ali regijo, ki vas zanima.

Naj poglavje sklenem s še nekaj opozorili bralcu. Ne bomo samo redno zaokroževali števil, s katerimi računamo; zanemarili bomo tudi vse mogoče podrobnosti, ki jih morajo upoštevati vlagatelji, menedžerji in ekonomisti, uboge pare. Če želite dati na trg obnovljivo tehnologijo, lahko zgolj 5-odstotno povečanje stroškov pomeni razliko med uspehom in polomom, zato je treba pri poslu spremljati vsako najmanjšo podrobnost. Na radarju te knjige pa se 5 % ne vidi. To je knjiga o 2-kratnikih in 10-kratnikih. Govori o fizičnih omejitvah trajnostne energije, ne o trenutni ekonomski izvedljivosti. Ekonomija se ves čas spreminja, temeljne omejitve pa bodo vselej enake. Moramo jih razumeti.

Razprave o energetske politiki pogosto povzročajo zmedo in razvnamajo čustva, ker ljudje mešajo *faktične* izjave in *etične* izjave.

Primeri **faktičnih izjav** so: »Ob sežiganju fosilnih goriv se globalno sprošča 34 milijard ton ekvivalenta ogljikovega dioksida na leto.« In: »Če se koncentracija CO₂ podvoji, bodo povprečne temperature v prihodnjih 100 letih narasle za 1,5–5,8 °C.« In: »Ob povečanju temperatur za 2 °C bi se v 500 letih stalil grenlandski led.« In: »Ob popolni stalitvi grenlandskega ledu bi se gladina morij dvignila za 7 metrov.«

Faktična izjava je bodisi pravilna bodisi napačna; ugotavljanje, *kaj od tega* je, je lahko zahtevno; gre za znanstveno vprašanje. Izjave, ki sem jih pravkar zapisal, so lahko pravilne ali napačne. Toda tega ne vemo. Nekatere ocenjujemo kot »zelo verjetne«. Presoja o tem, katere faktične izjave so pravilne, je težka in sproža debate v znanstvenih krogih. Z znanstvenimi poskusi in razpravami pa lahko sčasoma pridemo do dna pravilnosti ali napačnosti večine faktičnih izjav, vsaj »onkraj razumnega dvoma«.

Primeri **etičnih izjav** so: »Ni prav izkoriščati globalnih virov na način, ki prihodnjim generacijam nalaga visoko ceno.« In: »Onesnaževanje ne bi smelo biti brezplačno.« In: »Sprejeti bi morali ukrepe, s katerimi bi z zelo veliko verjetnostjo zagotovili, da se koncentracija CO₂ ne bo podvojila.« In: »Politiki bi se morali dogovoriti in določiti zgornjo mejo izpustov CO₂.« In: »Države z največjimi izpusti CO₂ v zadnjem stoletju so dolžne prevzeti pobudo za ukrepe proti podnebnim spremembam.« In: »Prav je, da svetovno prebivalstvo uživa enake pravice do izpustov CO₂.« Takšne izjave niso »pravilne ali napačne«. Od naše etične presoje, naših vrednot je odvisno, ali se z njimi strinjamo ali ne. Etične izjave so lahko med sabo nezdružljive. Vlada Tonyja Blairja je na primer razglasila radikalno stališče

o izpustih CO₂: »Velika Britanija bi morala svoje izpuste CO₂ do leta 2050 zmanjšati za 60 %.« Obenem pa je Gordon Brown na položaju finančnega ministra v tej vladi znova in znova pozival države proizvajalke nafte, naj *povečajo* proizvodnjo nafte.

Ta knjiga je izrazito mišljena kot knjiga o dejstvih, ne o etiki. Rad bi, da so dejstva jasna, da lahko ljudje resno razpravljajo o etičnih odločitvah. Rad bi, da vsi razumejo, kako dejstva omejujejo možnosti, ki jih imamo na voljo. Kot vsak dober znanstvenik se bom trudil svoje poglede na etična vprašanja zadržati zase, čeprav bom občasno kaj bleknil – prosim, ne zamerite.

Ali je *pravično*, da si Evropa in Severna Amerika prilastita energijsko potico, je etično vprašanje. Tu sem zato, da vas opomnim na *dejstvo*, da življenje ni samo potica; da vam pomagam iztrebiti nesmiselne in neučinkovite predloge strategij; in da vam pomagam izluščiti energetske politike, ki so združljive z vašimi osebnimi vrednotami.

Potrebujemo načrt, ki se izide!

Opombe in dodatno branje

Ob koncu vsakega poglavja podam podrobnosti o zamislih v tem poglavju in vire podatkov ter citatov in napotim k nadaljnjim informacijam.

stran

- 2 »/.../ to lahko dosežemo zgolj in samo z obnovljivimi viri.« »Vsakdo, ki se za zaposlitev [energijske] vrzeli zanaša na obnovljive vire, živi v popolni pravljici in je, če vprašate mene, sovražnik naroda.« Citata oddaje *Any Questions?*, 27. januar 2006, BBC Radio 4 [ydoobr]. *Michael Meacher* je bil med letoma 1997 in 2003 britanski okoljski minister. *Sir Bernard Ingham* je bil pomočnik Margaret Thatcher v času njenega predsedovanja vladi ter vodja Vladne informacijske službe. Je sekretar zveze *Supporters of Nuclear Energy*.
- *Jonathon Porritt* (marec 2006). *Is nuclear the answer?* 3. odstavek. Nasvet ministrom. www.sd-commission.org.uk
- 3 »Jedrska energija je vreča brez dna.« »Imamo ogromno valovanja in vetra.« Ann Leslie, novinarka. Oddaja *Any Questions?*, Radio 4, 10. februar 2006.
- »*Prebivalci Los Angelesa /.../ od Zemlje do Marsa.*« The Earthworks Group, 1989, str. 34.
- *targetneutral.com* za »nevtralizacijo« tone CO₂ zaračuna samo 4 funte. (To je bistveno nižja cena kot pri katerem koli drugem podjetju za »izravnave«, ki sem ga srečal.) Ob tej ceni bi lahko tipični Britanec svojih letnih 11 ton »nevtraliziral« za pičlih 44 funtov na leto! Dokaz, da se BP-jeva »nevtralizacijska« shema ne izide, je v dejstvu, da projekti ne dosegajo »zlatega standarda« www.cdmgoldstandard.org (Michael Schlup, osebna komunikacija). Mnoge projekte, ki ponujajo »nadomestilo za ogljik«, je razkrinkala Fiona Harvey v časniku *Financial Times* [2jhve6].
- 4 Ljudje, ki zagovarjajo prednosti obnovljivih virov pred jedrsko energijo, denimo pravijo: »Z vetrnimi zmogljivostmi na morju bi lahko napajali vsa britanska gospodinjstva.« Ob koncu leta 2007 je britanska vlada napovedala, da bo dovolila gradnjo toliko vetrnih turbin na morju, »da bodo lahko napajale vsa britanska gospodinjstva«. Aktivist za obnovljivo energijo pri skupini *Friends of the Earth*, Nick Rau, je povedal, da pozdravljajo vladno napoved. »Potencialna količina električne energije, ki jo ta industrija lahko proizvede, je ogromna,« je dejal. [25e59w] Iz *Guardiana* [5o7mxk]: John Sauven, izvršni direktor *Greenpeacea*, je dejal, da načrti predstavljajo »vetrno revolucijo«. »In laburisti morajo pozabiti svojo obsedenost z jedrsko energijo, ki izpuste lahko zmanjša za vsega 4 % nekoč v daljni prihodnosti.« Nick Rau je povedal: »Veseli nas, da se je vlada resno začela ukvarjati s potencialom vetrne energije na morju, s katero lahko

Britanija do leta 2020 proizvede 25 % električne energije.« Nekaj tednov pozneje je vlada naznanila, da bo dovolila gradnjo novih jedrskih elektrarn. »Današnja odločitev o zeleni luči za novo generacijo jedrskih elektrarn /.../ ne bo v veliko pomoč pri boju proti podnebnim spremembam,« so opozorili pri Friends of the Earth [5c4o1c].

V resnici bi obe predlagani povečanja – tako vetrne energije na morju kot jedrske energije – zagotovili enako letno količino električne energije. Skupne dovoljene vetrne zmogljivosti na morju v višini 33 GW bi v povprečju zagotovile 10 GW, kar pomeni 4 kWh na dan na prebivalca; nove jedrske zmogljivosti, ki bi nadomestile vse opuščene jedrske elektrarne, pa bi zagotovile 10 GW, kar pomeni 4 kWh na dan na prebivalca. A protijedrski aktivisti v isti sapi trdijo, da jedrska opcija »ne bo v veliko pomoč«, z vetrno opcijo pa bi »napajali vsa britanska gospodinjstva«. Dejstvo je, da sta »napajanje vseh britanskih gospodinjstev« in »zmanjšanje izpustov za vsega 4 %« ena in ista reč.

- 4 »*avtomobil na vodni pogon*« *New Scientist*, 29. julij 2006, str. 35. Članek z naslovom »Avtomobil na vodni pogon bi lahko na trg prišel do leta 2009« se je začel takole:

»Pozabite avtomobile, ki jih napajata alkohol ali rastlinsko olje. Morda boste že kmalu lahko vozili avtomobil, ki v rezervoarju za gorivo ne bo imel nič drugega kot vodo. To bi bilo dokončno vozilo brez izpustov.

»Čeprav voda na prvi pogled ni tipičen vir električne energije, ima ključno odliko: je bogat vir vodika, ki ga mnogi kujejo v zvezde kot zeleno gorivo prihodnosti.«

Izdelek, ki so ga opisovali v *New Scientistu*, sploh ni bil nič trapastega – šlo je za avto, ki kot gorivo uporablja bor, pri čemer je ena od prvih kemičnih faz reakcija bor/voda. Zakaj so pri *New Scientistu* začutili potrebo, da to spremenijo v zgodbico, ki napeljuje na misel, da je to gorivo voda? Voda ni gorivo. Nikoli ni bila in nikoli ne bo. Izgorevanje se je že zgodilo! Prvi zakon termodinamike pravi, da energije ne moreš dobiti iz nič; lahko jo samo pretvoriš iz ene oblike v drugo. V vsakem motorju energija mora od nekod priti. Še bolj absurdno zgodbo so prodajali pri Fox News [2fztd3].

- *Podnebne spremembe svetu predstavljajo veliko hujšo grožnjo kot terorizem*. Sir David King, glavni znanstveni svetovalec britanske vlade, januar 2004. [26e8z]
- *poveličevanje potovanj* – aluzija na kaznivo dejanje »poveličevanja«, kot ga definira britanski Zakon o terorizmu, ki je v veljavi od 13. aprila 2006. [ykhayj]

- 5 *Slika 1.2*. Slika prikazuje proizvodnjo surove nafte, vključno s kondenzati vezanega ali nevezanega plina, kondenzati zemeljskega plina in z drugimi tekočinami, ter zaslužek od rafinerijske predelave. Viri: EIA in BP-jev statistični pregled svetovne energije.

- 6 *Prvi uporabni parni stroj izvira iz leta 1698*. V resnici je parni stroj opisoval že Heron iz Aleksandrije, a glede na to, da se Heronov stroj v naslednjih 1600 letih ni prijel, imam Saveryjev izum iz leta 1698 za prvi uporabni parni stroj.

- *Sliki 1.4 in 1.7: Graf koncentracije ogljikovega dioksida*. Podatki iz virov Keelin in Whorf (2005) (meritve iz obdobja 1958–2004); Neftel in sod. (1994) (1734–1983); Etheridge in sod. (1998) (1000–1978); Siegenthaler in sod. (2005) (950–1888); in Indermuhle in sod. (1999) (od 11 000 do 450 let pred sedanostjo). Mimogrede, tega grafa nikar ne zamenjajte z »grafom hokejske palice«, ki prikazuje zgodovino globalnih temperatur. Pozorni bralci bodo opazili, da podnebni argument, ki sem ga predstavil, nikjer ne omenja zgodovinskih temperatur.

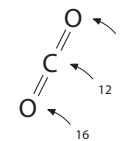
Slike 1.5–1.7: Podatki o proizvodnji premoga iz virov Jevons (1866), Malanima (2006), Netherlands Environmental Assessment Agency (2006), National Bureau of Economic Research (2001), Hatcher (1993), Flinn and Stoker (1984), Church in sod. (1986), Supple (1987), Ashworth in Pegg (1986). Jevons je bil prvi avtor »naftnega vrhunca«. Leta 1865 je ocenil lahko dostopne britanske zaloge premoga, pogledal zgodovino eksponentne rasti porabe ter napovedal konec eksponentne rasti in konec britanske prevlade v svetovni industriji. »Sedanje stopnje povečevanja porabe ne moremo dolgo ohranяти. /.../ ovira našega napredka se mora pokazati v roku stotih let od tega trenutka. /.../ Zaključek je neizogiben, da ima namreč naš sedanji srečni in napredujoči položaj omejen rok trajanja.« Jevons je imel prav. V roku stotih let je britanska proizvodnja premoga zares doživela vrhunec in zgodili sta se dve svetovni vojni.

- 8 *Dominic Lawson, kolumnist Independenta*. Moj citat je prirejen po kolumni Dominica Lawsons iz *Independenta* 8. junija 2007.

Ne gre za dobeseden citat: njegov zapis sem okrajšal, a pri tem pazil, da ne popravim katere od njegovih napak. *Vse tri številke so napačne*. Poglejmo, kako je zamočil. Najprej govori o »ogljikovem dioksidu«, navede pa številko za ogljik:

pri sežiganju fosilnih goriv se v atmosfero sprosti 26 gigaton CO_2 na leto (ne 7 gigaton). Pogosta napaka. Potem trdi, da se iz oceanov v atmosfero sprosti 36.000 gigaton ogljika na leto. To je veliko hujša napaka: 36.000 gigaton je skupna količina ogljika v oceanih! Letni pretok je veliko manjši – glede na standardne diagrame ogljikovega kroga [16y5g] približno 90 gigaton ogljika na leto (330 Gt CO_2 /leto). (Mislim, da je teh 90 Gt C/leto ocenjena stopnja pretoka, če bi koncentracija CO_2 v atmosferi nenadoma padla na nič.) Podobno je napačnih tudi njegovih »1900 gigaton«, ki naj bi se v atmosfero sprostile iz biosfere. Po podatkih iz standardnih diagramov je pravilna številka okoli 120 gigaton ogljika na leto (440 Gt CO_2 /leto).

Mimogrede, zabeleženo povečanje koncentracije CO_2 se lepo ujema s tem, kar bi lahko pričakovali, če predpostavimo, da večina človekovih izpustov ogljika ostane v atmosferi. Od leta 1715 do 2004 se je z uporabo fosilnih goriv in proizvodnjo cementa v atmosfero sprostito približno 1160 Gt CO_2 (Marland in sod. 2007). Če bi v atmosferi ostal ves ta CO_2 , bi se koncentracija povečala za 160 ppm (z 280 na 440 ppm). Dejansko povečanje je bilo približno 100 ppm (z 275 na 377 ppm). V atmosferi je torej do zdaj ostalo okoli 60 % izpustov.



Slika 1.10 Masi atoma ogljika in molekule CO_2 sta v razmerju 12 proti 44, saj atom ogljika tehta 12 enot, atoma kisika pa vsak po 16 enot: $12 + 16 + 16 = 44$.

- 10 *Ogljikov dioksid prispeva h globalnemu segrevanju ozračja.* Pretirano čustvena razprava o tej temi postaja precej napor-na, ni res? »Znanost je zdaj nesporno enotna.« »Ne, ni!« »Ja, pa je!« Najbolj koristno, kar lahko tu naredim, je, da vse, ki si zaželiyo stran od tega vpitja, usmerim h kratkemu poročilu, ki so ga napisali Charney in sod. (1979). Zaključki tega poročila so relevantni, naročila ga je namreč Nacionalna akademija znanosti (ameriška različica britanske Kraljeve družbe) ter avtorje izbrala na podlagi njihove strokovnosti »in z ozirom na ustrezno uravnoteženost«. Raziskovalna skupina se je zbrala »pod okriljem Odbora za podnebne raziskave pri Nacionalnem raziskovalnem svetu, da bi ocenila znanstveno osnovo za projekcijo možnih prihodnjih podnebnih sprememb, ki bi bile posledica s človekovo dejavnostjo povzročenega sproščanja ogljikovega dioksida v atmosfero«. Njihova konkretna naloga je bila »prepoznati osnovne predpostavke, na katerih temelji trenutno razumevanje tega vprašanja, kvantitativno oceniti ustreznost in nezanesljivost našega znanja o teh dejavnikih in procesih ter v korist oblikovalcev politik jedrnato in objektivno povzeti naše najboljše možno trenutno razumevanje vprašanja ogljikovega dioksida/podnebnja«.

Poročilo ima samo 33 strani, je prosto dostopno na spletu [5qf kaw] in ga priporočam v branje. Z njim postane jasno, kaj od znanosti je bilo nesporno že leta 1979 in o čem je še vladala negotovost.

V tem poročilu sem našel naslednje glavne poudarke. Prvič, podvojitev koncentracije CO_2 v atmosferi bi neto segrevanje troposfere, oceanov in Zemlje v povprečju spremenila za približno 4 W/m^2 , če bi vse druge lastnosti atmosfere ostale nespremenjene. Ta učinek segrevanja ozračja lahko primerjamo s povprečno energijo, ki jo absorbirajo atmosfera, zemlja in oceani in ki znaša 238 W/m^2 . Podvojitev koncentracije CO_2 bi torej imela učinek segrevanja ozračja, ki bi bil enak povečanju intenzitete sonca za $4/238 = 1,7 \%$. Drugič, posledice tega segrevanja, ki bi ga povzročil CO_2 , je zaradi kompleksnosti sistema atmosfera/oceani težko napovedati, a avtorji so napovedali globalno segrevanje površja v višini od 2°C do $3,5^\circ\text{C}$, pri čemer bi bilo zvišanje večje na večjih nadmorskih višinah. In za konec avtorji povzamejo: »Poskusili smo, a brez uspeha, najti kakršne koli spregledane ali podcenjene fizikalne učinke, ki bi lahko trenutno ocenjeno globalno segretje kot posledico podvojitve CO_2 v atmosferi zmanjšali na zanemarljiv obseg ali ga v celoti preobrnili.« Opozarjajo, da je po zaslugi oceanov, »velikih okornih vztrajnikov globalnega podnebnega sistema«, povsem mogoče, da bo do segrevanja prišlo dovolj počasi, da ga bo v naslednjih desetletjih težko zaznati. Kljub vsemu pa »bo do segrevanja slej ko prej prišlo in z njim povezane regionalne podnebne spremembe /.../ bi utegnile biti korenite«.

Predgovor predsednika Odbora za podnebne raziskave, Vernerja E. Suomija, zaključke povzema z znamenitim kopičenjem dvojnega zanikanja. »Če bo ogljikov dioksid še naprej naraščal, raziskovalna skupina nima razloga za dvom, da bo to privedlo do podnebnih sprememb, niti razloga za prepričanje, da bodo te spremembe zanemarljive.«

- 10 *Litanije verjetnih drastičnih posledic podnebnih sprememb – verjamem, da ste jih že slišali.* Če jih niste, glejte [2z2xg7].

- 12 *Razčlenitev svetovnih izpustov toplogrednih plinov po regijah in državah.* Vir podatkov: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT), različica 4.0 (Washington, DC: World Resources Institute, 2007). Prve tri številke predstavljajo nacionalne skupne vrednosti za vseh šest najpomembnejših toplogrednih plinov (CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC, SF₆) brez spremembe rabe zemljišč in gozdarstva. Slika na str. 14 prikazuje samo kumulativne izpuste CO₂.
- 14 *Čestitke, Velika Britanija! /.../ na seznamu zgodovinskih onesnaževalcev na prebivalca pa nas prekosijo samo ZDA.* Na tem mestu se najgloblje opravičujem Luksemburgu, katerega zgodovinski izpusti na prebivalca so v resnici večji kot v Ameriki in Veliki Britaniji; zdelo se mi je, da stopničke za zmagovalce pač morajo pripasti državam tako z visokimi izpusti na prebivalca kot z visokimi skupnimi izpusti. Po skupni vrednosti si največji zgodovinski onesnaževalci sledijo takole: ZDA (322 Gt CO₂), Ruska federacija (90 Gt CO₂), Kitajska (89 Gt CO₂), Nemčija (78 Gt CO₂), Velika Britanija (62 Gt CO₂), Japonska (43 Gt CO₂), Francija (30 Gt CO₂), Indija (25 Gt CO₂) in Kanada (24 Gt CO₂). Vrstni red po vrednosti na prebivalca je naslednji: Luksemburg, ZDA, Velika Britanija, Češka, Belgija, Nemčija, Estonija, Katar in Kanada.
- *Nekatere države, tudi Velika Britanija, so se zavezale k vsaj 60-odstotnemu zmanjšanju izpustov toplogrednih plinov do leta 2050.* Ko to pišem, se britanske zaveze pravzaprav povečujejo na 80 % glede na ravni leta 1990.
- 15 *Slika 1.8.* Po spodnjem scenariju je verjetnost, da bo dvig temperatur presešel 2 °C, ocenjena na 9–26 %; kumulativni ogljikovi izpusti od leta 2007 dalje znašajo 309 Gt C; koncentracija CO₂ doseže vrh pri 410 ppm, koncentracija CO₂ pri 421 ppm, leta 2100 pa koncentracija CO₂ pade spet na 355 ppm. Po zgornjem scenariju je verjetnost presežka 2 °C ocenjena na 16–43 %; kumulativni ogljikovi izpusti od leta 2007 dalje znašajo 415 Gt C; koncentracija CO₂ doseže vrh pri 425 ppm, koncentracija CO₂ pri 435 ppm, leta 2100 pa koncentracija CO₂ pade spet na 380 ppm. Glejte tudi hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2007-2008/.
- 16 *Na spletu pa je še polno drugih koristnih virov.* Med drugim priporočam: BP-jev *Statistical Review of World Energy* [yyxq2m], Komisijo za trajnostni razvoj www.sd-commission.org.uk, Dansko združenje za vetrno energijo www.windpower.org, organizacijo Environmentalists For Nuclear Energy www.ecolo.org, Oddelek za vetrno energijo Univerze Risø www.risoe.dk/vea, ministrstvo DEFRA www.defra.gov.uk/environment/statistics, predvsem pa knjigo *Avoiding Dangerous Climate Change* [dzcq], Inštitut Pembina www.pembina.org/publications.asp in ministrstvo DTI (zdaj BERR) www.dti.gov.uk/publications/.
- 17 *Faktične izjave in etične izjave /.../* Etične izjave poznamo tudi kot »normativne trditve« ali »vrednostne sodbe«, faktične izjave pa kot »pozitivne trditve«. Etične izjave navadno vsebujejo glagolske oblike, kot so »bi bilo treba« in »morati«, ali pridevnike, kot so »pravičen«, »pravilen« in »napačen«. Za koristne nadaljnje razprave glejte Dessler in Parsons (2006).
- 18 *Gordon Brown.* 10. septembra 2005 je Gordon Brown dejal, da visoka cena goriva predstavlja znatno tveganje za evropsko gospodarstvo in globalno rast, ter OPEC pozval, naj poveča proizvodnjo nafte. Pol leta pozneje je spet dejal: »Potrebujemo /.../ večjo proizvodnjo, več črpanja, več investicij, več vlaganja v petrokemično industrijo.« (22. april 2006) [y98ys5]. Naj to kritiko Gordona Browna ublažim s pohvalo ene njegovih novejših pobud, in sicer spodbujanje rabe električnih vozil in hibridov z možnostjo zunanega električnega polnjenja. Eden od zaključkov te knjige, kot boste videli pozneje, je, da je elektrifikacija večine transporta med dobrimi vidiki načrta za opustitev fosilnih goriv.

2 Bilanca

Narave ni mogoče preslepiti.

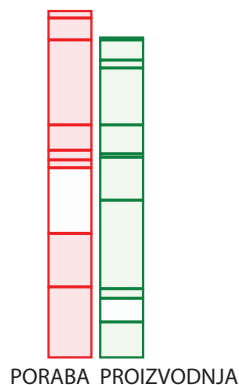
Richard Feynman

Pogovorimo se o porabi energije in proizvodnji energije. Zdaj večino energije, ki jo porabi razviti svet, proizvedemo iz fosilnih goriv, kar ni trajnostno. Kako dolgo še lahko živimo na račun fosilnih goriv, je zanimivo vprašanje, ni pa to vprašanje, ki ga bomo obravnavali v tej knjigi. Razmišljati hočem o *življenju brez fosilnih goriv*.

Naredili bomo dva stolpca. V levi, rdeči stolpec bomo nalagali našo porabo energije, v desni, zeleni stolpec pa bomo nalagali proizvodnjo trajnostne energije. Stolpca bomo gradili postopno in dodali vsako posamezno točko, o kateri bomo govorili.

V tej knjigi se ukvarjamo z naslednjim vprašanjem: Je *realno* mogoče živeti trajnostno? Zato bomo sešteli vse *realne* vire trajnostne energije in jih zložili v desni, zeleni stolpec.

V levem, rdečem stolpcu bomo izdelali oceno porabe »tipičnega zmer-no premožnega človeka«. Poskusite še vi vreči skupaj oceno *vaše* porabe in si tako izdelajte levi stolpec po lastni meri. Pozneje bomo videli tudi, kakšna je *povprečna* poraba energije pri Evropejcih in Američanih.



Med glavnimi oblikami porabe v levem stolpcu bodo:

- transport
 - avtomobili, letala, tovorni promet,
- ogrevanje in hlajenje,
- razsvetljava,
- informacijski sistemi in druga elektronika,
- hrana,
- proizvodna dejavnost.

Glavne kategorije v desnem stolpcu trajnostne proizvodnje bodo:

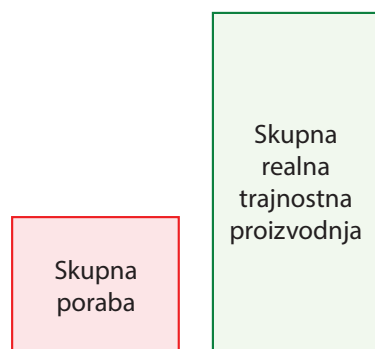
- vetrna energija,
- sončna energija
 - fotonapetostna energija, toplota, biomasa,
- hidroenergija,
- valovanje,
- plimovanje,
- geotermalna energija,
- jedrska? (z vprašanjem, ker ni jasno, ali elektrika iz jedrske energije šteje kot »trajnostna«).

Ko ocenjujemo porabo energije za ogrevanje, transport, proizvodno dejavnost in tako naprej, pri tem nočemo preprosto preračunati številke za levi stolpec bilance, temveč hočemo tudi razumeti, od česa je vsaka številka odvisna in kako občutljiva je na prilagoditve.

V desnem, zelenem stolpcu bomo seštevali ocene o trajnostni proizvodnji za Veliko Britanijo. Tako bomo lahko odgovorili na vprašanje, ali lahko Velika Britanija realno pokrije svojo porabo samo z lastnimi obnovljivimi viri.

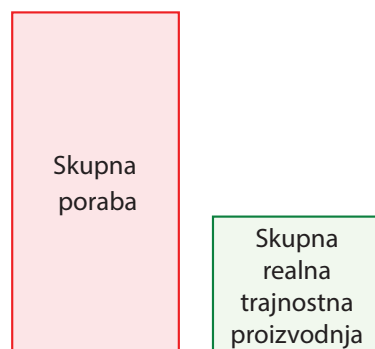
Ali je uporaba trajnostnih virov energije, ki jih bomo dodajali v desni stolpec, *ekonomsko* izvedljiva, je pomembno vprašanje, a za zdaj ga pustimo ob strani in najprej seštejmo vse postavke. Ljudje včasih preveč pozornosti namenijo ekonomski izvedljivosti in zato ne vidijo stvari širše. Razpravljajo na primer o tem, ali »je vetrna energija cenejša od jedrske«, ne vprašajo pa, »koliko vetrne energije je na voljo« ali »koliko urana še imamo«.

Ko vse seštejemo, bi lahko rezultat bil takšen:



Če ugotovimo, da je poraba veliko manjša od realne trajnostne proizvodnje, potem lahko rečemo: V redu, *mogoče* lahko živimo trajnostno; pogledjmo ekonomsko, družbeno in okoljsko ceno trajnostnih alternativ in raziščimo, katera od njih zasluži največ raziskav in razvoja; če se izkažemo, *morda* ne bo prišlo do energijske krize.

Rezultat seštevanja pa bi bil lahko tudi takšen:



To je videti veliko bolj turobno. Slika govori: Ne glede na to, kakšna je ekonomika trajnostne energije, te preprosto *ni* dovolj, da bi podpirala naš sedanji življenjski slog; obeta se velikanska sprememba.

Energija in moč

Večina razprav o porabi in proizvodnji energije nas zmede zaradi poplave enot, v katerih se merita energija in moč, od »ton naftnega ekvivalenta« do »teravatnih ur« (TWh) in »eksajoulov« (EJ). Nihče razen poznavalcev nima občutka, kaj »sodček nafte« ali »milion BTU« pomenita z vidika posameznika. V tej knjigi bomo vse izrazili z enotnim naborom enot, ki so nam blizu in jih lahko vsi razumejo.

Za **enoto energije** sem izbral kilovatno uro (kWh). Ta količina je »ena enota« na računu za elektriko in v Veliki Britaniji je leta 2008 domačega porabnika stala približno 10 penijev (v Sloveniji 10 do 20 centov, op. ur.). Kot bomo videli, je večina individualnih dnevnih odločitev povezanih s količino energije v višini nekaj kilovatnih ur.

Ko govorimo o **moči** (kako hitro porabljam ali proizvajamo energijo), bo glavna enota kilovatna ura na dan (kWh/d). Kot bom pojasnil pozneje, bomo občasno uporabili tudi vat ($40 \text{ W} \simeq 1 \text{ kWh/d}$) in kilovat ($1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} = 24 \text{ kWh/d}$). Kilovatna ura na dan je lepa, človeku prilagojena enota: večina osebnega energijsko požrešnega početja energijo žre s hitrostjo nekaj kilovatnih ur na dan. Na primer: 40-vatna žarnica, ki ves čas gori, rabi **eno** kilovatno uro na dan. Nekatera energetska podjetja v svoje račune za elektriko vključijo grafe, ki prikazujejo porabo energije v kilovatnih urah na dan. To enoto bom uporabil za vse oblike moči, ne samo za elektriko. Raba bencina, raba plina, raba premoga: vse to bom meril v kilovatnih urah dnevno. Da bo povsem jasno: nekateri pod »moč« razumejo samo rabo *električne* energije. Ta knjiga pa se ukvarja z *vsemi* oblikami porabe in proizvodnje energije, zato bom besedo »moč« uporabljal za vsako od njih.

Ena kilovatna ura dnevno je približno tolikšna moč, kot bi jo dobili z enim živim služabnikom. Število kilovatnih ur na dan, ki jih porabite, tako učinkovito predstavlja število služabnikov, ki delajo za vas.

Ljudje pojma energije in moči v vsakodnevni rabi zamenjujejo, v tej knjigi pa se moramo strogo držati njunih znanstvenih definicij. *Moč nam pove, koliko energije porabimo ali proizvedemo v določenem času.*

Morda bi **energijo** in **moč** lahko učinkovito pojasnili z analogijo z **vodo** in **pretokom vode** iz pipe. Če hočete popiti nekaj vode, hočete določeno **prostornino** vode – morda **en liter** (če ste žejni). Ko odprete pipo, ustvarite **pretok** vode – recimo **en liter na minuto**, če iz pipe samo curlja; ali 10 litrov na minuto iz bolj radodarne pipe. Isto **prostornino** (en liter) lahko dobite bodisi iz pipe, ki curlja eno minuto, ali iz radodarne pipe, ki jo pustite odprto desetino minute. **Prostornina**, ki jo dobimo v določenem času, je enaka **volumskemu pretoku**, pomnoženem s **časom**:

$$\text{prostornina} = \text{volumski pretok} \times \text{čas}.$$



Slika 2.1 Razlikovanje med energijo in močjo. Vse te 60-vatne žarnice imajo *moč* 60 W; nimajo 60-vatne »energije«. Prižgana žarnica rabi 60 W električne *moči*, ki jo oddaja v obliki svetlobe in toplote (večinoma slednje).

prostornino
merimo v
litrih

energijo
merimo v
kWh

pretok
merimo v
litrih na minuto

moč
merimo v
kWh na dan

Volumski pretok je določen s *prostornino*, ki se natoči v izmerjenem času. Če poznate prostornino, dovedeno v določenem času, volumski pretok dobite tako, da prostornino delite s časom:

$$\text{volumski pretok} = \frac{\text{prostornina}}{\text{čas}}$$

Povezava z energijo in močjo je naslednja. *Energija* je kot *prostornina* vode, *moč* je kot *volumski pretok* vode. Ko na primer vklopite opekač, začne rabiti *moč* enega kilovata. En kilovat rabi vse dotlej, dokler ga ne izklopite. Z drugimi besedami, opekač (če ga trajno pustite vklopljenega) porabi eno kilovatno uro (kWh) energije na uro oz. 24 kilovatih ur na dan.

Dlje kot je opekač vklopljen, več *energije* porabi. Energijo, porabljeno za izbrano aktivnost, lahko izračunate tako, da moč pomnožite s trajanjem:

$$\text{energija} = \text{moč} \times \text{čas}.$$

Joule je standardna mednarodna enota za energijo, vendar je žal premajhna, da bi bila praktično uporabna. Kilovatna ura ustreza 3,6 milijona joulom (3,6 megajoula).

Moč je tako uporabna in pomembna, da ima nekaj, česar pretok vode nima: svoje lastne posebne enote. Ko govorimo o volumskem pretoku, ga merimo denimo v »litrih na minuto«, »galonah na uro« ali »kubičnih metrih na sekundo«; te enote same povedo, da volumski pretok pomeni »prostornino v enoti časa«. Moči *enega joula na sekundo* pravimo *vat*. 1000 joulom na sekundo pravimo kilovat. Da bo terminologija povsem jasna: opekač za delovanje potrebuje en kilovat. Ne potrebuje »enega kilovata na sekundo«. »Na sekundo« je že všteto v definicijo kilovata: en kilovat pomeni »en kilojoule na sekundo«. Podobno bi rekli: »Jedrsko elektrarna proizvaja en gigavat.« Mimogrede, en gigavat je milijarda vatov, milijon kilovатов ali 1000 megavатов. En gigavat je torej milijon opekačev. In ko se že grem učitelja, *g* in *v* v besedi *gigavat* z veliko pišemo samo v okrajšani obliki *GW*.

Prosim vas, nikoli in nikdar ne recite »en kilovat na sekundo«, »en kilovat na uro« ali »en kilovat na dan«; nič od tega ni veljavna mera moči. Potreba ljudi, da rečejo »na nekaj«, kadar govorijo o svojih opekačih, je eden od razlogov, zakaj sem za enoto moči izbral »kilovatno uro na dan«. Žal mi je, da je v govoru in pisavi malenkost bolj nerodna.

In še zadnje, kar bi rad razjasnil: če rečem, da je »nekdo porabil gigavatno uro energije«, vam sporočam samo, *koliko* energije je porabil, ne pa tudi, *kako hitro*. Gigavatna ura *ne* pomeni, da je bila energija porabljena *v eni uri*. Gigavatno uro energije lahko porabite tako, da milijon opekačev vklopite za eno uro ali 1000 opekačev za 1000 ur.

Kot sem dejal, bom moč navajal večinoma v kWh/d *na prebivalca*. Te človeku prilagojene enote so mi med drugim všeč zato, ker z njimi

energijo
merimo v
kWh
ali
MJ

moč
merimo v
kWh na dan
ali
kW
ali
W (vatih)
ali
MW (megavatih)
ali
GW (gigavatih)
ali
TW (teravatih)

v debatah veliko lažje preklapljammo med Veliko Britanijo in drugimi državami ali regijami. Zamislite si, da govorimo o sežiganju odpadkov in izvemo, da Velika Britanija na ta način proizvaja 7 TWh na leto, Danska pa 10 TWh na leto. Bi na osnovi tega podatka znali povedati, ali Danska sežge »več« odpadkov od Velike Britanije? Čeprav je podatek o skupni moči, ki jo iz odpadkov pridobiva posamezna država, zanimiv, najbrž običajno hočemo podatek o sežiganju odpadkov *na prebivalca*. (In ta je: Danska 5 kWh/d na preb.; VB 0,3 kWh/d na preb. Danci torej sežgejo približno 13-krat toliko odpadkov kot Britanci.) Da prihranim nekaj črnila, bom občasno »na prebivalca« okrajšal z »/preb.«. Če bomo že od začetka vse navedli »na prebivalca«, bomo dobili bolj univerzalno knjigo, ki bo – upam – za razprave o trajnostni energiji uporabna po vsem svetu.

1 TWh (ena teravatna ura) je enako kot milijarda kWh.

Dlakocepljenje

Se energija mar ne ohranja? Govorimo o »porabi« energije, ampak ali eden od zakonov narave ne govori o tem, da energije ni mogoče ustvariti ali uničiti?

Res je, nisem natančen. Pravzaprav je to knjiga o *entropiji*, kar pa je malo bolj komplicirano pojasniti. Ko »porabimo« en kilojoule energije, v resnici vzamemo en kilojoule energije v obliki z *nizko entropijo* (na primer elektrike) in jo *pretvorimo* v natančno enako količino energije v drugi obliki, običajno takšni z veliko višjo entropijo (na primer topel zrak ali toplo vodo). Ko energijo »porabimo«, je še vedno tam, toda običajno je ne moremo »porabljeni« v nedogled, saj je za nas »uporabna« samo energija z *nizko entropijo*. Včasih te različne vrednosti energije razlikujemo z dodajanjem oznake k enoti: 1 kWh(e) je ena kilovatna ura električne energije, ki ima najvišjo vrednost. 1 kWh(th) je ena kilovatna ura toplote, na primer energije v desetih litrih vrele vode. Energija, ki je shranjena v snoveh z višjo temperaturo, je uporabnejša (ima nižjo entropijo) od energije v snovi z nižjo temperaturo. Še naslednji razred je kemična energija, ki ima visoko vrednost, tako kot elektrika.

Govorjenje o energiji namesto o entropiji je priročna, a površna bližnjica, a v knjigi bomo večinoma počeli prav to. Občasno pa se bomo morali poglobiti tudi v entropijo, na primer, ko bo govor o hlajenju, elektrarnah, toplotnih črpalkah ali geotermalni energiji.

Ali ne mešate jabolk in hrušk? Je dovoljeno primerjati različne oblike energije, kot sta kemična energija, ki se v obliki bencina uporablja v avtomobilu, in električna energija, ki jo proizvede vetrna turbina?

S primerjavami porabljene energije in realno proizvedene energije ne želimo vzbujati vtisa, da so vse oblike energije enakovredne in zamenljive. Električna energija, ki jo proizvede vetrna turbina, bencinskemu motorju

nič ne koristi; bencin pa nič ne koristi pri napajanju televizorja. V osnovi je energijo mogoče pretvarjati iz ene oblike v drugo, čeprav pri pretvorbi pride tudi do izgub. Elektrarne na fosilna goriva na primer goltajo *kemično energijo* in proizvajajo *električno energijo* (s približno 40-odstotnim izkoristkom). Tovarne aluminija pa goltajo *električno energijo* in ustvarjajo proizvod z visoko *kemično energijo* – aluminij (s približno 30-odstotnim izkoristkom).

V nekaterih povzetkih proizvodnje in porabe energije so vse oblike energije preračunane na isto enoto, so pa uvedeni količniki, ki določajo, da je vrednost elektrike iz hidroenergije na primer 2,5-krat večja od vrednosti kemične energije nafte. To napihovanje efektivne energijske vrednosti elektrike bi lahko upravičili, rekoč: »1 kWh elektrike pač ustreza 2,5 kWh nafte; če namreč toliko nafte damo v standardno elektrarno, bo ta proizvedla 40 % od 2,5 kWh, kar je 1 kWh elektrike.« Toda v tej knjigi bom za primerjave različnih oblik energije večinoma uporabljal pretvorbeni količnik 1. Ni res, da 2,5 kWh nafte vedno in povsod pomeni 1 kWh elektrike, takšna pretvorba zgolj po naključju velja v svetu, kjer za proizvodnjo elektrike uporabljamo nafto. Ja, pretvorba kemične energije v električno poteka po točno tem neučinkovitem menjalnem tečaju. Toda električno energijo lahko pretvorimo tudi v kemično energijo. V alternativnem svetu (ki morda ni tako oddaljen) z relativno obilnimi količinami elektrike in majhno količino nafte bomo morda s pomočjo elektrike proizvajali tekoča goriva. V takšnem svetu prav zagotovo ne bi uporabili enakega menjalnega količnika – vsaka kWh bencina bi v tem primeru stala kakšne 3 kWh elektrike! Po mojem mnenju je časovno neomejen in znanstven način povzemanja in primerjave oblik energije takšen, po katerem je 1 kWh kemične energije enakovredna 1 kWh elektrike. Moja odločitev za pretvorbo ena na ena pomeni, da bodo nekateri moji izračuni nekoliko drugačni od izračunov drugih. (Primer: BP v svojem *Statističnem pregledu svetovne energije* 1 kWh elektrike enači s $100/38 = 2,6$ kWh nafte; po drugi strani pa britanski vladni *Izvleček britanske energijske statistike* uporablja enako pretvorbo ena na ena kot jaz.) In še enkrat poudarjam, s to odločitvijo nočem vzbujati vtisa, da je mogoče katero koli obliko energije neposredno pretvoriti v drugo. Ob pretvorbi kemične energije v električno energijo se vedno troši energija, kot se tudi ob pretvorbi električne energije v kemično.

Fizika in enačbe

Čez in čez po knjigi ne želim priti samo do števil o trenutni porabi energije in realni trajnostni proizvodnji, pač pa tudi jasno pokazati, *od česa so te številke odvisne*. Razumeti, od česa so te številke odvisne, je ključnega pomena, če hočemo izbrati razumne strategije, s katerimi bomo te številke spremenili. Samo če razumemo fiziko, na kateri temeljita poraba in proizvodnja energije, si lahko izoblikujemo mnenje o trditvah, kot so:

»99 % energije, ki jo porabijo avtomobili, gre v nič; lahko bi jih preoblikovali tako, da bi porabili 100-krat manj energije.« Je ta trditev pravilna? Za pojasnilo bom moral uporabiti enačbe, kakršna je tale:

$$\text{kinetična energija} = \frac{1}{2} mv^2.$$

Zavedam pa se, da so mnogim bralcem takšne formule tuj jezik. Zato obljubim: *Vse te tujejezične stvari bom omejil na tehnična poglavja na koncu knjige.* Ta bodo najbrž zanimala bralce z najmanj srednješolsko matematično, fizikalno ali kemijsko izobrazbo. Poglavitni del knjige (od strani 2 do 250) pa naj bi razumel vsakdo, ki zna seštevati, množiti in deliti. Predvsem je namenjen našim dragim izvoljenim in neizvoljenim predstavnikom, članom obeh domov parlamenta.

Še nekaj za konec, preden se zares zaženemo: o energiji ne vem vsega. Nimam vseh odgovorov in številke, ki jih navajam, sem pripravljen revidirati in popraviti. (Popravke pravzaprav pričakujem in jih bom objavil na spletni strani knjige.) Prepričan pa sem o tem, da bodo odgovori na naša vprašanja o trajnostni energiji povezani s *številkami*; vsaka razumna razprava o trajnostni energiji zahteva številke. Ta knjiga jih ima in v njej vam pokažem, kako delati z njimi. Naj vam bo v užitek!

Opombe in dodatno branje

stran

- 25 »*Na sekundo*« je že *vštet* v *definicijo kilovata*. Drugi primeri enot, ki imajo, tako kot vat, enoto časa že vgrajeno, so voz – »Naša jahta je plula s hitrostjo desetih vozlov!« (vozel je ena morska milja *na* uro); hertz – »Slišal sem 50-herčno brnenje.« (en hertz je frekvenca enega cikla *na* sekundo); amper – »Varovalka pregori, ko je tok večji od 13 amperov.« (*ne* 13 amperov na sekundo); in konjska moč – »Ta nemarna mašina ima 50 konjskih moči.« (*ne* 50 konjskih moči na sekundo ali 50 konjskih moči na uro ali 50 konjskih moči na dan, samo 50 konjskih moči).
- *Prosim vas, nikoli in nikdar ne recite »en kilovat na sekundo«.* Pri tem pravilu obstajajo posebne redke izjeme. Ko govorimo o rasti potreb po moči, lahko rečemo: »Britanske potrebe naraščajo za en gigavat na leto.« V 26. poglavju, kjer govorim o nihanju pri vetrni energiji, rečem: »Nekega jutra je moč irskih vetrnih elektrarn upadla s hitrostjo 84 MW na uro.« Prosim, bodite pozorni! En sam napačen zlog lahko povzroči zmedo. Pri števcu za elektriko boste odčitali količino v kilovatnih urah (kWh), *ne* kilovatih na uro.

Na str. 368 sem vključil preglednico, s pomočjo katere lahko pretvarjate med kWh na dan na prebivalca in drugimi pogostejšimi enotami, ki jih uporabljamo za izražanje moči.

3 *Avtomobili*

V prvem poglavju o porabi se poglobimo v ikono sodobne civilizacije: avtomobil z enim potnikom.

Koliko energije porabi redni uporabnik avtomobila? Ko enkrat poznamo pretvorbene količnike, je vse stvar preprostega računanja:

$$\text{porabljen energija na dan} = \frac{\text{prevožena pot na dan}}{\text{pot na enoto goriva}} \times \text{energija na enoto goriva}.$$

Za **prevoženo pot na dan** vzemimo 50 km.

Za **pot na enoto goriva**, kar pomeni **porabo** goriva, vzemimo 33 milj na imperialno galono (iz oglasa za družinski avto):

$$33 \text{ milj na imperialno galono} \simeq 12 \text{ km na liter (8,6 l/100 km)}.$$

(Simbol » $\simeq$ « pomeni »je približno enako«.)

Kaj pa **energija na enoto goriva** (oz. **kalorična vrednost** ali **energij-ska gostota**)? Namesto da pogledamo v vire, je bolj zabavno, da do takšne vrste količin pridemo z nekaj kreativnega sklepanja. Vsa avtomobilska goriva (dizelsko gorivo ali bencin) so ogljikovodiki in ogljikovodike lahko najdemo tudi v svojem zajtrku, ti pa imajo na embalaži ob strani priročno navedeno kalorično vrednost: približno 8 kWh na kg (slika 3.2). Ker smo porabo goriva ocenili v miljah na enoto *prostornine* goriva, moramo kalorično vrednost izraziti kot energijo na enoto *prostornine*. Če hočemo »8 kWh na kg« (energija na enoto *mase*) pretvoriti v energijo na enoto *prostornine*, moramo poznati gostoto goriva. Kakšna je gostota masla? No, maslo ravno še plava na vodi, tako kot razlito gorivo, zato mora biti njegova gostota nekoliko manjša od gostote vode, ki je 1 kg na liter. Če ugibamo in rečemo 0,8 kg na liter, dobimo naslednjo kalorično vrednost:

$$8 \text{ kWh na kg} \times 0,8 \text{ kg na liter} \simeq 7 \text{ kWh na liter}.$$

A ne trmoglavimo z netočno oceno, preklopimo na dejansko vrednost za bencin, ki je 10 kWh na liter.

$$\begin{aligned} \text{energija na dan} &= \frac{\text{prevožena pot na dan}}{\text{pot na enoto goriva}} \times \text{energija na enoto goriva} \\ &= \frac{50 \text{ km/dan}}{12 \text{ km/liter}} \times 10 \text{ kWh/liter} \\ &\simeq \textcolor{red}{40 \text{ kWh/dan}}. \end{aligned}$$

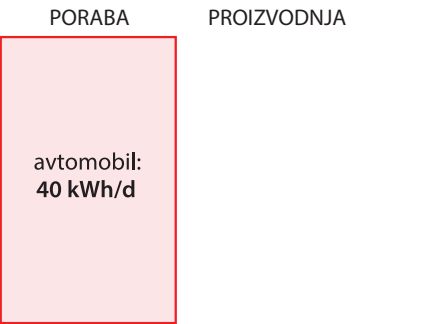
Čestitke! Izdelali smo našo prvo oceno porabe. Ponazoril sem jo v levem stolpcu na sliki 3.3. Višina rdečega polja predstavlja 40 kWh na dan na prebivalca.



Slika 3.1 Avtomobili. Rdeč BMW, pritlikavec v primerjavi z vesoljsko ladjo s planeta Bebo.



Slika 3.2 Vas zanima, koliko energije je v avtomobilskem gorivu? Poglejte oznako na zavitku masla ali margarine. Kalorična vrednost je 3000 kJ na 100 g oz. približno 8 kWh na kg.



Slika 3.3 Zaključek 3. poglavja: tipičen voznik avtomobila porabi približno 40 kWh energije goriva na dan.

To je ocenjena vrednost za tipičnega voznika, ki vozi tipičen sodobni avtomobil. V poznejših poglavjih bomo govorili o *povprečni* porabi vseh ljudi v Veliki Britaniji, pri čemer bomo upoštevali dejstvo, da vsi ne vozijo. V 2. delu bomo govorili tudi o tem, kakšna *bi bila* lahko poraba s pomočjo drugih tehnologij, kot so električni avtomobili.

Zakaj avtomobil prevozi 33 milj na galono? Kam gre ta energija? Bi lahko izdelovali avtomobile, ki prevozijo 3300 milj na galono? Če bi radi poskusili zmanjšati porabo avtomobilov, moramo razumeti fiziko, na kateri ta temelji. Na ta vprašanja odgovorimo v spremnem tehničnem poglavju A (str. 254), in to z ilustrirano teorijo porabe avtomobila. Če ob formulah, kot je mv^2 , nimate bolezenskih reakcij, vam tehnična poglavja svetujem v branje.

Zaključki 3. poglavja: tipičen voznik porabi približno 40 kWh energije goriva na dan. Zdaj moramo nekaj ukreniti s stolpcem trajnostne proizvodnje, da bomo to oceno lahko s čim primerjali.

Vprašanja

Kaj pa poraba energije pri proizvodnji goriva za avtomobil?

Dobro vprašanje. Ko ocenjujem, koliko energije se porabi za neko dejavnost, navadno tej dejavnosti določim precej tesne »meje«. Ta odločitev olajšuje pot do ocene, strinjam pa se, da je pametno poskusiti in oceniti poln energijski učinek dejavnosti. Po znanih ocenah za izdelavo vsake enote bencina potrebujemo 1,4 enote nafte in drugih primarnih goriv (Treloar in sod. 2004).

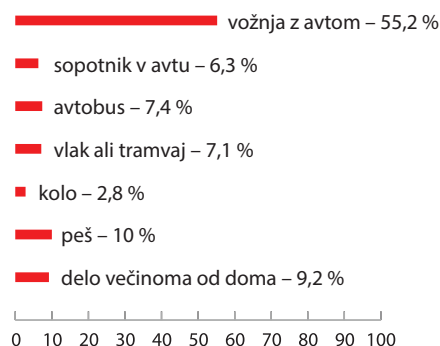
Kaj pa poraba energije pri izdelavi avtomobila?

Ja, tudi ta poraba je bila zunaj meja tega izračuna. O izdelavi avtomobilov bomo govorili v 15. poglavju.

Opombe in dodatno branje

stran

29 *Za prevoženo pot na dan vzemimo 50 km.* To pomeni 18.000 km na leto. Približno polovica prebivalcev Velike Britanije se vozi na delo. Skupen obseg vožnje z avtomobilom v Veliki Britaniji je 686 milijard potniških kilometrov na leto, kar pomeni »povprečno prevoženo pot avtomobila na prebivalca VB« 30 km na dan. Vir: britansko Ministrstvo za promet [5647rh]. Kot sem napisal na str. 22, želim oceniti porabo »tipičnega zmerno premožnega človeka«, h kateri mnogi težijo. Nekateri ne vozijo veliko. V tem poglavju želim oceniti, koliko energije porabi nekdo, ki hoče voziti, ne pa odgovora razosebiti z navajanjem britanskega povprečja, ki v isti koš meče voznike in nevoznike. Če bi rekel: »Povprečna raba energije za vožnjo z avtomobilom v Veliki Britaniji je 13 kWh/d na prebivalca,« stavim, da bi me kdo razumel narobe in rekel: »Jaz vozim, torej očitno porabim 13 kWh/d.«



Slika 3.4 Kako Britanci prihajajo na delo; podatki iz popisa leta 2001.

- 29 */.../ vzemimo 33 milj na imperialno galono.* To je v evropskem jeziku 8,6 litra na 100 km. 33 milj na galono (mpg) je bilo povprečje na avtomobil v Veliki Britaniji leta 2005 [27jdc5]. Povprečna poraba goriva avtomobilov z bencinskim motorjem je 31 mpg (9,1 l/100 km), avtomobilov z dizelskim motorjem 39 mpg (7,2 l/100 km), novih avtomobilov z bencinskim motorjem (mlajših od dveh let) pa 32 mpg (8,8 l/100 km) (Dept. for Transport 2007). Honda, »avtomobilski proizvajalec z najučinkovitejšo porabo goriva v Ameriki«, pri svojem parku avtomobilov, prodanih leta 2005, beleži prvovrstno povprečno porabo goriva v višini 35 milj na imperialno galono (8,1 l/100 km) [28abpm].
- 29 *Če ugibamo in rečemo 0,8 kg na liter /.../* Gostota bencina je 0,737, dizelskega goriva pa 0,820–0,950 [nmn41].
- */.../ dejansko vrednost za bencin, ki je 10 kWh na liter.* ORNL [2hcgdh] navaja naslednje kalorične vrednosti: dizelsko gorivo 10,7 kWh/l; reaktivno gorivo 10,4 kWh/l; bencin 9,7 kWh/l. Ko iščete kalorične vrednosti, boste našli »bruto kalorično vrednost« in »neto kalorično vrednost« (oziroma »visoko toplotno vrednost« in »nizko toplotno vrednost«). Ti se pri motornih vozilih razlikujeta samo za 6 %, zato razlikovanje tukaj ni bistveno, naj pa kljub vsemu pojasnim. Bruto kalorična vrednost je dejanska kemična energija, ki se sprosti ob izgorevanju goriva. Pri izgorevanju med drugim nastane voda in v večini motorjev ter elektrarn se del energije porabi za izparevanje te vode. Neto kalorična vrednost meri, koliko energije še ostane ob predpostavki, da je energija za izparevanje porabljena in zapravljena.
- Ko se vprašamo, »koliko energije porabim za svoj življenjski slog?«, je treba uporabiti podatek o bruto kalorični vrednosti. Neto kalorična vrednost pa zanima inženirja v elektrarni, ki se mora odločiti, katero gorivo bo uporabil. V knjigi se povsod trudim uporabljati bruto kalorične vrednosti.
- Še zadnja opomba za pikolovske »špاسبremze«, ki bodo rekli: »Maslo ni ogljikovodik.« Dobro, maslo sicer ni čisti ogljikovodik, je pa dober približek, če rečemo, da so glavna sestavina masla dolge verige ogljikovodikov, tako kot pri bencinu. Rezultat govori za nas, s približkom smo se pravilnemu odgovoru približali na manj kot 30 %. Dobrodošli v svet gverilske fizike.

kalorične vrednosti	
bencin	10 kWh na liter
dizelsko gorivo	11 kWh na liter



4 Vetrna energija

Velika Britanija ima najboljše vetrne vire v Evropi.

Komisija za trajnostni razvoj

Vetrne elektrarne bodo vodile v brezsmiselno uničenje podeželja.

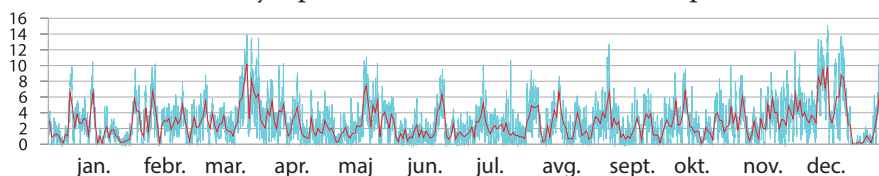
James Lovelock

Kolikšno moč lahko realno zagotovimo s pomočjo vetra?

Potencialno moč, ki jo zagotovi kopenska vetrna energija v Veliki Britaniji, ocenimo tako, da pomnožimo povprečno moč vetrne elektrarne na enoto površine s površino na prebivalca Velike Britanije:

moč na osebo = **moč vetrne elektrarne na enoto površine** x površina na prebivalca

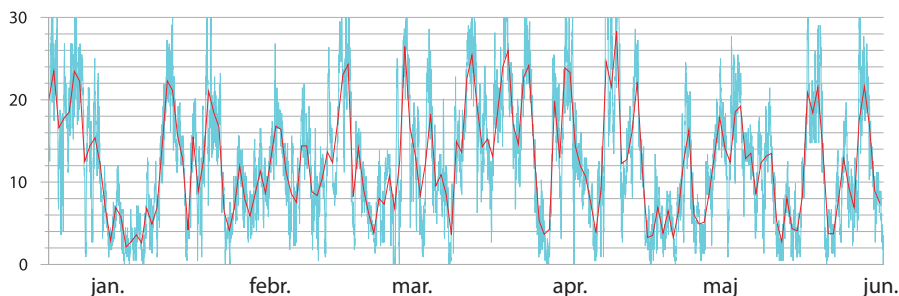
V poglavju B (str. 263) pojasnimo, kako oceniti moč na enoto površine pri vetrni elektrarni v Veliki Britaniji. Če je tipična hitrost vetra 6 m/s (13 milj na uro ali 22 km/h), je specifična moč vetrne elektrarne približno **2 W/m²**.



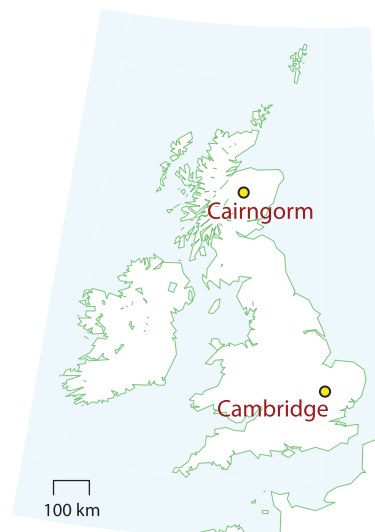
Ta številka, 6 m/s, je za mnoge britanske lokacije najbrž pretirana. Slika 4.1 prikazuje povprečno dnevno hitrost vetra v Cambridgeu leta 2006. Povprečna dnevna hitrost je dosegla 6 m/s samo v približno 30 dneh tega leta – za histogram glejte sliko 4.6. Nekateri predeli pa kljub temu beležijo hitrosti, ki so večje od 6 m/s, na primer vrh gore Cairngorm na Škotskem (slika 4.2).

Če dodamo britansko gostoto prebivalstva, ki je 250 ljudi na kvadratni kilometer oz. 4000 kvadratnih metrov na osebo, ugotovimo, da bi z vetrno energijo lahko zagotovili

$$2 \text{ W/m}^2 \times 4000 \text{ m}^2/\text{preb.} = 8000 \text{ W na prebivalca,}$$



Slika 4.1 Srednja hitrost vetra v Cambridgeu v metrih na sekundo: dnevne (rdeča črta) in polurne vrednosti (modra črta) leta 2006. Glej tudi sliko 4.6.



Slika 4.2 Srednja hitrost vetra za Cairngorm v metrih na sekundo v šestih mesecih leta 2006.

če bi bile vetrne turbine nagnetene po *celotni* državi in ob predpostavki, da je 2 W/m^2 pravi podatek za moč na enoto površine. Če to pretvorimo v našo priljubljeno enoto, dobimo 200 kWh/d na prebivalca.

Bodimo realni. Kolikšen del države bi zares lahko prekrili z vetrnicami? Mogoče 10 %? Potem sledi: če bi z vetrnicami (ki zagotavljajo 2 W/m^2) prekrili najbolj vetrovnih 10 % države, bi lahko proizvedli **20 kWh/d na prebivalca**, kar je **polovica** energije, ki jo potrebujemo za 50 km vožnje na dan v povprečnem avtomobilu na fosilna goriva.

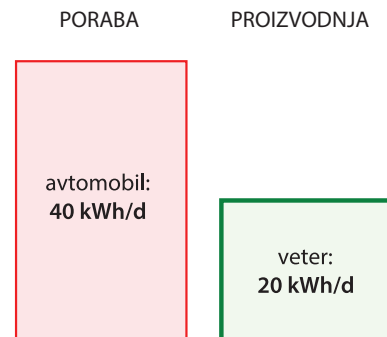
Že mogoče, da so britanski kopenski viri vetrne energije »ogromni«, a očitno ne tako ogromni kot naša ogromna poraba. K vetru na morju se vrnemo pozneje.

Poudariti moram, kako velikodušen sem v svoji predpostavki. Primerjajmo to oceno britanskega vetrnega potenciala z nameščenimi vetrnimi zmogljivostmi po svetu. Količina vetrnic, ki bi jih v Veliki Britaniji potrebovali za 20 kWh/d na prebivalca, je 50-krat večja od vse vetrne opreme na Danskem, 7-krat večja od vseh vetrnih elektrarn v Nemčiji in dvakrat večja od celotnega svetovnega parka vetrnic.

Prosim, ne razumite me napak. Ne pravim, da se nima smisla truditi z gradnjo vetrnih elektrarn. Sploh ne. Preprosto bi rad izrazil uporabno dejstvo, da morajo vetrne elektrarne pokrivati zelo veliko površino, če želimo, da bodo zares imele učinek.

Ta zaključek – da je največji možni prispevek kopenske energije vetra, četudi »ogromen«, veliko manjši od naše porabe – je pomemben, zato ključni podatek, domnevno specifično moč vetrne elektrarne (2 W/m^2), raje preverimo s pomočjo konkretne britanske vetrne elektrarne.

Vetrna elektrarna Whitelee, ki jo gradijo v bližini Glasgowa na Škotskem, obsega 140 turbin s skupno *največjo* zmogljivostjo 322 MW na 55 km^2 površine. To je *največ* 6 W/m^2 . Povprečna moč je manjša, saj turbine ne delujejo ves čas pri največji zmogljivosti. Razmerje med povprečno proizvedeno količino energije in količino, ki bi bila proizvedena pri maksimalni zmogljivosti, to pomeni pri nazivni moči, imenujemo »faktor izkoriščenosti«; ta pa je odvisen od lokacije in izbire opreme, ki jo tja parkiramo. Tipični faktor izkoriščenosti za ugodno lokacijo s sodobnimi turbinami znaša 30 %. Če predpostavimo, da je faktor izkoriščenosti elektrarne Whitelee 33 %, potem je njena specifična moč **2 W/m^2** – natančno toliko, kot smo predpostavili.



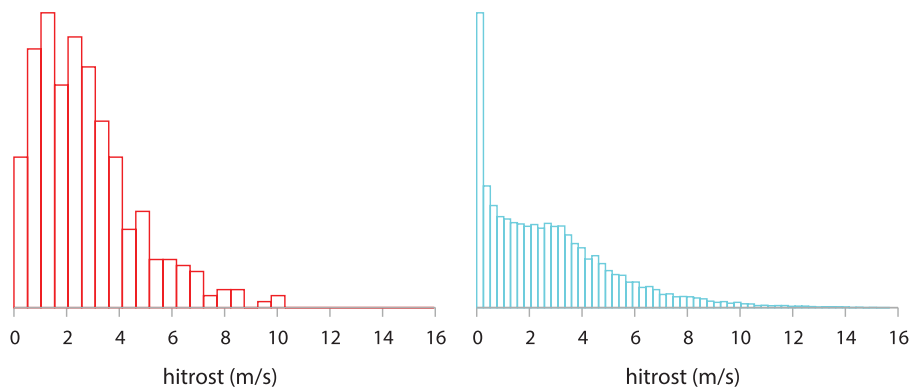
Slika 4.3 Zaključek 4. poglavja: največja realna proizvodnja kopenskih vetrnic v Veliki Britaniji je 20 kWh na dan na prebivalca.

MOČ NA ENOTO POVRŠINE	
vetrna elektrarna	2 W/m^2
(hitrost 6 m/s)	

Tabela 4.4 Podatki, ki si jih je vredno zapomniti: vetrne elektrarne.

GOSTOTA PREBIVALSTVA V VELIKI BITANUI
$250 \text{ na km}^2 \leftrightarrow 4000 \text{ m}^2 \text{ na osebo}$

Tabela 4.5 Podatki, ki si jih je vredno zapomniti: gostota prebivalstva. Podatki o gostoti prebivalstva drugih držav so na strani 338.



Slika 4.6 Histogram povprečne hitrosti vetra v Cambridgeu v metrih na sekundo: dnevna povprečja (levo) in polurna povprečja (desno).

Vprašanja

Vetrne turbine se ves čas povečujejo. Ali večje vetrne turbine kaj spremenijo odgovore v tem poglavju?

To pojasni poglavje B. Večje vetrne turbine ustvarjajo ekonomijo obsega, skupne moči na enoto površine pa bistveno ne povečajo, saj mora biti med večjimi vetrnicami večja razdalja. Vetrna elektrarna z dvakrat večjo višino bo zagotovila približno 30 % več moči.

Vetrna energija ves čas niha. Veter je zato najbrž manj uporaben?

Morda. K temu vprašanju se bomo vrnili v 26. poglavju, kjer se bomo poglobili v nestalnost vetra in pretehtali nekaj možnih rešitev tega problema, med drugim shranjevanje energije in upravljanje potreb.

Opombe in dodatno branje

stran

- 32 *Slika 4.1 in slika 4.6.* Vir podatkov o vetru v Cambridgeu: Skupina za digitalno tehnologijo, Computer Laboratory, Cambridge [vxhhj]. Vremenska postaja je na strehi stavbe Gates približno 10 m visoko. Hitrost vetra na višini 50 m je običajno približno 25 % večja. Vir podatkov za Cairngorm (*slika 4.2*): Oddelek za fiziko univerze Heriot-Watt [tdvml].
- 33 *Količina vetrnic, ki bi jih v Veliki Britaniji potrebovali za 20 kWh/d na prebivalca, je 50-krat večja od vse vetrne opreme na Danskem.* Ob predpostavki, da je faktor izkoriščenosti 33 %, bi za povprečnih 20 kWh/d na prebivalca potrebovali 150 GW zmogljivosti. Ob koncu leta 2006 je Danska imela 3,1 GW zmogljivosti, Nemčija 20,6 GW. Skupna številka za ves svet je bila 74 GW (wwindea.org). Mimogrede, faktor izkoriščenosti danskega vetrnega parka je bil leta 2006 22 %, njegova povprečna moč pa 3 kWh/d na prebivalca.

5 Letala

Zamislite si, da opravite en medcelinski let na leto. Koliko energije vas to stane?

Letalo Boeing 747-400 z 240.000 litri goriva lahko 416 potnikov prepele približno 8.800 milj (14.200 km) daleč. Kalorična vrednost goriva je 10 kWh na liter. (To smo se naučili v 3. poglavju.) Poraba energije povratnega leta polne razdalje s takšnim letalom, če ga enakovredno razdelimo med vse potnike, je:

$$\frac{2 \times 240.000 \text{ litrov}}{416 \text{ potnikov}} \times 10 \text{ kWh/liter} \simeq 12.000 \text{ kWh na potnika.}$$

Če opravite en takšen let na leto, je vaša povprečna poraba energije na dan

$$\frac{12.000 \text{ kWh}}{365 \text{ dni}} \simeq 33 \text{ kWh/dan.}$$

14.200 km je nekoliko več kot od Londona do Cape Towna (10.000 km) ali od Londona do Los Angelesa (9000 km), torej smo nekoliko precenili razdaljo tipičnega medcelinskega leta; smo pa tudi precenili zasedenost letala in če letalo ni polno, je poraba energije na osebo večja. Če oceno zmanjšamo za 10.000 km/14.200 km, da dobimo oceno za Cape Town, in povečamo za 100/80, če je zasedenost letala 80 %, dobimo 29 kWh na dan. Da si bomo lažje zapomnili, bom zaokrožil na **30 kWh na dan**.

Pojasnimo, kaj to pomeni. Če letimo enkrat letno, je poraba energije nekoliko večja, kot če 1-kilovatni električni grelnik pustimo goreti ves čas, 24 ur na dan vse leto.

Tako kot 3. poglavje, v katerem smo ocenili porabo avtomobila, dopolnjuje poglavje A s shemo tega, kam gre energija v avtomobilu, tehnični sopotnik tega poglavja (poglavje C, str. 269) pojasni, kam gre energija v letalih. S poglavjem C lahko odgovorimo na vprašanja, kot je: »Bi pri letenju porabili bistveno manj energije, če bi potovali s počasnejšimi letali?« Odgovor je **ne**: v nasprotju s kopenskimi vozili, ki so *lahko* učinkovitejša, čim počasnejša so, energijska učinkovitost letal že skoraj ne bi mogla biti večja. Letala se ne morejo izogniti porabi energije za dvoje: zrak morajo potiskati navzdol, da ostanejo zgoraj, in premagovati morajo zračni upor. Nobene oblikovne izboljšave letala ne bodo drastično izboljšale njegove učinkovitosti. 10-odstotno izboljšanje? To bi šlo. Da bi se učinkovitost podvojila? Če bo, bom pomalical nogavice.

Vprašanja

Niso turbopropellerska letala veliko učinkovitejša?

Ne. »Okolju občutno prijaznejši« Bombardier Q400 NextGen, po mnenju njegovih proizvajalcev »tehnološko najnaprednejše turbopropellersko



letalo:
30 kWh/d

avtomobil:
40 kWh/d

veter:
20 kWh/d

Slika 5.1 Z enim medcelinskim letom na leto porabimo približno 30 kWh na dan.



Slika 5.2 Bombardier Q400 NextGen.
www.q400.com.

letalo na svetu« [www.q400.com], porabi 3,81 litra na 100 potniških kilometrov (pri hitrosti 667 km/h), kar pomeni porabo energije v višini **38 kWh na 100 pkm**. Pri polnem Boeingu 747 je poraba energije **42 kWh na 100 pkm**. Obe letali sta torej pri porabi goriva dvakrat učinkovitejši od avtomobila z enim potnikom. (Gre za povprečni evropski avtomobil, ki smo ga vzeli za primer v 3. poglavju.)

Ima letenje še kakšen dodatni škodljiv vpliv na podnebje?

Ja, takšno je mnenje strokovnjakov, čeprav o tem ni dokončnega konsenza [3fbufz]. Ob letenju se ob CO₂ sproščajo še drugi toplogredni plini, na primer vodna para in ozon, in posredni toplogredni plini, kot so dušikovi oksidi. Če želite oceniti svoj ogljični odtis v tonah ekvivalenta CO₂, vzemite dejanske izpuste CO₂ vaših letov in jih dvakrat ali trikrat povečajte. Diagrami v tej knjigi tega pomnoževalca ne vključujejo, saj tu govorimo o *energijski* bilanci.

Okoljevarstvenike bi bilo najboljše postreliti.

Michael O’Leary, direktor Ryanaira [3asmgy]

Opombe in dodatno branje

stran

35 *Boeing 747-400* – vir podatkov [9ehws].

Letala danes niso povsem polna. Letalske družbe so ponosne, če dosežejo 80-odstotno povprečno zasedenost. Letala Easyjeta so v povprečju 85-odstotno zasedena. (Vir: thelondonpaper. Torek, 16. januar 2007.) 80-odstotno zaseden 747 porabi približno 53 kWh na 100 potniških km.

Kaj pa leti na kratke razdalje? Leta 2007 je Ryanair, »okolju najprijaznejši evropski letalski prevoznik«, prevažal pri porabi **37 kWh na 100 pkm** [3exmgv]. To pomeni, da je poraba energije leta na drugi konec Evrope z Ryanairom približno enaka, kot če vse potnike na njihov cilj peljemo z avtom po dva na avtomobil. (Da si boste lažje predstavljali podatek za druge letalske družbe: leta 2000, pred okolju prijaznimi naložbami, je bila poraba goriva pri Ryanairu več kot **73 kWh na 100 pkm**.) Od Londona do Rima je 1430 km, od Londona do Malage 1735 km. Poraba energije povratnega leta do Rima z okolju najprijaznejšo letalsko družbo je 1050 kWh, povratnega leta do Malage pa 1270 kWh. Če do Rima in Malage skočite enkrat na leto, povprečno potrošite 6,3 kWh/d z okolju najprijaznejšo letalsko družbo in kakšnih 12 kWh/d z okolju manj prijazno.

Kaj pa redni potniki? Za srebrno kartico medcelinske letalske linije morate preleteti približno 25.000 milj (40.000 km) na leto v ekonomskem razredu. To pomeni 60 kWh na dan, če povečamo številke z začetka tega poglavja in predpostavimo, da so letala 80-odstotno zasedena.

Tu je še nekaj dodatnih številkk Medvladnega odbora za podnebne spremembe [yrnmum]: v polnem Boeingu 747-400 z manj sedeži (262), ki prepotuje 10.000 km, je poraba energije **50 kWh na 100 pkm**. Pri več sedežih (568) in

	energija na pot (kWh na 100 pkm)
avtomobil (4 potniki)	20
Ryanairova letala, leto 2007	37
Bombardier Q400, polno 747, polno	38
747, 80 % polno	42
Ryanairova letala, leto 2000	53
avtomobil (1 potnik)	73
	80

Tabela 5.3 Učinkovitost potniškega prometa, izražena kot energija, potrebna za 100 potniških kilometrov.



Slika 5.4 Ryanairov Boeing 737-800. Foto: Adrian Pingstone.

razdalji 4000 km enako letalo porabi **22 kWh na 100 pkm**. Tupoljev-154 za kratke razdalje, ki prepotuje 2235 km ob 70-odstotni zasedenosti 164 sedežev, porabi **80 kWh na 100 pkm**.

- 35 *Nobene oblikovne izboljšave letala ne bodo drastično izboljšale njegove učinkovitosti.* Pravzaprav cilj Svetovalnega sveta za letalske in vesoljske raziskave (ACARE) predvideva skupno 50-odstotno zmanjšanje porabe goriva na potniški km do leta 2020 (glede na raven leta 2000), pri čemer se pričakuje 15- do 20-odstotno povečanje izkoristka motorjev. Od leta 2006 je Rolls Royce na polovici poti do tega cilja pri motorjih [36w5gz]. Kot kaže, se Dennis Bushnell, glavni znanstvenik v Nasinem raziskovalnem centru v Langleyju, strinja z mojo skupno oceno o tem, kakšni so obeti za izboljšave učinkovitosti v letalstvu. Letalska industrija je že dosegla zrelost. »Veliko ni več mogoče doseči, razen polžjega prirastka za odstotek tu in tam v daljšem časovnem obdobju.« (New Scientist, 24. februar 2007, str. 33.)

Radikalno preoblikovano »tiho letalo« [silentaircraft.org/sax40] bi bilo po napovedih za 16 % učinkovitejše od konvencionalno oblikovanega letala (Nickol 2008).

Če bo cilj ACARE dosežen, se bo to najverjetneje zgodilo večinoma po zaslugi večje zasedenosti letal in boljšega upravljanja zračnega prometa.

kratki leti: **6 kWh/d**



Slika 5.5 Dva leta na kratko razdaljo z okolju najprijaznejšo letalsko družbo na kratke razdalje: 6,3 kWh/d. Količina letov, ki zadostuje za srebrno kartico pogostega potnika: 60 kWh/d.

6 Sončna energija

Našo porabo bi radi primerjali z realno oceno proizvodnje trajnostne energije. V zadnjih treh poglavjih smo ugotovili, da je poraba pri vožnji z avtomobilom in letenju večja od verjetnega potenciala kopenske vetrne energije v Veliki Britaniji. Ali se lahko s sončno energijo ta tehtnica prevesi na stran proizvodnje?

Gostota energijskega toka opoldanskega sonca na dan brez oblaka je 1000 W na kvadratni meter, kar imenujemo obsevanje. To pomeni 1000 W na m² površine, obrnjene pravokotno proti soncu, ne na m² zemeljske površine. Da dobimo energijo na m² zemeljske površine v Veliki Britaniji, moramo vnesti nekaj **popravkov**. Upoštevati moramo kot med sončnimi žarki in površino Zemlje, ki jakost opoldanskega sonca zmanjša na okrog 60 % vrednosti, ki jo ima ta na ekvatorju (slika 6.1). Do dodatnih izgub pride, ker ni ves čas poldne. Na dan brez oblaka marca ali septembra je razmerje med *povprečnim obsevanjem* in opoldanskim obsevanjem približno 32 %. In ne nazadnje, energijo izgubimo tudi zaradi oblakov. Na tipični britanski lokaciji sonce sveti samo 34 % vseh ur z dnevno svetlobo.

Skupni učinek teh treh dejavnikov in dodatnih komplikacij ob opleta-nju Zemljine osi pomeni, da je povprečna »surova« moč sonca na kvadratni meter britanske strehe, obrnjene proti jugu, približno 110 W/m², povprečna moč na kvadratni meter ravnega zemljišča pa približno 100 W/m².

To surovo moč lahko v uporabno spremenimo na štiri načine:

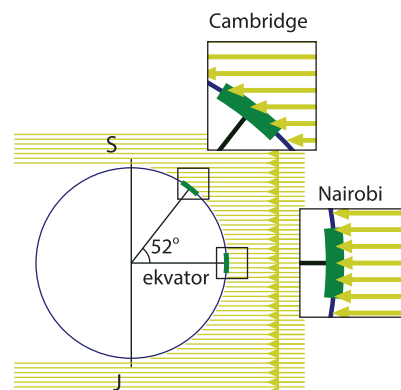
1. toplota sonca: uporaba sonca za neposredno ogrevanje stavb ali vode;
2. fotonapetostna energija: proizvodnja električne energije;
3. biomasa »na sončni pogon«: uporaba dreves, bakterij, alg, koruze, soje ali oljnic za proizvodnjo energijskih goriv, kemikalij ali gradbenega materiala;
4. hrana: enako kot pri biomasi, le da z rastlinami pitamo človeka ali druge živali.

(V nadaljevanju knjige bomo pogledali še nekaj drugih solarnih postopkov, ki so primerni za uporabo v puščavah.)

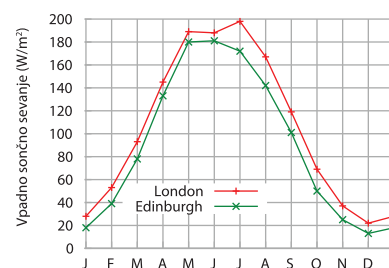
Naredimo nekaj grobih ocen največje možne moči, ki bi jo lahko pridobili po teh poteh. Pri tej oceni bomo zanemarili tako njihove ekonomske stroške kot tudi potrebno energijo za izdelavo in vzdrževanje teh objektov.

Toplota sonca

Najpreprostejša solarna tehnologija je toplotni sprejemnik sončne energije (SSE), ki ga pogovorno imenujemo kar sončni kolektor, njegova naloga pa je gretje vode. Zamislimo si, da vse strehe, obrnjene proti jugu, prekrijemo s SSE – to bi pomenilo približno 10 m² SSE na osebo –,

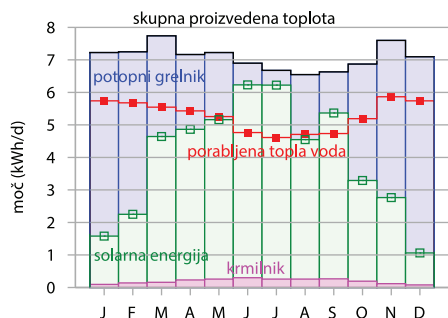


Slika 6.1 Sončno sevanje na Zemljo opoldne na pomladni ali jesenski dan. Obsevanje v Cambridgeu (zemljepisna širina 52 °) je približno 60 % vrednosti na ekvatorju.



Slika 6.2 Povprečno obsevanje v Londonu in Edinburghu kot funkcija letnega časa. Povprečno obsevanje je 100 W/m².

in predpostavimo, da je njihov izkoristek pri pretvorbi sončevih 110 W/m^2 v toplo vodo 50-odstoten (slika 6.3).



Slika 6.3 Moč, ki so jo zagotovili 3 m^2 sončnih SSE (zeleni), in dodatna potrebna toplota (modra) za ogrevanje vode v testni hiši Viridian Solar. (Fotografija prikazuje hišo z enakim modelom SSE.) Povprečna moč teh 3 m^2 je bila $3,8 \text{ kWh/d}$. V poskusu so simulirali porabo tople vode povprečnega evropskega gospodinjstva, ki je 100 litrov tople (60°C) vode na dan. Razlika med skupno proizvedeno toploto (črna črta zgoraj) in porabljen tople vodo (rdeča črta) v višini $1,5\text{--}2 \text{ kWh/d}$ je posledica toplotnih izgub. Vijolična črta prikazuje električno energijo, potrebno za delovanje solarnega sistema. Povprečna specifična moč SSE je 53 W/m^2 .

Če zmnožimo

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

ugotovimo, da bi lahko s toploto sonca pridobili

13 kWh na dan na prebivalca.

Polje te proizvodnje sem na sliki 6.4 obarval belo, kar pomeni, da gre za proizvodnjo energije z nižjo uporabno vrednostjo – topla voda nima takšne vrednosti kot električna energija iz vetrnih turbin. Toplote tudi ni mogoče izvažati v elektroenergetsko omrežje. Če je ne potrebuješ, gre v nič. Zavedati se moramo, da precej te zajete toplote ne bi bilo tam, kjer bi jo potrebovali. V mestih, kjer živi veliko ljudi, imajo strehe večstanovanjskih stavb manjšo površino na prebivalca, kot je državno povprečje. Poleg tega bi se ta energija čez leto ustvarjala nekonstantno.

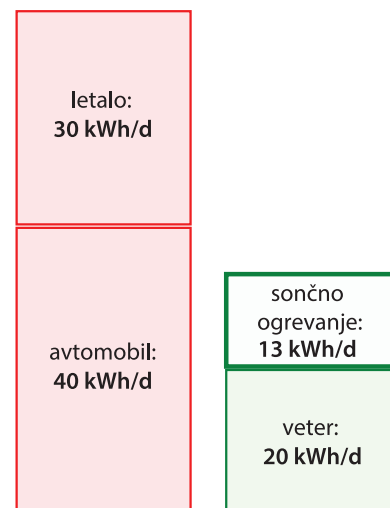
Fotonapetostna energija

Fotonapetostni (FN) moduli v sončnih elektrarnah sončno svetlobo pretvarjajo v električno energijo. Tipične sončne elektrarne imajo približno 10-odstotni izkoristek, dražje pa 20-odstotnega. (Temeljni zakoni fizike izkoristek fotonapetostnih sistemov omejujejo na največ 60 % ob popolnem koncentriranju sevanja s pomočjo zrcal ali leč oz. 45 % brez koncentradorjev. Komercialna naprava z več kot 30-odstotnim izkoristkom bi bila nekaj izjemnega.) Povprečna moč proti jugu obrnjenih sončnih elektrarn z 20-odstotnim izkoristkom bi bila v Veliki Britaniji

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

Slika 6.5 pokaže, da podatki to številko potrdijo. Predpostavimo, da ima vsak prebivalec 10 m^2 dragih solarnih naprav (z 20-odstotnim izkoristkom) in prekrijmo vse strehe, obrnjene proti jugu. To bo prineslo

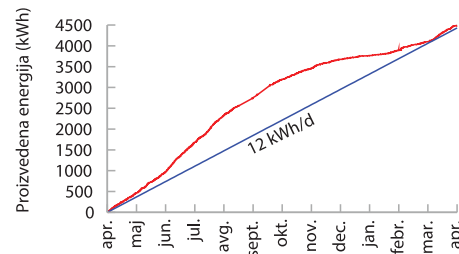
5 kWh na dan na prebivalca.



Slika 6.4 Toplota sonca: 10 m^2 SSE lahko (v povprečju) proizvede približno 13 kWh toplote na dan.

Ker je površina vseh proti jugu obrnjenih streh 10 m^2 na osebo, na naših strehah zanesljivo ni prostora za vse te sončne elektrarne in še SSE iz prejšnjega podpoglavja. Zato se moramo odločiti, ali hočemo fotonapetostni prispevek ali prispevek v obliki tople vode. Bom pa vseeno oboje prilepil v stolpec proizvodnje. Mimogrede, zdajšnji strošek namestitve takšnih sončnih elektrarn je približno štirikrat večji od stroška namestitve SSE, pridobijo pa polovico manj energije, čeprav je to električna energija z veliko uporabno vrednostjo. Družini, ki razmišlja o sončnih rešitvah, zato predlagam, naj se najprej pozanima o SSE. Najpametnejša rešitev, vsaj v sončnih državah, je kombiniran sistem, ki z eno napravo zagotavlja tako električno energijo kot toplo vodo. Takšno rešitev so prvi ubrali pri podjetju Heliodynamics, ki končno ceno svojih sistemov zmanjšuje tako, da male galij-arzenidne fotonapetostne enote z veliko uporabno vrednostjo obda z vrsto počasi gibljivih ploskih zrcal. Zrcala zgostijo sončno svetlobo na fotonapetostne enote, te pa poskrbijo tako za električno energijo kot toplo vodo. Slednjo pridobivajo tako, da črpajo vodo prek zadnje strani fotonapetostne enote.

Vmesni zaključek: če svojo proti jugu obrnjeno streho prekrijete s fotonapetostnimi moduli, boste mogoče pridelali dovolj »bencina«, da pokrijete pošten kos osebne povprečne porabe elektrike; niso pa strehe dovolj velike, da bi se to bistveno poznalo pri naši skupni porabi *energije*. Da bi s fotovoltaiiko dosegli več, moramo sestopiti na trdna tla. Sončna bojevnika na sliki 6.6. kažeta kako.



Slika 6.5 Sončne elektrarne: podatki za sistem s površino 25 m^2 v Cambridgeshiru leta 2006. Največja moč sistema je približno 4 kW. Celoletno povprečje je 12 kWh na dan. To pomeni **20 W na kvadratni meter elektrarne**.

Slika 6.6 Sončna bojevnika se veselita svojega fotonapetostnega sistema, ki napaja njune električne avtomobile in dom. Sistem 120 modulov (vsak 300 W in $2,2 \text{ m}^2$) se razprostira na 268 m^2 , maksimalna zmogljivost (ob upoštevanju izgub ob pretvorbi enosmerni-izmenični tok) je 30,5 kW, povprečna moč (v Kaliforniji v bližini Santa Cruz) pa 5 kW (**19 W/m^2**). Fotografijo je prijazno prispeval Kenneth Adelman.

www.solarwarrior.com

Minutke za fantazijo: sončna polja

Kolikšna bi bila največja realna proizvodnja, če se zgodi preboj solarne tehnologije in bi se strošek sončnih elektrarn toliko znižal, da bi jih lahko namestili po vsem podeželju? No, če bi z moduli z 10-odstotnim izkoristkom prekrili 5 % Velike Britanije, bi dobili

$$10 \% \times 100 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ na preb.} \\ \simeq 50 \text{ kWh/dan/preb.}$$

Predpostavil sem elektrarne s samo 10-odstotnim izkoristkom, saj si predstavljam, da bi jih v takšnem obsegu masovno postavljali samo, če bi bile zelo poceni. Prvi pa se bodo pocenili prav moduli z majhnim izkoristkom. Specifična moč (moč na enoto površine) takšne sončne elektrarne bi bila

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

Ta vrednost je še vedno dvakrat večja od tiste v obstoječem bavarskem Solarparku (slika 6.7).

Bi poplava solarnih naprav lahko soobstajala z armado vetrnic, ki smo si jih zamislili v 4. poglavju? Nič lažjega: vetrnice ne mečejo veliko sence in sončne elektrarne na zemlji zanemarljivo vplivajo na veter. Kako smel je ta načrt? Solarne zmogljivosti, ki bi jih potrebovali za teh 50 kWh na dan na prebivalca Velike Britanije, so več kot 100-krat večje od vseh fotonapetostnih zmogljivosti na svetu. Naj torej FN polje dodam v stolpec trajnostne proizvodnje? Kolebam. Na začetku knjige sem rekel, da hočem raziskati, kaj zakoni fizike pravijo o mejah trajnostne energije, če denar ne igra nobene vloge. Glede na to bi moral brez pomislekov mirno pokriti podeželje s FN elektrarnami in fotonapetostno polje vriniti na stolpec. Hkrati pa bi rad ljudem pomagal ugotoviti, kaj bi bilo treba postoriti do leta 2050 od *tega trenutka* dalje. In danes bi bila elektrika iz solarnih polj štirikrat dražja od tržne cene. Zato se mi zdi nekoliko neodgovorno, da to oceno vključujem v stolpec trajnostne proizvodnje na sliki 6.9. Možnost, da bi 5 % Velike Britanije prekrili s sončnimi elektrarnami, se zdi v mnogih pogledih zelo neverjetna. Če bi o čem takšnem resno razmišljali, bi bilo najbrž bolje elektrarne namestiti v državo, ki ima dvakrat več sonca, in pošiljati nekaj energije domov po daljnovodih. K tej zamisli se bomo vrnili v 25. poglavju.

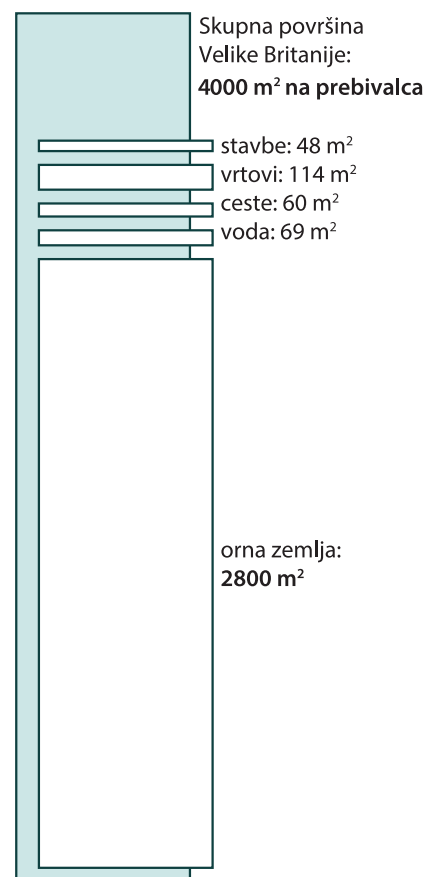
Miti in zmote

Za izdelavo sončne elektrarne porabimo več energije, kot jo bo ta kdaj proizvedla.

Ni res. **Količnik energijskega donosa** (razmerje med energijo, ki jo sistem proizvede v svoji življenjski dobi, in energijo, ki jo potrebujemo za njegovo izdelavo) na omrežje priključenega strešnega solarnega sistema



Slika 6.7 Sončna elektrarna: 6,3-megavatni (končna moč) Solarpark v Mühlhausnu na Bavarskem. Njegova povprečna moč na enoto površine na bi bila po napovedih približno **5 W/m²**. Foto: SunPower.



Slika 6.8 Površine na prebivalca Velike Britanije.

v srednji in severni Evropi je 4, če ima sistem 20-letno življenjsko dobo (Richards in Watt 2007), na bolj sončnih območjih, kot je Avstralija, pa več kot 7. (In količnik energijskega donosa, ki je večji kot 1, pomeni, da je sistem z energijskega vidika »dobra stvar«.) Pri vetrnih elektrarnah z 20-letno življenjsko dobo je količnik energijskega donosa 80.

Ne bodo sončne elektrarne s tehnološkimi izboljšavami postajale čedalje učinkovitejše?

Prepričan sem, da bodo sončne elektrarne postajale čedalje cenejše; prepričan sem tudi, da bo njihova izdelava čedalje manj energijsko intenzivna, zato se bo količnik energijskega donosa povečal. Toda fotonapetostnih ocen v tem poglavju ni omejeval niti ekonomski strošek elektrarn niti strošek potrebne energije za njihovo izdelavo. Ukvarjali smo se z največjo realno močjo, ki jo lahko zagotovijo. Nekatere sončne elektrarne z 20-odstotnim izkoristkom so že blizu teoretične meje (glejte opombe na koncu poglavja). Presenečen bom, če bo oceno tega poglavja za strešne fotonapetostne naprave kdaj treba bistveno povečati.

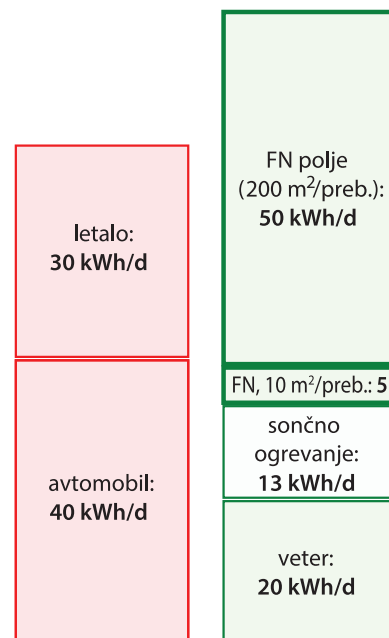
Biomasa »na sončni pogon«

Lahko se nam zgodi, da se bomo znašli v energetiki samo zato, ker imamo na ranču možnost gojiti travo! In jo požeti in pretvoriti v energijo. Čas, ko bo to mogoče, ni več daleč.

George W. Bush, februar 2006

Pri vseh razpoložljivih bioenergijskih rešitvah moramo najprej gojiti neko zeleno rastlino, potem pa s tem zelenjem nekaj postoriti. Koliko energije se sploh lahko nabere v zelenih rastlinah? Iz bioloških sistemov, ki jih napaja sonce, lahko energijo dobimo po štirih glavnih poteh.

1. Lahko gojimo posebej izbrane rastline in jih sežigamo v elektrarni, ki proizvaja elektriko ali toploto ali oboje. Temu pravimo »nadomeščanje premoga«.
2. Lahko gojimo posebej izbrane rastline (recimo oljno ogrščico, sladkorni trst ali koruzo), jih spremenimo v etanol ali biodizel in s tem pitamo avtomobile, vlake, letala ali druge naprave, kjer so takšni preparati uporabni. Lahko gojimo tudi gensko spremenjene bakterije, cianobakterije ali alge, ki neposredno proizvajajo vodik, etanol ali butanol ali celo električno energijo. Vsem takšnim načinom pravimo »nadomeščanje nafte«.
3. Lahko vzamemo stranske proizvode drugih kmetijskih dejavnosti in jih sežgemo v elektrarni. Stranski proizvodi segajo vse od slame (stranski proizvod kosmičev raznih vrst) do piščančjih iztrebkov (stranski proizvod piščančjih medaljončkov v McDonaldsu). Tudi ta način je nadomeščanje premoga, le da z uporabo običajnih rastlin, ne posebnih visokoenergijskih rastlin. Elektrarna, ki sežiga



Slika 6.9 Sončne elektrarne: sistem 10 m² proti jugu obrnjenih in na stavbo nameščenih modulov z 20-odstotnim izkoristkom lahko proizvede približno 5 kWh električne energije na dan. Če bi 5 % države prekrili z elektrarnami z 10-odstotnim izkoristkom (200 m² na prebivalca), bi te proizvedle 50 kWh/dan na prebivalca.

stranske proizvode iz kmetijstva, ne bo prispevala toliko moči na enoto površine kmetijske zemlje kot optimiziran objekt za gojenje biomase, njena prednost pa je, da si ne prilasti kmetijske zemlje. Podoben način pridobivanja energije je sežiganje metana z odlagališč, a ta je trajnosten samo, če imamo trajnosten vir smeti, ki jih odlagamo. (Večina metana z odlagališč prihaja iz zavržene hrane; v Britaniji zavržemo približno 300 g hrane na dan na prebivalca.) Še en nekoliko krajši obvod do pridobivanja energije iz biomase je sežiganje gospodinjskih odpadkov.

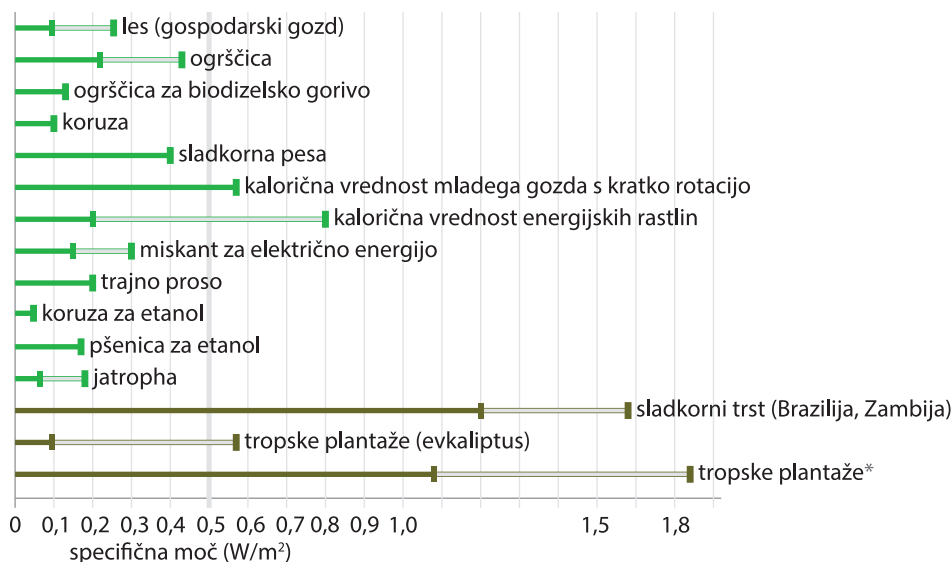
4. Lahko gojimo rastline in z njimi neposredno hranimo ljudi ali druge živali, ki potrebujejo energijo.

Pri vseh teh procesih se energija najprej zbere v določeni kemični molekuli, kot so ogljikovi hidrati v zelenih rastlinah. Koliko energije lahko pridobimo, ugotovimo tako, da ocenimo, koliko energije bi lahko prečkalo to prvo zbirališče. V vseh nadaljnjih korakih, ki vključujejo traktorje, živali, kemične obrate, odlagališča ali elektrarne, se lahko samo še izgubi. Energija pri prvem zbirališču je tako zgornja meja energije, ki jo lahko pridobimo s pomočjo vseh rastlinskih energijskih rešitev.

Izdelajmo preprosto oceno energije pri prvem zbirališču. (V poglavju D se bomo bolj poglobili in ocenili največji prispevek vsakega procesa.) S pomočjo sonca lahko v Veliki Britaniji povprečno proizvedemo 100 W/m^2 energije. Najučinkovitejše rastline v Evropi imajo pri pretvarjanju sončne energije v ogljikove hidrate približno 2-odstotni izkoristek, po čemer bi sklepali, da rastline prispevajo 2 W/m^2 , toda njihova učinkovitost pri večjem sončnem sevanju upade, zato je najboljša možna storilnost katerega koli energijskega pridelka v Evropi bližje $0,5 \text{ W/m}^2$. Prekrijmo 75 % države s kakovostnim zelenjem. Tako bi bioenergiji namenili 3000 m^2 na



Slika 6.10 Miskant v družbi dr. Emily Heaton, ki meri 163 cm. V Veliki Britaniji miskant doseže v okviru svojega energijskega potenciala specifično moč $0,75 \text{ W/m}^2$. Fotografijo je prispevala Univerza v Illinoisu.



Slika 6.11 Koliko moči na enoto površine zagotovijo različne rastline. Viri so navedeni v opombah. Specifična moč je odvisna od namakanja in gnojenja; pri nekaterih rastlinah je razpon označen. Pri lesu je razpon od $0,095$ do $0,254 \text{ W/m}^2$. Spodnje tri vrednosti so za posevke na tropskih lokacijah. Zadnja vrednost (tropske plantaže*) predvideva genske spremembe, uporabo gnojila in namakanje. V besedilu vrednost najboljših energijskih rastlin v severozahodni Evropi povzamam z $0,5 \text{ W/m}^2$.

prebivalca. Tolikšno površino v Veliki Britaniji zdaj namenjamo kmetijstvu. Če zanemarimo vse dodatne stroške gojenja, žetve in predelave zelenja, torej na ta način lahko pridobimo največ toliko energije, da pokrijemo naslednjo porabo:

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

Ohoho. To pa ni prav veliko glede na nezaslišano velikodušne predpostavke, s katerimi smo hoteli številke čim bolj povečati. Če bi hoteli do biogoriv za avtomobile ali letala priti s pomočjo zelenja, bi bila veriga v vseh drugih korakih od kmetije do motorja v vsakem primeru neučinkovita. Po mojem mnenju je preoptimistično upati celo, da bi bile skupne izgube v predelovalni verigi samo 33 %. Celo pri sežiganju suhega lesa v dobrem kotlu se 20 % toplote izgubi v dimniku. Resnična potencialna moč iz biomase in biogoriv potemtakem zanesljivo ne more biti večja od **24 kWh/d na prebivalca**. In ne pozabite, nekaj tega zelenja hočemo vendarle porabiti za hrano zase in za svoje štirinožne prijatelje.

Bi z genskim inženiringom lahko izdelali rastline, ki bi bile učinkovitejše pri pretvarjanju sončne energije v kemikalije? Možno, a v nobeni znanstveni publikaciji še nisem naletel na napoved, da lahko rastline v Evropi v neto proizvodni moči presežejo 1 W/m^2 .

V zeleni stolpec bom dodal 24 kWh/d na prebivalca, pri čemer poudarjam, da se mi zdi ta številka pretirana. Največja moč, ki jo lahko zagotovi biomasa, je po mojem mnenju zaradi izgub v kmetijstvu in predelavi v resnici manjša.

Predvidevam, da je eden od zaključkov jasen: *z biogorivi se ne izide* – vsaj ne v državah, kot je Velika Britanija, in ne kot nadomestek za vsa motorna goriva. Tudi če odmislimo glavne pomanjkljivosti biogoriv – da pri proizvodnji konkurirajo hrani in da dodatni vložek, ki ga zahtevata kmetijstvo in predelava, pogosto izniči večino pridobljene energije (slika 6.14) – biogoriva iz rastlin v evropski državi, kot je Velika Britanija, zagotavljajo tako majhno moč, da po mojem mnenju o njih skoraj ni vredno izgubljati besed.

Opombe in dodatno branje

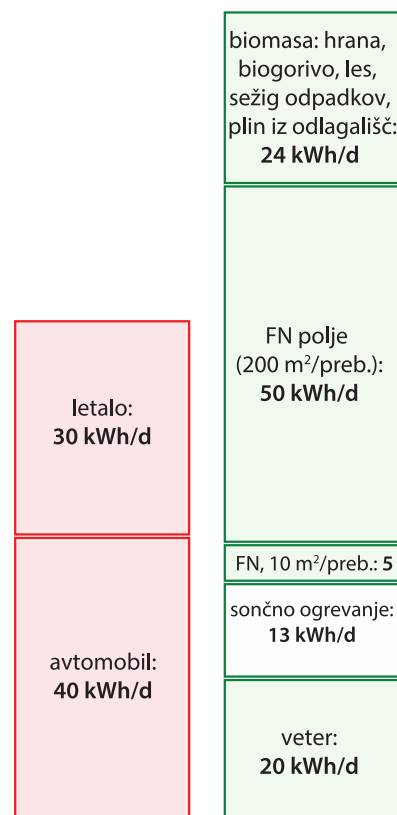
stran

38 Všteti moramo kot med sončnimi žarki in površino Zemlje [...].

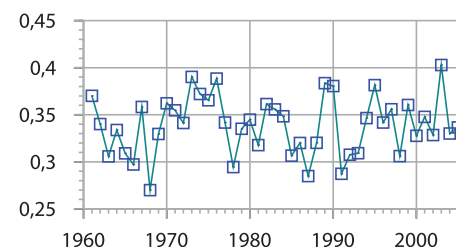
Zemljepisna širina Cambridgea je $\theta = 52^\circ$; jakost opoldanskega sonca se pomnoži s $\cos \theta \simeq 0,6$. Natančni faktor je odvisen od časa leta in se giblje med $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,26$ in $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,87$.

- Na tipični britanski lokaciji sonce sveti tretjino vseh ur z dnevno svetlobo. Škotsko višavje ima 1100 h sonca na leto – 25-odstotno osončenost. Najboljši deli Škotske imajo 1400 h na leto – 32 %. Cambridge: 1500 ± 130 h na leto – 34 %. Južna obala Anglije (najbolj sončen del Velike Britanije): 1700 h na leto – 39 %.

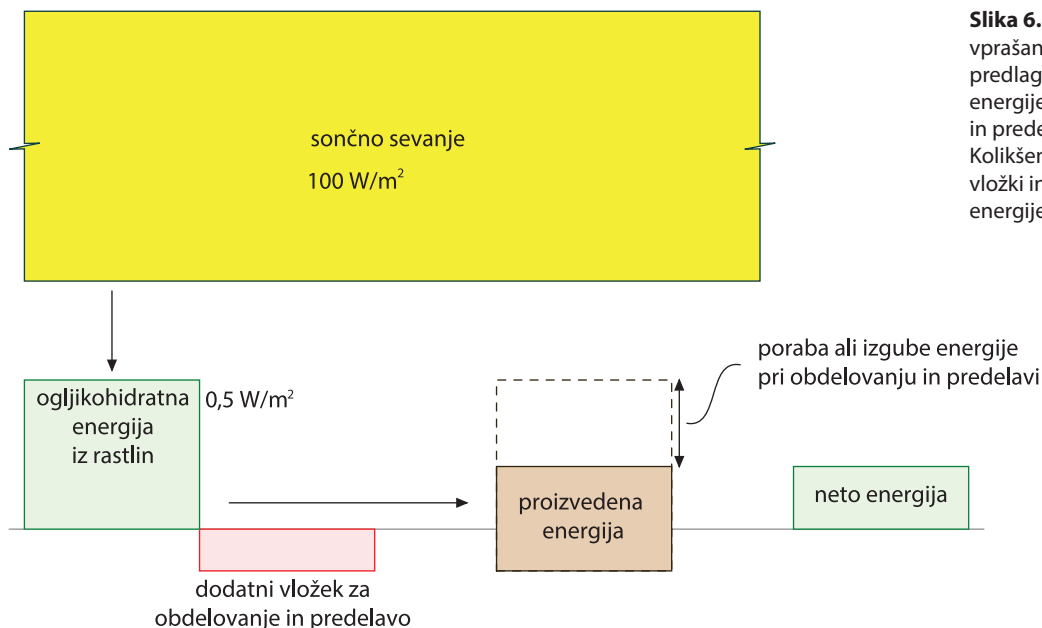
[2rq1oc] Vir podatkov za Cambridge: [2szckw]. Glejte tudi sliko 6.16.



Slika 6.12 Biomasa na sončni pogon, ki vključuje vse vrste biogoriva, sežiganje odpadkov in hrano: 24 kWh/d na prebivalca.



Slika 6.13 Osončenost Cambridgea: količina ur sončnega obsevanja na leto, izražena kot delež skupne količine ur z dnevno svetlobo.

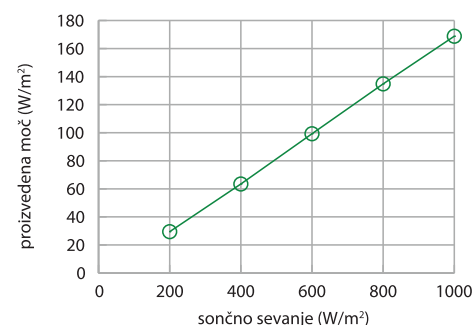


Slika 6.14 Shema ponazarja kvantitativna vprašanja, ki si jih je treba zastaviti za vsako predlagano biogorivo. Koliko dodatne energije je treba vložiti za obdelovanje zemlje in predelavo? Koliko energije se proizvede? Kolikšen je *neto* izkupiček energije? Dodatni vložki in izgube pogosto izničijo večino energije, ki jo rastline proizvedejo.

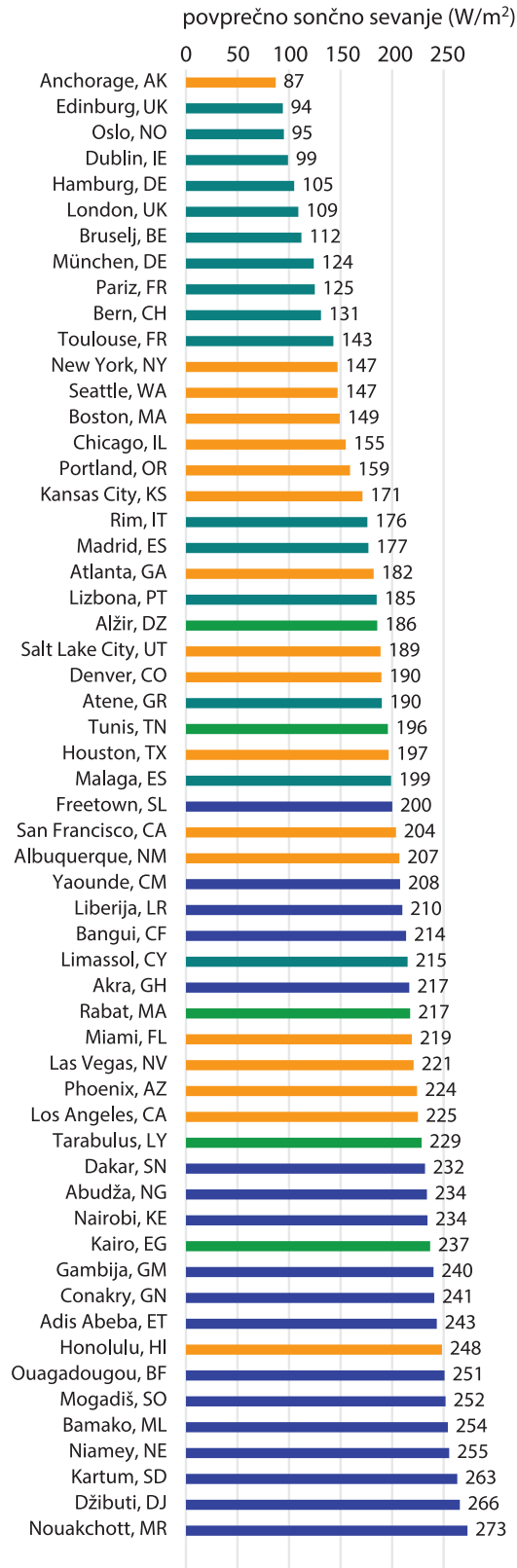
38 Povprečna »surova« moč sonca na kvadratni meter britanske strehe, obrnjene proti jugu, je približno 110 W/m^2 , povprečna moč na kvadratni meter ravnega zemljišča pa približno 100 W/m^2 . Vir: Nasa »Surface meteorology and Solar Energy« [5hrx1s]. Vas preseneča, da je razlika med nagnjeno streho, obrnjeno proti jugu, in vodoravno streho tako majhna? Mene je. Razlika je samo 10 % [6z9epq].

39 /.../ to bi pomenilo približno 10 m^2 SSE na osebo. Površino proti jugu obrnjenih streh na prebivalca sem ocenil tako, da sem vzel pozidano površino na prebivalca (v Angliji 48 m^2 – tabela I.6), jo pomnožil z $\frac{1}{4}$, da sem dobil delež streh, obrnjenih proti jugu, in zaradi nagiba strehe povečal površino za 40 %. Tako dobimo 16 m^2 na prebivalca. SSE so običajno neugodne velikosti, zato bo del strehe ostal nepokrit; od tod torej 10 m^2 .

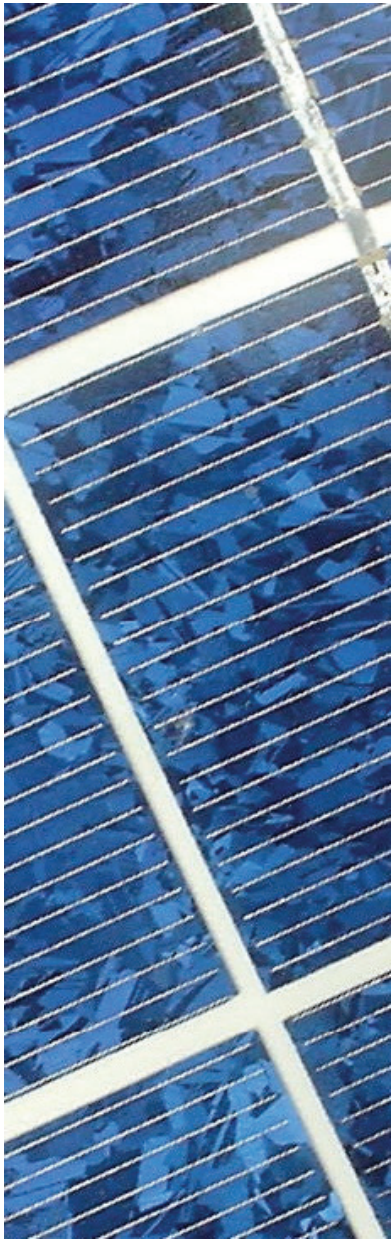
– **Sončne elektrarne bi v povprečju proizvedle /.../** Kroži mit o tem, da sončne elektrarne v oblačnem vremenu proizvedejo skoraj toliko električne energije kot ob sončnem. To preprosto ne drži. Na svetel, a oblačen dan, sončne elektrarne resda še naprej pretvarjajo energijo, toda veliko manj: ko se sonce skrije za oblake, se fotonapetostna proizvodnja zmanjša za približno desetkrat (saj se za desetkrat zmanjša jakost sončnega obsevanja). Kot prikazuje slika 6.15, je energija, ki jo pridobivajo sončne elektrarne, skoraj linearno odvisna od jakosti sončnega obsevanja – vsaj pri 25°C . Da bi bila stvar še bolj zapletena, je proizvodnja energije odvisna tudi od temperature in je pri toplejših celicah in posledično modulih manjša (izguba je običajno 0.38 % na $^\circ\text{C}$) –, a če pogledamo podatke konkretnih elektrarn, na primer na www.solarwarrior.com, lahko potrdimo bistvo: izkupiček na oblačen dan je *veliko manjši* kot na sončen dan. Zmedo povzročajo zagovorniki sončnih elektrarn, ki razpravljajo o tem, kako se »učinkovitost« spreminja s sončnim sevanjem. »Elektrarne so učinkovitejše v oblačnem vremenu,« pravijo; to je morda že res, vendar učinkovitosti ne smemo zamenjevati s proizvedeno električno energijo.

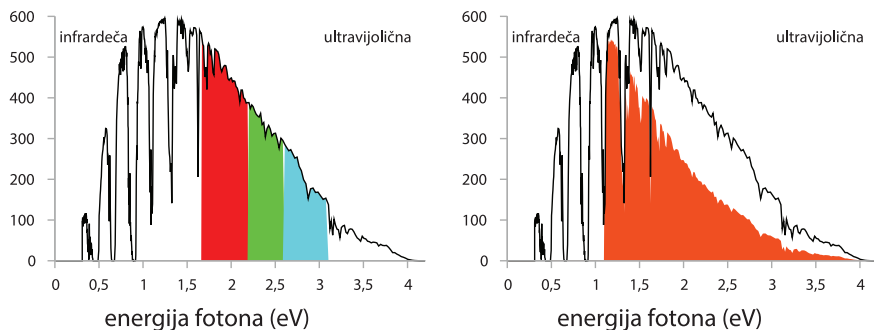


Slika 6.15 Električna moč, ki jo zagotovi modul Sanyo HIP-210NKHE1, kot funkcija jakosti sevanja (pri 25°C ob predpostavki, da je izhodna napetost 40 V). Vir: preglednica www.sanyo-solar.eu.



Slika 6.16 Povprečna energija iz sončnega sevanja na vodoravno površino na izbranih lokacijah v Evropi, Severni Ameriki in Afriki.





39 *Tipične sončne elektrarne imajo približno 10-odstotni izkoristek; dražje 20-odstotnega.* Glejte sliko 6.18. Viri: Turkenburg (2000), Sunpower www.sunpowercorp.com, Sanyo www.sanyo-solar.eu, Suntech.

– *Naprava z več kot 30-odstotnim izkoristkom bi bila nekaj izjemnega.* Gre za citat Hopfielda in Golluba (1978), ki sta pisala o elektrarnah brez koncentriranja sevanja s pomočjo zrcal ali leč. Po Shockley-Queisserjevi teoretični meji za modul s standardnimi »enospojnim« fotonapetostnimi celicami in brez uporabe koncentradorjev lahko v električno energijo pretvorimo največ 31 % energije iz sončnega sevanja (Shockley in Queisser 1961). (Glavni razlog za to omejitev je, da ima standardni fotonapetostni material lastnost, ki ji pravimo energijska reža, ta pa predvideva določeno energijo fotona, ki jo material najučinkoviteje pretvori. Sončno sevanje vsebuje fotone različnih energij; fotoni z energijo, *manjšo* od energijske reže, se sploh ne porabijo, fotoni, ki imajo *večjo* energijo od energijske reže, pa se zajamejo, vendar se ves njihov presežek energije izgubi.) Koncentratorji (leče ali zrcala) lahko zmanjšajo strošek (na moč) fotonapetostnega sistema in hkrati povečajo njegov izkoristek. Shockley-Queisserjeva meja za izkoristek sončnih modulov s koncentratorji je 41 %. Presežemo jo lahko edino z »nobel« fotonapetostnimi napravami, ki svetlobo razcepijo na različne valovne dolžine in vsak niz valovnih dolžin obdelajo z njemu prilagojeno energijsko režo. Pravimo jim večspojne. V zadnjem času so poročali o 40-odstotnem izkoristku večspojnih fotonapetostnih naprav z optičnimi koncentratorji. [2t17t6], www.spectrolab.com. Julija 2007 so na univerzi Delaware poročali o 42,8-odstotnem izkoristku z 20-kratno koncentracijo [6hobq2], [21sx6t]. Avgusta 2008 so pri NREL poročali o 40,8-odstotnem izkoristku s 326-kratno koncentracijo [62ccou]. Nenavadno je, da so oba rezultata razglasili za svetovni rekord učinkovitosti. In kakšne večspojne naprave so na voljo na tržišču? Uni-solar prodaja tankoplastne trispojne 58-vatne (vršna moč) elektrarne s površino 1 m². To pri polni sončni osvetlitvi pomeni samo 5,8-odstotni izkoristek.

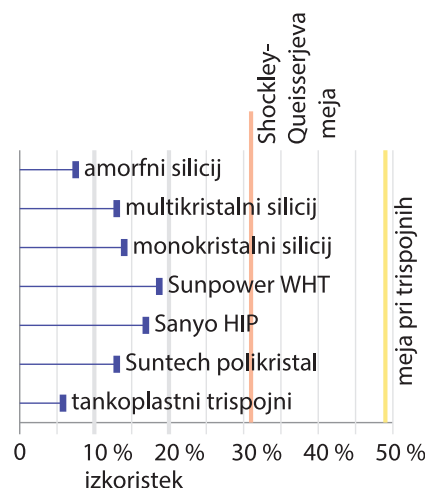
40 *Slika 6.5: Podatki o sončnih elektrarnah.* Podatke in fotografije je prijazno prispeval Jonathan Kimmitt.

– *Heliodynamics* – www.hdsolar.com. Glejte sliko 6.19. Podoben sistem izdelujejo pri Arontis www.arontis.se.

41 *Solarpark v Mühlhausnu na Bavarskem.* Povprečna moč te 25-hektarske elektrarne naj bi bila 0,7 MW (17.000 kWh na dan). Postaja podzemne železnice na Stillwell Avenue v New Yorku ima na nadstrešku nameščene amorfne silicijeve tankoplastne sončne celice, ki zagotavljajo 4 W/m² (Fies in sod. 2007).

Slika 6.17 Kako sta Shockley in Queisser pojasnila 31-odstotno mejo izkoristka preprostih fotonapetostnih sistemov. Levo: spekter opoldanske sončne svetlobe. Ordinatna os prikazuje obsevanje v W/m², na abscisi pa je prikazana skala eV spektralnega intervala. Vidni del spektra je obarvan. Desno: rdeče obarvano območje prikazuje energijo, ki jo zajame fotonapetostna naprava z energijsko režo 1,1 eV. Fotoni, katerih energija je manjša od energijske reže, se izgubijo. Izgubi se tudi nekaj energije fotonov nad energijsko režo; na primer polovica energije vsakega fotona z 2,2 eV.

Do dodatnih izgub prihaja še zaradi neizbežnega sevanja ob rekombinaciji nabojev v fotonapetostnem materialu.



Slika 6.18 Izkoristek fotonapetostnih modulov, ki jih prodajajo danes. V besedilu predpostavljam, da imajo strešne sončne elektrarne 20-odstotni izkoristek in da bi elektrarne na tleh imele 10-odstotni izkoristek. Na lokaciji, kjer je povprečno obsevanje 100 W/m², elektrarne z 20-odstotnim izkoristkom zagotovijo 20 W/m².

Sončna elektrarna Nellis v Nevadi je bila zgrajena decembra 2007. Razprostira se na 57 hektarih in proizvedla naj bi 30 GWh na leto. To je 6 W/m^2 [5hzs5y]. Sončna elektrarna Serpa na Portugalskem, »najmočnejša sončna elektrarna na svetu« [39z5m5] [2uk8q8], se z moduli, ki sledijo soncu, razprostira na 60 hektarih, kar je 600.000 m^2 ali $0,6 \text{ km}^2$, njena proizvodnja pa naj bi bila 20 GWh na leto, kar je v povprečju 2,3 MW. To pomeni $3,8 \text{ W/m}^2$.

41 *Solarne zmogljivosti, ki bi jih potrebovali za teh 50 kWh na dan na prebivalca Velike Britanije, so več kot 100-krat večje od vseh fotonapetostnih zmogljivosti na svetu.* Za 50 kWh/d na prebivalca Velike Britanije bi potrebovali povprečno moč 125 GW, kar pomeni 1250 GW zmogljivosti. Konec leta 2007 je največja moč vseh nameščenih fotonapetostnih zmogljivosti na svetu znašala 10 GW, na leto se obseg poveča za približno 2 GW.

– */.../ da bi 5 % Velike Britanije prekrili s sončnimi elektrarnami se zdi tako zelo neverjetno.* Glavni razlog, da se mi zdi takšno prekrivanje države neverjetno, je, da Britanci podeželje raje kot za rejo sončnih elektrarn uporabljajo za kmetovanje in rekreacijo. Druga težava bi utegnila biti cena. To ni knjiga o ekonomiji, a kljub vsemu nekaj števil: glede na ceno bavarske sončne elektrarne bi bil strošek za zagotavljanje 50 kWh/d na prebivalca 91.000 evrov na prebivalca. Če bi elektrarna brez dodatnih stroškov obratovala 20 let, bi bila veleprodajna cena električne energije 0,25 evra na kWh. Več o tem: David Carlson, BP solar [2ahecp].

43 *V Britaniji zavržemo približno 300 g hrane na dan na prebivalca.* Vir: Ventour (2008).

– */.../ Slika 6.10.* V ZDA iz miskanta, gojenega brez dušikovega gnojila, pridobijo približno 24 t/ha/leto suhe snovi. V Veliki Britaniji poročajo o donosu v obsegu 12–16 t/ha/leto. Neto kalorična vrednost suhega miskanta je 17 MJ/kg, zato britanski donos ustreza specifični moči $0,75 \text{ W/m}^2$. Vira: Heaton in sod. (2004) in [6kqq77]. Ocenjeni donos je dosežen šele po treh letih nemočenega gojenja.

– *Najučinkovitejše rastline v Evropi imajo približno 2-odstotni izkoristek, vendar je njihova moč na enoto površine približno $0,5 \text{ W/m}^2$.* Pri nizkem obsevanju imajo najboljše britanske rastline na dobro pognojenih poljih 2,4-odstotni izkoristek (Monteith 1977), pri višjih vrednostih pa njihova učinkovitost pretvarjanja upade. Turkenberg (2000) ter Schiermeier in sod. (2008) navajajo, da je izkoristek pri pretvarjanju sončne energije v energijo biomase manj kot 1-odstoten.

Naj navedem nekaj virov v podporo moji oceni rastlinske moči v Veliki Britaniji ($0,5 \text{ W/m}^2$). Pri Kraljevi komisiji za onesnaženje okolja so površinsko specifično moč energijskih rastlin v Veliki Britaniji ocenili na $0,2 \text{ W/m}^2$ (Royal Commission on Environmental Pollution 2004). Na strani 43 dokumenta Kraljeve družbe o biogorivih (Royal Society working group on bio-fuels 2008) je na vrhu seznama miskant, ki zagotavlja približno $0,8 \text{ W/m}^2$ potencialne moči.

V Oceni svetovne energije, ki jo izdaja UNDP, Rogner (2000) zapiše: »Če predpostavimo 45-odstotni izkoristek pri pretvarjanju v električno energijo in donos v višini 15 ton suhe snovi na hektar na leto, bi potrebovali 2 km^2 nasada za megavat elektrike iz naprave, ki bi delovala 4000 ur na leto.«



Slika 6.19 Fotonapetostna naprava podjetja Heliodynamics s soproizvodnjo toplote in električne energije. 32 m^2 odsevne površine (nekoliko več, kot meri stranica dvanadstropnega avtobusa) proizvaja 10 kW toplote in 1,5 kW električne moči. V državi, ki leži v sončnem pasu, bi s takšno enotonsko napravo lahko zagotovili približno 60 kWh/d toplote in 9 kWh/d elektrike. To ustreza povprečnim specifičnim močem 80 W/m^2 za toploto in 12 W/m^2 za elektriko (na kvadratni meter površine naprave); ti so podobni, kot jih zagotavljajo standardni SSE in sončne elektrarne, vendar pa naprave podjetja Heliodynamics po zaslugi koncentradorjev proizvajajo energijo po nižji ceni, saj večino materiala predstavlja preprosto ravno steklo. Za primerjavo: skupna poraba povprečnega Evropejca je 125 kWh/d .

To pomeni moč na enoto površine $0,23 \text{ We/m}^2$. (1We pomeni 1 vat električne moči.)

Podjetje Energy for Sustainable Development Ltd (2003) ocenjuje, da lahko mlad gozd s kratko rotacijo zagotavlja več kot 10 ton suhega lesa na hektar na leto, kar ustreza specifični moči $0,57 \text{ W/m}^2$. (Kalorična vrednost suhega lesa je 5 kWh na kg.)

Archer in Barber (2004) navajata, da se zdajšnji izkoristek zdravega lista v optimalnih pogojih lahko približa 5 %, dolgoročni izkoristek shranjevanja energije pa je pri sodobnih posevkih 0,5–1 %. Po mnenju Archerjeve in Barberja bi bilo z gensko spremembo mogoče povečati izkoristek pri shranjevanju energije pri rastlinah, predvsem pri C4 rastlinah, ki so že naravno razvile učinkovitejši tip fotosinteze. C4 rastline so večinoma v tropih in uspevajo pri visokih temperaturah; pri temperaturah, nižjih od 10°C , ne rastejo. Mednje prištevamo sladkorni trst, koruzo, sirek, indijsko prosenko in trajno proso. Zhu in sod. (2008) so izračunali, da je teoretična meja za izkoristek pri pretvorbi iz sončne energije v biomaso 4,6 % za C3 fotosintezo pri 30°C in sedanji koncentraciji CO_2 v atmosferi, ki je 380 ppm, in 6 % za C4 fotosintezo. Največji ugotovljeni izkoristek pri pretvorbi sončne energije za C3 in C4 posevke je po njihovih navedbah 2,4 % oz. 3,7 %; po Boyerju (1982) pa navajajo še, da je povprečni izkoristek pogostejših posevkov v ZDA 3- ali 4-krat manjši od teh rekordnih vrednosti (kar pomeni približno 1 %). Rastline teoretične meje med drugim ne dosežejo zaradi omejene sposobnosti uporabe vsega vstopnega sončnega sevanja. Oba omenjena članka (Zhu in sod. 2008, Boyer 1982) govorita o možnostih genskega inženiringa za pridobitev učinkovitejših rastlin.

- 43 *Slika 6.11.* Viri številčnih podatkov na sliki: Rogner (2000) (neto energijski donos lesa, ogrščice, sladkornega trsta in tropskih plantaž), Bayer Crop Science (2003) (ogrščica za biodizelsko gorivo); Francis in sod. (2005) ter Asselbergs in sod. (2006) (jatropha); Mabee in sod (2006) (sladkorni trst, Brazilija); Schmer in sod. (2008) (trajno proso, marginalne obdelovalne površine v ZDA); Shapouri in sod. (1995) (koruza za etanol); Royal Commission on Environmental Pollution (2004); Royal Society working group on biofuels (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer in Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).
- 44 *Celo pri sežiganju suhega lesa v dobrem kotlu se 20 % toplote izgubi v dimniku.* Vir: Royal Society working group on biofuels (2008); Royal Commission on Environmental Pollution (2004).

7 Ogrevanje in hlajenje

V tem poglavju raziskujemo, koliko energije porabimo za uravnavanje temperature našega bivalnega okolja – doma in v službi – ter gretje ali hlajenje hrane, pijače, perila in umazane posode.

Ogrevanje sanitarne vode

Doma največ tople vode porabimo za kopanje, prhanje, pomivanje posode ali pranje perila – odvisno od našega življenjskega sloga. Ocenimo najprej, koliko energije porabimo za vročo kopel.

Prostornina vode za kopel je $50\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 150\text{ cm} \simeq 110$ litrov. Temperatura kopeli naj bo $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, vode, ki jo dobimo v hišo, pa $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Specifična toplota vode, ki znaša 4200 J na liter in na $^{\circ}\text{C}$, nam pove, koliko energije potrebujemo, da en liter vode ogrejemo za eno stopinjo. Za ogrevanje vode za $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ torej potrebujemo naslednjo količino energije:

$$4200\text{ J}/(\text{liter} \times ^{\circ}\text{C}) \times 110\text{ litrov} \times 40\text{ }^{\circ}\text{C} \simeq 18\text{ MJ} \simeq 5\text{ kWh}.$$

Za kopel porabimo približno **5 kWh**. Za primerjavo: za prho (30 litrov) porabimo približno **1,4 kWh**.

Grelniki, štedilniki in kuhalne plošče

Velika Britanija je civilizirana država z običajno omrežno napetostjo 230 voltov. Ob takšni elektroenergetski oskrbi lahko z električnim grelnikom nekaj litrov vode segrejemo v nekaj minutah. Grelniki imajo moč 3 kW. Zakaj 3 kW? Ker je to največja moč, ki jo lahko prenese 230-voltna vtičnica, ne da bi tok presegel največjo dovoljeno vrednost, ki je 13 amperov. V državah s 110-voltno napetostjo priprava skodelice čaja traja dvakrat dlje.

Če je grelnik v gospodinjstvu prižgan 20 minut na dan, to pomeni povprečno porabo **1 kWh na dan**. (Naslednjih nekaj postavk bom izračunal »na gospodinjstvo« z dvema osebama.)

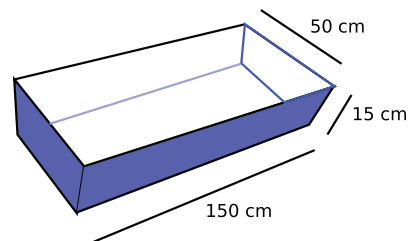
Moč ene male plošče električnega kuhalnika je enaka moči opekača: 1 kW. Zmogljivejši kuhalniki dosežejo 2,3 kW. Če dve plošči kuhalnika pri največji moči uporabljate pol ure na dan, to pomeni **1,6 kWh na dan**.

Moč mikrovalovne pečice je običajno označena na prednji strani: moja pravi 900 W, za delovanje pa v resnici potrebuje približno 1,4 kW. Če mikrovalovno pečico uporabljate 20 minut na dan, to pomeni **0,5 kWh na dan**.

Običajna električna pečica požre več: pri največji moči potrebuje približno 3 kW. Če pečico uporabljate eno uro na dan in polovico tega časa deluje pri največji moči, to pomeni **1,5 kWh na dan**.



Slika 7.1 Gruča novih hiš.



Slika 7.2 Kad vode.

$$230\text{ V} \times 13\text{ A} = 3000\text{ W}$$

mikrovalovna
pečica: 1400 W
(nazivna moč)

hladilnik z
zamrzovalnikom:
100 W (nazivna
moč),
18 W (povprečje)



Slika 7.3 Poraba električne energije aparatov za gretje in hlajenje.

aparat	moč	ur na dan	energije na dan
kuhanje			
- grelnik	3 kW	1/3 h	1 kWh/d
- mikrovalovna pečica	1,4 kW	1/3 h	0,5 kWh/d
- električni kuhalnik (plošče)	3,3 kW	1/2 h	1,6 kWh/d
- električna pečica	3 kW	1/2 h	1,5 kWh/d
čiščenje			
- pralni stroj	2,5 kW		1 kWh/d
- sušilni stroj	2,5 kW	0,8 h	2 kWh/d
- sušenje v sušilnici			0,5 kWh/d
- sušenje na vrvi			0 kWh/d
- pomivalni stroj	2,5 kW		1,5 kWh/d
hlajenje			
- hladilnik	0,02 kW	24 h	0,5 kWh/d
- zamrzovalnik	0,09 kW	24 h	2,3 kWh/d
- klimatska naprava	0,6 kW	1 h	0,6 kWh/d

Gretje perila in posode

Pralni stroj, pomivalni stroj in sušilni stroj imajo vsak po približno 2,5 kW moči.

Pralni stroj porabi približno 80 litrov vode na pranje, poraba energije pa je pri temperaturi 40 °C približno 1 kWh. Če namesto sušilnega stroja za sušenje perila uporabljamo sušilnico, za izhlapevanje vode še vedno potrebujemo toploto – namesto 3 kWh približno 1,5 kWh za sušenje enega pranja.

Če vržemo skupaj ocene, ki se nanašajo na toplo vodo, mislim, da zlahka porabimo približno **12 kWh na dan na prebivalca**.

Ogrevanje zraka – doma in v službi

Porabimo več energije za segrevanje vode in hrane ali za ogrevanje zraka s pomočjo radiatorjev?

Količino energije, ki jo na dan porabimo za ogrevanje zraka, bomo lažje ocenili, če si zamislimo, da stavbo ogrevamo z električnimi grelci, pri katerih si vrednosti lažje predstavljamo. Moč majhnega električnega grelca ali kaloriferja je 1 kW (24 kWh na dan). Pozimi boste najbrž potrebovali enega na osebo, da vam bo prijetno. Poleti pa nobenega. To pomeni, da mora sodobni človek za tople zrak v povprečju porabiti 12 kWh na dan. A večina ljudi porabi več, kot je treba, saj ogrevajo več prostorov hkrati (recimo kuhinjo, dnevni prostor, hodnik in kopalnico). Verjetna poraba je potemtakem dvakrat večja: **24 kWh na dan na prebivalca**.

Spremljevalno poglavje E vsebuje natančnejšo razlago, kam gre toplota v stavbi. S pomočjo tega modela lahko predvidimo, koliko toplote prihranimo z zmanjšanjem temperature na termostatu, dvojno zasteklitvijo in tako naprej.

Tabela 7.4 Poraba energije aparatov za gretje in hlajenje na gospodinjstvo.

ogrevanje vode:
12 kWh/d

Slika 7.5 Skupna poraba za ogrevanje vode doma in v službi – vključno s kopanjem, prhanjem, pranjem perila, kuhališči, grelniki, mikrovalovnimi pečicami in pomivanjem posode – je približno 12 kWh na dan na prebivalca. Polja nisem obarval, kar pomeni, da gre za toploto, ki ima manjšo uporabno vrednost.



Slika 7.6 Velik električni grelec: 2 kW.

Ogrevanje zunanjih prostorov in drugo razkošje

Ogrevanje zunanjih prostorov z vrtnimi grelci je čedalje bolj priljubljeno. Moč tipičnega vrtnega grelca je 15 kW. Če ga vsak večer uporabljate nekaj ur, porabite dodatnih **30 kWh na dan**.

Nekoliko skromnejše razkošje je električna grelna odeja. Takšna za zakonsko posteljo potrebuje 140 W, z enourno rabo porabimo **0,14 kWh**.

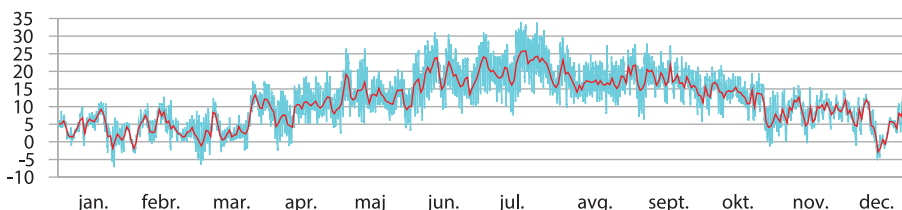
Hlajenje

Hladilnik in zamrzovalnik

Temperature ne uravnavamo samo pri topli vodi in toplem zraku, s katerima se obdamo, temveč tudi v hladilnikih, ki jih postavimo v naše toplo bivališče. Moj hladilnik z zamrzovalnikom, ki ga vidite na sliki 7.3, za delovanje potrebuje povprečno moč 18 W – tako porabi približno 0,5 kWh/d.

Klimatizacija

V državah, kjer se temperatura povzpne nad 30 °C, hlajenje s klimatskimi napravami velja za nujo, poraba energije zaradi uravnavanja temperature pa utegne biti velika. Toda ta del knjige govori o porabi energije v Veliki Britaniji in ob britanskih temperaturah prav velike potrebe po klimatskih napravah ni.



Slika 7.8 Temperatura v Cambridgeu v stopinjah Celzija, dnevne (rdeča črta) in polurne vrednosti (modra črta) za leto 2006.

Gospodaren način klimatizacije je toplotna črpalka zrak/voda. Električna klimatska naprava za en prostor, nameščena na okno, za delovanje potrebuje 0,6 kW, njena moč hlajenja (z izmenjevalcem toplote) pa je 2,6 kW. Za oceno, koliko energije bi utegnili porabiti v Veliki Britaniji, sem predpostavil, da bi takšno napravo vklopili za približno 12 ur na dan 30 dni na leto. Na dan, ko je vklopljena, porabi 7,2 kWh. Povprečna poraba v celotnem letu je **0,6 kWh/d**.

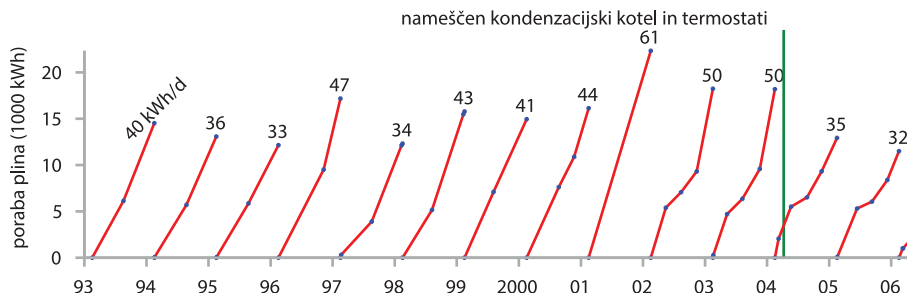
Ocena tega poglavja za porabo energije hlajenja – 1 kWh/d na prebivalca – vključuje klimatizacijo in gospodinjske aparate za hlajenje. Naša družba hrano hladi tudi na poti od polja do nakupovalne košarice. Porabo energije prehranske verige bom ocenil pozneje, v 15. poglavju.

ogrevanje zraka:
24 kWh/d

Slika 7.7 Skupna poraba za ogrevanje zraka – vključno z ogrevanjem doma in poslovnega prostora – je približno 24 kWh na dan na prebivalca.

hlajenje: **1 kWh/d**

Slika 7.9 Skupna poraba za hlajenje – vključno s hladilno-zamrzovalnimi aparati in nekaj poletne klimatizacije – je 1 kWh/d.



Skupne vrednosti ogrevanja in hlajenja

Groba ocena skupne energije, ki naj bi jo človek porabil za ogrevanje in hlajenje, tako doma kot v službi, ter za kuhanje, je **37 kWh/d na prebivalca** (12 za ogrevanje vode, 24 za ogrevanje zraka in 1 za hlajenje).

Dokaz, da je ta ocena v pravih mejah ali morda bolj pri spodnji meji, je moja domača poraba plina, ki je bila 12 let v povprečju 40 kWh na dan (slika 7.10). Tedaj sem mislil, da sem pri ogrevanju dokaj varčen, nisem pa pazil na dejansko porabo energije. V 21. poglavju bom razkril, koliko energije sem prihranil, ko sem začel paziti.

Glede na to, da je ogrevanje močna postavka v stolpcu porabe, primerjajmo mojo oceno z državno statistiko. V državnem merilu je bila leta 2000 povprečna *domača* poraba za ogrevanje prostorov, vode in kuhanje 21 kWh na dan na prebivalca, za ogrevanje, hlajenje, pripravo hrane in toplo vodo v *storitvenem sektorju* pa 8,5 kWh/d na prebivalca. Za oceno ogrevanja poslovnih prostorov vzemimo porabo plina Univerze v Cambridgeu v obdobju 2006–2007: 16 kWh/d na zaposlenega.

Če vržemo skupaj te tri številke, je druga ocena nacionalne potrošnje za potrebe ogrevanja naslednja: $21 + 8,5 + 16 \simeq 45$ kWh/d na prebivalca, če je Univerza v Cambridgeu tipično delovno okolje. Lepo, to je pomirjujoče blizu naši prvi oceni, 37 kWh/d.

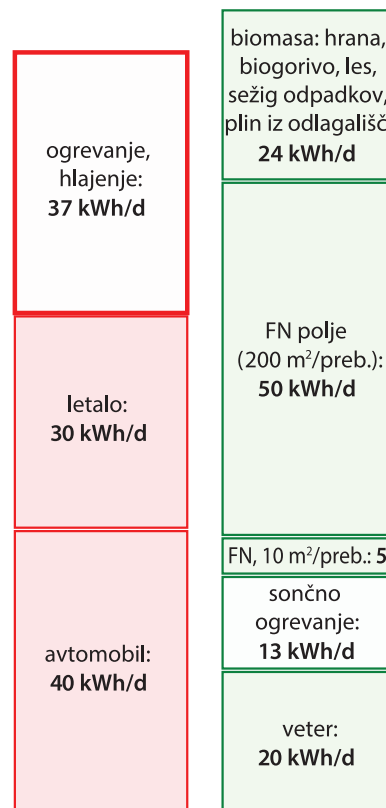
Opombe in dodatno branje

stran

- 50 *Pečica potrebuje 3 kW.* Seveda je moč lahko različna. Pri številnih pečicah je največja moč 1,8 kW ali 2,2 kW. Najiminitnejše imajo moč kar 6 kW. Za primer: set Whirlpool AGB 487/WP 4 Hotplate Electric Oven Range ima 5,9-kilovatno pečico in štiri 2,3-kilovatne plošče.
www.kcmltd.com/electric_oven_ranges.shtml
www.1stforkitchens.co.uk/kitchenovens.html

- 51 *V sušilnici se porabi približno 1,5 kWh za sušenje enega pranja.* To sem izračunal tako, da sem stal svoj perilo: eno pranje, ki je suho tehtalo 4 kg, je iz mojega Boschevega pralnega stroja prišlo 2,2 kg težje (celo po temeljitem nemškem centrifugiranju). Izparilna toplota vode pri 15 °C je približno 2500 kJ/kg. Za dnevno vrednost v tabeli 7.4 sem predpostavil, da človek vsake tri dni enkrat pere perilo in da to izsesava dragoceno toploto iz hiše v hladni

Slika 7.10 Moja domača kumulativna poraba plina v kWh vsako leto od 1993 do 2005. Vrednost na vrhu vsake letne črte pomeni povprečno vrednost porabe energije v kWh na dan. Če vas zanima, kaj se je zgodilo leta 2007, berite dalje!



Slika 7.11 Ogrevanje in hlajenje – približno 37 enot na dan na prebivalca. Tega polja nisem osenčil, kar pomeni, da gre za toploto, ki ima manjšo uporabno vrednost.

polovici leta. (Poleti uporaba sušilnice prispeva nekaj k hlajenju, saj voda ob izhlapevanju hladi zrak v hiši.)

- 53 *V državnem merilu je bila povprečna domača poraba 21 kWh/d na prebivalca, v storitvenem sektorju pa 8,5 kWh/d na prebivalca.* Vir: Dept. of Trade and Industry (2002a).
- *Poraba plina Univerze v Cambridgeu je bila v obdobju 2006–2007 16 kWh/d na zaposlenega.* Poraba plina in nafte Univerze v Cambridgeu (brez fakultet) je bila v obdobju 2006–2007 76 GWh. Sklenil sem, da je univerza delovno mesto za 13.300 ljudi (8602 članov osebja in 4667 podiplomskih raziskovalcev). Mimogrede, poraba elektrike je bila 99,5 GWh. Vir: poročilo univerze o komunalnih storitvah.

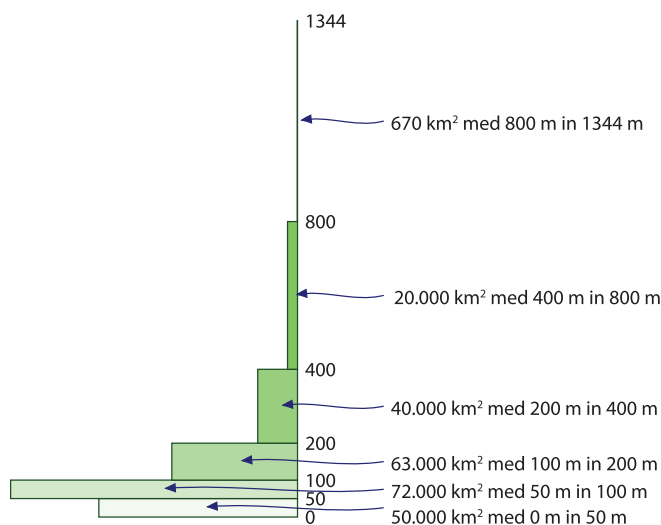
8 Hidroenergija

Za pridobivanje energije s pomočjo vode potrebujemo višinsko razliko in padavine. Ocenimo skupno energijo vseh padavin na njihovi poti iz višjeležečih krajev do morske gladine.

Za to hidroenergijsko napoved bom Veliko Britanijo razdelil na dvoje: nižjeležeče, bolj suhe predele, ki jih bom imenoval »nižavje«, in višjeležeče, bolj mokre predele, ki jih bom imenoval »višavje«. Za predstavnika teh dveh regij bom izbral Bedford in Kinlochewe.

Poglejmo najprej nižavje. Če hočemo oceniti potencialno gravitacijsko moč nižavskega dežja, količino padavin v Bedfordu (584 mm na leto) pomnožimo z gostoto vode (1000 kg/m^3), gravitacijsko konstanto (10 m/s^2) in tipično nadmorsko višino nižavja (naj bo 100 m). Specifična moč je tako $0,02 \text{ W/m}^2$. Gre za moč hidroenergije na enoto površine zemljišča, na katerega pade dež.

Ko to pomnožimo s površino na prebivalca (2700 m^2 , če nižavje enakomerno porazdelimo med vseh 60 milijonov Britancev), dobimo povprečno »surovo« moč, ki znaša približno 1 kWh na dan na prebivalca. To bi bila absolutna zgornja meja za nižinsko hidroenergijo v primeru, da zajezimo vse reke in popolnoma izkoristimo vsako kapljico. V praksi lahko zajezimo samo reke z zadostnim višinskim padcem, prispevne površine pa še zdaleč ne obsegajo vse države. Večina vode izhlapi precej prej, preden doseže turbino, in noben hidroenergetski sistem ne izkorišča polnega potenciala energije vode. Tako pridemo do naslednjega sklepa o nižinski hidroenergiji: že mogoče, da ljudje radi gradijo pretočne in druge male hidroelektrarne, vendar takšni nižinski sistemi nikoli ne morejo proizvesti več kot 1 kWh na dan na prebivalca.



Poglejmo še višavje. Kinlochewe je bolj deževen: na leto prejme 2278 mm padavin, štirikrat več kot Bedford. Tudi višinski padci so tam večji –



Slika 8.1 Jez Nant-y-Moch, ki je del 55-megavatne hidroelektrarne v Walesu. Foto: Dave Newbould, www.origins-photography.co.uk.



Slika 8.2 Nadmorske višine v Veliki Britaniji. Polja ponazarjajo količino ozemlja na določeni nadmorski višini.

nadmorska višina je pogosto višja od 300 m. Pri goratih predelih torej lahko specifično moč na površino realno povečamo za dvanajstkrat, kar pomeni približno 0,24 W/m². Če višavje svojo hidroenergijo velikodušno deli s preostalo Veliko Britanijo (s 1300 m² površine na prebivalca), je zgornja meja približno 7 kWh na dan na prebivalca. Velja enako kot pri nižavju: gre za zgornjo mejo »surove« moči v primeru, da prepovemo izhlapevanje in popolnoma izkoristimo vsako kapljico.

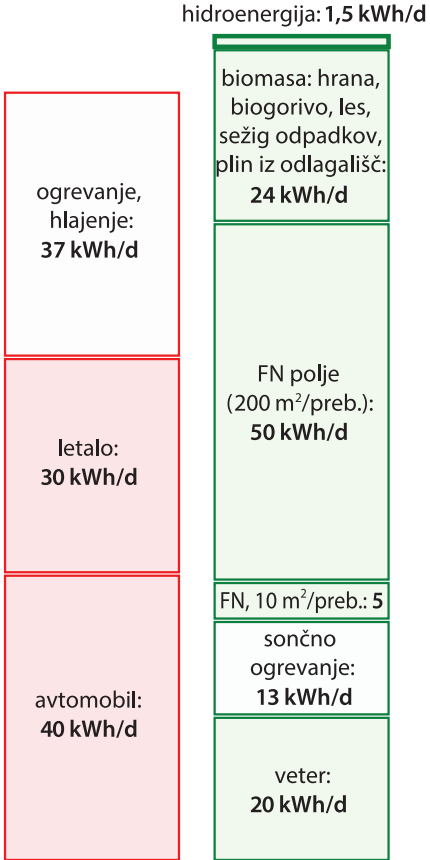
Kakšna naj bi bila realna meja v praksi? Postavimo jo pri 20 odstotkih – 1,4 kWh na dan – in jo zaokrožimo, da vključimo še proizvodnjo v nižavju: 1,5 kWh na dan.

S hidroenergijo v Veliki Britaniji danes proizvedemo 0,2 kWh/d na prebivalca, zato bi za 1,5 kWh/d na prebivalca potrebovali sedemkrat večje hidroenergetske zmogljivosti.

Opombe in dodatno branje

stran

- 55 *Padavine.* Vir statističnih podatkov je BBC-jevo vremensko središče.
- 56 *Specifična moč na površino [višavskega dežja] je približno 0,24 W/m².* To oceno lahko preverimo tako, da jo primerjamo z dejansko specifično močjo hidroenergetskega kompleksa Loch Sloy, ki so ga izgradili leta 1950 (Ross 2008). Površina njegovega prispevnega porečja meri približno 83 km², padavin je približno 2900 mm na leto (nekaj več kot 2278 mm/leto, kolikor jih prejme Kinlochewe). Leta 2006 je bila proizvodnja električne energije 142 GWh na leto, kar pomeni, da je na prispevni površini specifična moč na enoto površine 0,2 W na m². Površina Loch Sloya je približno 1,5 km², zato je v elektrarni sami moč na enoto površine jezera 11 W/m². Brežine in vodovodni sistemi, po katerih voda pride v Loch Sloy, delujejo kot 55-kratni koncentradorji moči.
- *S hidroenergijo v Veliki Britaniji danes proizvedemo 0,2 kWh/d na prebivalca.* Vir: MacLeay in sod. (2007). Leta 2006 smo v velikih hidroelektrarnah proizvedli 3515 GWh (1,37 GW zmogljivosti), v malih hidroelektrarnah pa 212 GWh (0,01 kWh/d na prebivalca) (153 MW zmogljivosti). Leta 1943, ko je bila izgradnja hidroelektrarn v polnem razmahu, so inženirji Severnoškotskega odbora za hidroenergijo ocenili, da bi v škotskem višavju v 102 obratih lahko proizvedli 6,3 TWh na leto – to bi pomenilo 0,3 kWh/d na prebivalca Velike Britanije (Ross 2008). Glendoe, prva velika hidroelektrarna v Veliki Britaniji po letu 1957, bo k skupni zmogljivosti dodala novih 100 MW, proizvedla pa naj bi 180 GWh na leto. Njena prispevna površina meri 75 km², zato je specifična moč te površine 0,27 W na m². Glendoe so oglaševali kot »tako veliko, da bo napajala ves Glasgow«. Toda če njenih 180 GWh na leto porazdelimo med prebivalce Glasgowa (616.000 ljudi), dobimo borih 0,8 kWh/d na prebivalca. To je samo 5 % povprečne porabe električne energije, ki je 17 kWh/d na prebivalca. Pretirani 20-kratnik dobimo, če upoštevamo količino energije, ki bi bila proizvedena pri *maksimalni* zmogljivosti elektrarne, namesto petkrat manjšega *povprečja* in če govorimo o »gospodinjstvih« namesto o skupni porabi električne energije v Glasgowu (glejte str. 329).



Slika 8.3 Hidroenergija.



Slika 8.4 60-kilovatno vodno kolo.

9 Osvetlitev

Razsvetljava doma in v službi

Najmočnejše domače sijalke potrebujejo 250 W, nočne lučke pa 40 W. Pri starih žarnicah z žarilno nitko gre večina električne energije namesto v svetlobo v toploto. Varčna sijalka enako količino svetlobe oddaja s četrtno moči žarnice z žarilno nitko.

Koliko energije za razsvetljavo porabi zmerno premožen človek? Na podlagi tabele 9.2 grobo ocenjujem, da tipično gospodinjstvo dveh oseb z mešanico varčnih in energijsko potratnih žarnic porabi približno 5,5 kWh na dan oz. 2,7 kWh na dan na osebo. Predpostavljam, da ima vsak človek tudi delovni prostor, kjer podobno količino osvetlitve deli s sodelavci. Če ugibamo, da je poraba na delovnem mestu 1,3 kWh/d na prebivalca, dobimo zaokroženo vrednost **4 kWh/d na prebivalca**.

Ulična razsvetljava in semaforji

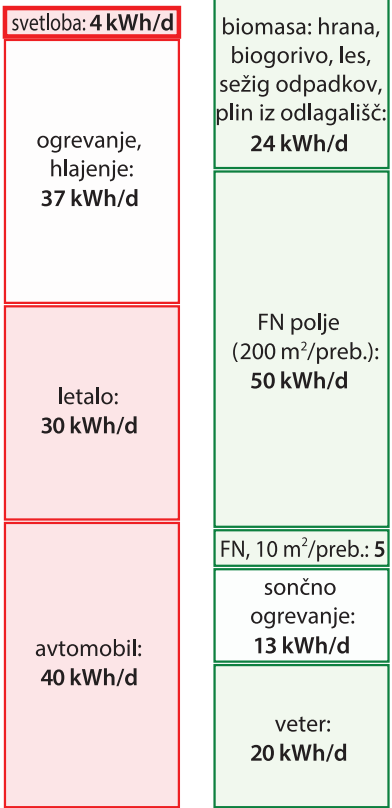
Moramo za točno oceno upoštevati tudi javno razsvetljavo ali dom in delovno mesto sestavljata glavnino proračuna za razsvetljavo? Ulične svetilke v resnici porabijo približno 0,1 kWh na dan na prebivalca, semaforji pa samo 0,005 kWh/d na prebivalca, kar je glede na razsvetljavo doma in delovnega mesta zanemarljivo. Kaj pa druge oblike javne razsvetljave – na primer svetlobni znaki in stebrički? Teh je manj kot uličnih svetilk in ker so bile že slednje daleč pod našim pragom, naše skupne ocene v višini 4 kWh/d na prebivalca ni treba prilagajati.

Luči v prometu

V nekaterih državah moramo ves čas voziti s prižganimi lučmi. Koliko dodatne energije porabimo po zaslugi tega pravila v primerjavi z energijo, ki jo že tako ali tako porabimo s prevažanjem? Vzemimo, da ima avto štiri klasične žarnice z žarilno nitko s skupno močjo 100 W. Električno za te žarnice dovaja motor s 25-odstotnim izkoristkom, ki poganja alternator s 55-odstotnim izkoristkom, zato je potrebnih **730 W** moči. Za primerjavo: tipičen avtomobil, ki potuje s povprečno hitrostjo 50 km/h in porabi 1 liter na 12 km, povprečno potrebuje **42.000 W** moči. Če so luči prižgane ves čas vožnje, torej porabimo dodatna 2 % energije.

naprava	moč	ur na dan	energije na dan na gospodinjstvo
10 žarnic z žarilno nitko	1 kW	5 h	5 kWh
10 varčnih sijalk	0,1 kW	5 h	0,5 kWh

hidroenergija: 1,5 kWh/d



Slika 9.1 Razsvetljava – 4 kWh na dan na prebivalca.

Slika 9.2 Poraba električne energije za razsvetljavo doma. Realna skupna vrednost je 5,5 kWh na gospodinjstvo na dan in nekaj podobnega za delovno mesto, kakšnih 4 kWh na dan na prebivalca.

Kaj pa bodoči električni avtomobili? Tipičen električni avtomobil potrebuje približno 5000 W. Z dodatnimi 100 W porabo povečamo za 2 %. Če vse avtomobilске žarnice zamenjamo z LED sijalkami, jo lahko zmanjšamo, a če o tej temi rečemo še kakšno, bomo podlegli hudi obliki sindroma »vsaka malenkost šteje«.

Gospodarnost varčnih sijalk

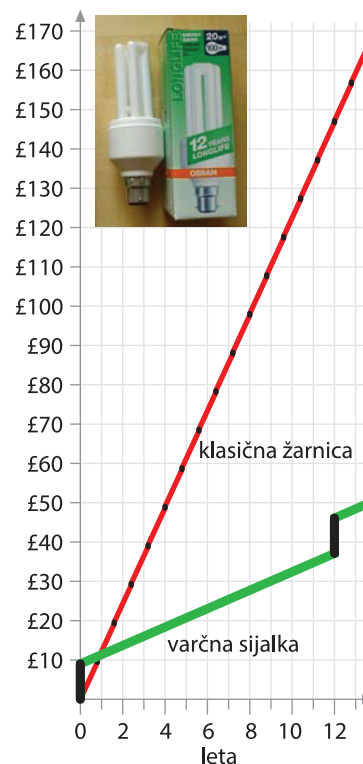
Načeloma o gospodarnosti ne govorim, pri sijalkah pa bi rad naredil izjemo. Osramova 20-vatna varčna sijalka naj bi po zagotovilih imela enak svetlobni učinek kot 100-vatna žarnica z žarilno nitko. Poleg tega naj bi bila njena življenjska doba 15.000 ur (ali »12 let« po 3 ure na dan). Klasična žarnica z žarilno nitko bi utegnila zdržati 1000 ur. V 12-letnem obdobju imate torej naslednjo izbiro (slika 9.3): kupiti 15 žarnic z žarilno nitko in 1500 kWh elektrike (kar stane približno 150 funtov) ali eno varčno sijalko in 300 kWh elektrike (kar stane približno 30 funtov).

Naj počakam, da stara žarnica pregori, preden jo zamenjam?

Sliši se potratno, kajne? Nekdo je vložil sredstva v izdelavo stare žarnice z žarilno nitko – mar ne bi bilo treba izkoristiti prvotne naložbe in žarnico uporabljati, dokler ne pregori? Ekonomski odgovor je jassen: *z uporabo stare žarnice še naprej mečemo denar skozi okno*. Če najdete zadovoljiv varčni nadomestek, staro žarnico nemudoma zamenjajte.

Kaj pa živo srebro v kompaktnih fluorescentnih sijalkah? So LED sijalke boljše od fluorescentnih?

Raziskovalci pravijo, da bodo LED sijalke kmalu še učinkovitejše od kompaktnih fluorescentnih sijalk. Učinkovitost sijalke merimo v *lumnih na vat*. Preveril sem številke na svojih najnovejših pridobitvah: kompaktna fluorescentna sijalka Philips Genie 11 W (slika 9.4) izseva 600 lumnov, kar pomeni **55 lumnov na vat**; klasične žarnice z žarilno nitko zmorejo **10 lumnov na vat**; sijalka Omicron 1,3 W, v kateri je 20 belih LED diod, izseva 46 lumnov, kar pomeni **35 lumnov na vat**. LED sijalka je torej skoraj enako učinkovita kot fluorescentna. Industrija LED svetil bo morala za vodstvo še kaj postoriti. V prid pa ji je to, da je življenjska doba LED sijalke 50.000 ur, kar osemkrat več od življenjske dobe fluorescentne sijalke. Ob pisanju tega vidim, da na www.cree.com prodajajo LED diode z izkoristkom **100 lumnov na vat**. Po napovedih naj bi izkoristek belih LED diod v prihodnosti presegel 150 lumnov na vat [ynjzej]. Pričakujem, da bo v nekaj letih z vidika energijske učinkovitosti kot tudi manjšega onesnaženja z živim srebrom najboljši nasvet naslednji: uporabljajte LED sijalke.



Slika 9.3 Skupni kumulativni strošek rabe klasične 100-vatne žarnice z žarilno nitko 3 ure na dan v primerjavi s tem, da jo *tako* zamenjamo z Osramovo sijalko Delux Longlife Energy Saver (na fotografiji). Predpostavke: elektrika stane 10 penijev na kWh, nadomestna klasična žarnica stane 45 penijev, varčna pa 9 funtov. (Vem, da obstajajo tudi cenejše, toda graf kaže, da so še pri takšni ceni veliko gospodarnejše.)



Slika 9.4 Philipsova 11-vatna sijalka in Omicronova 1,3-vatna LED sijalka.

Miti in zmote

»Žarnic nima smisla nadomeščati z varčnimi. Energija, ki naj bi šla v nič, ogreva moj dom, torej ne gre v nič.«

To zmoto bomo razjasnili v 11. poglavju na str. 71.

Opombe in dodatno branje

stran

- 57 *Ulične svetilke v resnici porabijo približno 0,1 kWh na dan na prebivalca /.../* Na 10 ljudi pride približno ena natrijeva ulična svetilka; moč takšne svetilke, ki gori 10 ur na dan, je 100 W. To pomeni porabo energije 0,1 kWh na dan na prebivalca.
- */.../ semaforji pa samo 0,005 kWh/d na prebivalca.* Svetlobno-signalne naprave v Veliki Britaniji vsebujejo 420.000 žarnic, ki porabijo 100 milijonov kWh električne energije na leto. Če to porazdelimo med 60 milijonov ljudi, dobimo 0,005 kWh/d na prebivalca.
 - *Svetlobnih znakov in stebričkov je manj kot uličnih svetilk.* [www.highwayelectrical.org.uk]. V Veliki Britaniji je 7,7 milijona svetlobnih naprav (uličnih svetilk, svetlobnih znakov in stebričkov). Od tega je približno 7 milijonov uličnih svetilk in 1 milijon svetlobnih prometnih znakov. 210.000 je prometnih signalnih naprav. Po podatkih DUKES 2005 za javno razsvetljavo skupaj porabimo 2095 GWh/leto, kar je 0,1 kWh/d na prebivalca.
 - *Alternator s 55-odstotnim izkoristkom.* Vir: en.wikipedia.org/wiki/Alternator. Mehansko delo v avtomobilih v elektriko pretvarjajo alternatorji. Generatorji v elektrarnah so pri pretvarjanju mehanskega dela v električno energijo veliko učinkovitejši.

vrsta sijalke	izkoristek (lumni/W)
z žarilno nitko	10
halogenska	16–24
bela LED	35
kompaktna fluorescentna	55
velika fluorescentna	94
natrijeva ulična svetilka	150

Tabela 9.5 Svetlobni izkoristek sijalk, ki so na voljo na tržišču. LED diode naj bi v prihodnje dosegle 150 lumnov na vat.

10 Vetrna energija na morju

Vetrna elektrarna London Array bo odločilno prispevala k doseganju britanskih ciljev na področju obnovljive energije.

James Smith, predsednik britanskega Shella

Električna energija je preveč temeljno blago, da bi jo spremenili v zaposlitveni ukrep za industrijo vetrnih turbin.

David J. White

Veter na morju piha močnejše in stalnejše kot na kopnem, zato vetrne elektrarne na morju zagotovijo večjo moč na enoto površine kot kopenske. Povprečna moč na enoto površine v elektrarni Kentish Flats v ustju reke Temze, kakšnih 8,5 km od obalnega Whistabla in zaliva Herne Bay, ki deluje od leta 2005, naj bi bila po prvotnih napovedih $3,2 \text{ W/m}^2$. Leta 2006 izmerjena je bila potem v resnici $2,6 \text{ W/m}^2$.

Predpostavil bom, da je ustrezna številka za moč na enoto površine pri vetrnih elektrarnah na morju v Veliki Britaniji 3 W/m^2 (50 % več kot pri kopenskih napravah, kjer je bila ocena 2 W/m^2).

Zdaj moramo oceniti površino morja, ki bi jo realno lahko prekrili z vetrnimi turbinami. Kot prikazuje slika 10.2, razlikujemo med napravami v *plitvih* vodah in v *globokih* vodah. Po splošnem prepričanju naj bi bile naprave v plitvih vodah (z globino do 25–30 m) ob zmerni subvenciji ekonomsko upravičene, četudi približno dvakrat dražje od kopenskih, naprave v globokih vodah pa za zdaj ne. V britanskih globokih vodah je ena sama vetrna elektrarna: od leta 2008 se tam nahaja poskusen prototip, ki vso električno energijo pošilja na bližjo naftno ploščad Beatrice.

Vetrna energija v plitvih vodah

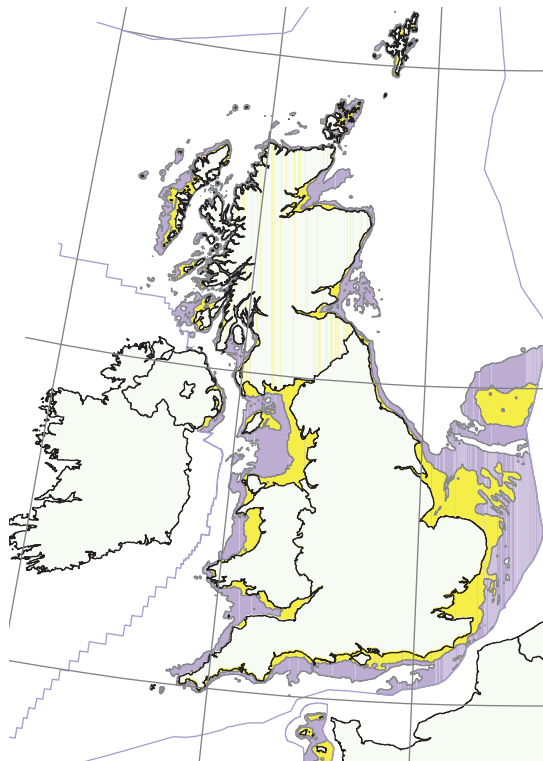
V britanskih ozemeljskih vodah je priobalnih plitvin za približno 40.000 km^2 , večinoma ob obali Anglije in Walesa. Območje je veliko za približno dva Walesa.

Če bi vetrne elektrarne na morju prekrivale celotno območje, bi bila njihova povprečna moč 120 GW oz. 48 kWh/d na prebivalca. Težko pa verjamem, da bi bila takšna ureditev po godu ladijskemu prometu. Prepričan sem, da na precejšnjih delih teh priobalnih plitvin vetrnih elektrarn ne bi mogli postaviti. Razpoložljivo površino moramo zmanjšati zaradi koridorjev za ladijski promet in ribolovnih območij. Predlagam, da jo zaskoličimo pri eni tretjini (glejte tudi bolj pesimistično oceno v opombah na koncu poglavja!). Največja realna moč vetrnih elektrarn v plitvih vodah bi bila torej **16 kWh/d na prebivalca**.

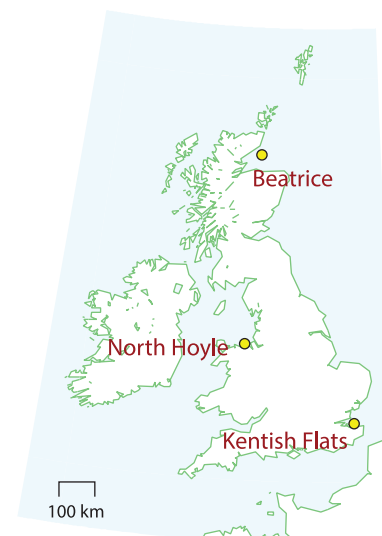
Preden nadaljujemo, bi rad poudaril, kako veliko območje – za dve tretjini Walesa – bi potrebovali za teh 16 kWh/d na prebivalca. Če vzamemo



Slika 10.1 Kentish Flats – vetrna elektrarna v plitvih vodah. Rotorji s premerom 90 m so nameščeni na višini 70 m. 3-megavatne turbine tehtajo po 500 ton, polovico od tega temelji. Foto: © Elsam (elsam.com). Objavljeno z dovoljenjem.



Slika 10.2 Britanske ozemeljske vode z globino do 25 m (rumena) in globino med 25 m in 50 m (vijolična). Vir podatkov: DTI-jev Atlas obnovljivih morskih virov. © Crown copyright.



celotno britansko obalo (ki je dolga 3000 km) in jo vsenaokrog obdamo s 4-kilometrskim pasom turbin, je površina tega pasu 13.000 km². Toliko morja bi zasedle turbine za 16 kWh/d na prebivalca. Ali drugače: pomislite, koliko turbin bi potrebovali. Za 16 kWh/d na prebivalca bi potrebovali 44.000 »3-megavatnih« turbin, kar pomeni 15 na kilometer obalnega pasu, če bi bile enakomerno razporejene ob 3000 kilometrih obale.

Vetrna tehnologija na morju je zaradi korozije, ki jo povzroča morska voda, komplicirana zadevščina. V veliki danski vetrni elektrarni Horns Rev so morali po pičlih 18 mesecih izpostavljenosti morskemu zraku razstaviti in obnoviti vseh 80 turbin. Turbine elektrarne Kentish Flats imajo očitno enake težave z menjalniki, saj so jih v prvih 18 mesecih morali zamenjati tretjino.

Vetrna energija v globokih vodah

Območje z globino med 25 m in 50 m meri približno 80.000 km², toliko kot Škotska. Če spet predpostavimo, da je specifična moč 3 W/m², bi vetrne elektrarne v globokih vodah lahko zagotovile 240 GW oz. 96 kWh/d na prebivalca, če bi območje v celoti napolnili s turbinami. Vendar tudi tu potrebujemo koridorje za ladijski promet. Predlagam, da spet predpostavimo, da lahko za vetrne elektrarne uporabimo tretjino območja. Dobljeno ozemlje bi bilo približno 30 % večje od Walesa in bi se v veliki

meri nahajalo več kot 50 km od obale. Kaj dobimo? Če bi z vetrnimi turbinami napolnili območje, enako 9-kilometerskemu pasu vzdolž vse obale, bi vetrne elektrarne v globokih vodah proizvajale 32 kWh/d na prebivalca. Vem, ogromna količina, vendar se ta še vedno ne more kosati z našo ogromno porabo. In nismo še spregovorili o nestalnosti vetra. K temu se bomo vrnili v 26. poglavju.

Potencialni prispevek vetra v globokih vodah bom dodal v stolpec proizvodnje, a z opombo, kot sem že povedal, da so vetrnice v globokih vodah po mnenju strokovnjakov za vetrno energijo nedostopno drage.

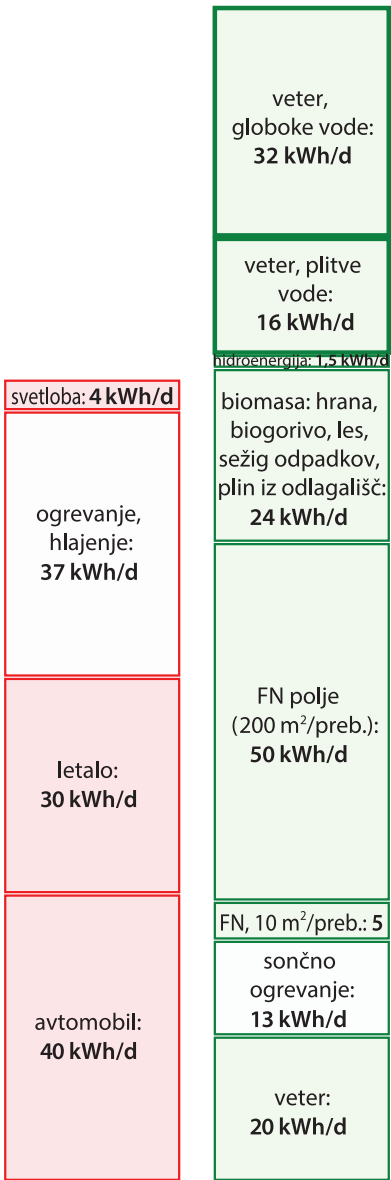
Nekaj primerjav in stroškov

Kako se odvija tekma med porabo in proizvodnjo? Ko smo v stolpec proizvodnje dodali tako vetrne elektrarne v plitvih kot v globokih vodah, je zeleni stolpec prevzel vodstvo. A naj vas v povezavi s stolpci opozorim na to, s kakšno lahkoto nalagamo hlode na ogenj porabe in kako težko je povečati stolpec proizvodnje. Med pisanjem tega me malo mrazi, zato stopim do termostata in povišam temperaturo. Tako zlahka porabim dodatnih 30 kWh na dan. Iztisniti dodatnih 30 kWh na dan na prebivalca iz obnovljivih virov pa zahteva skoraj nepredstavljivo industrializacijo okolja.

Če bi hoteli iz vetra na morju pridobiti 48 kWh na dan na prebivalca Velike Britanije, bi potrebovali 60 milijonov ton betona in jekla – eno tona na prebivalca. Letna svetovna proizvodnja jekla je približno 1200 milijonov ton, kar je 0,2 tone na vsakega prebivalca sveta. Med drugo svetovno vojno so v ameriških ladjedelnicah izdelali 2751 ladij tipa liberty, od katerih je vsaka vsebovala 7000 ton jekla – to je skupaj 19 milijonov ton jekla oz. 0,1 tone na Američana. Postaviti za 60 milijonov ton vetrnih turbin torej ni nekaj nedosegljivega, ne slepite pa se, da je preprosto. Izdelava takšnega števila vetrnic je enako velik podvig kot gradnja ladij liberty.

Za primerjavo: če želimo iz jedrske energije pridobiti 48 kWh na dan na prebivalca Velike Britanije, potrebujemo 8 milijonov ton jekla in 140 milijonov ton betona. 60 milijonov ton vetrne opreme, ki jo imamo v mislih, lahko primerjamo tudi z obstoječo »fosilno« opremo, ki se že nahaja v Severnem morju in okrog njega (slika 10.4). Leta 1997 je bilo v 200 napravah in 7000 kilometrih cevovodov v britanskih vodah Severnega morja 8 milijonov ton jekla in betona. Za novozgrajeni plinovod Langeled med Norveško in Veliko Britanijo, ki bo imel moč 25 GW (10 kWh/d na preb.), so porabili še dodatni 1 milijon ton jekla in 1 milijon ton betona (slika 10.5).

Britanska vlada je 10. decembra 2007 sporočila, da bo dovolila gradnjo 33-gigavatne vetrne elektrarne na morju (ki bi za Veliko Britanijo v povprečju zagotavljala 10 GW oz. 4,4 kWh na dan na prebivalca), načrt pa so nekateri v vetrni industriji označili za »pobožne želje«. Računajmo z zaokroženo vrednostjo 4 kWh na dan na prebivalca. To je četrтина mojih 16 kWh na dan na prebivalca za vetrno energijo v plitvih vodah. Za takšno



Slika 10.3 Veter na morju.

povprečno moč bi potrebovali približno 10.000 »3-megavatnih« vetrnih turbin, kakršne vidimo na sliki 10.1. (Njihova zmogljivost je »3 MW«, sicer pa povprečno delujejo z 1 MW. »3 MW« sem opremil z narekovaji, da pokažem, da gre za konično moč.)

Koliko bi stala postavitve teh »33 GW«? »90-megavatna« elektrarna Kentish Flats je stala 105 milijonov funtov, zato bi »33 GW« stalo približno 33 milijard funtov. Ta strošek vetrnih elektrarn na morju, ki bi proizvajale 4 kWh/d na prebivalca, bomo lažje razumeli, če ga porazdelimo med britansko prebivalstvo. Izračun pokaže 550 funtov na prebivalca. Mimogrede, to je precej bolje od mikroturbin. S strešno mikroturbino, ki zdaj stane približno 1500 funtov, celo pri najbolj optimistični hitrosti vetra, 6 m/s, proizvedemo samo 1,6 kWh/d. V resnici pa na tipični mestni lokaciji v Angliji z njo proizvedemo 0,2 kWh na dan.

Nameščanje vetrnih turbin bi zavlekla tudi posebna plovila, ki jih za to potrebujemo. Za postavitve 10.000 vetrnih turbin (»33 GW«) v 10 letih bi v grobem potrebovali 50 dviznih ploščadi. Ena dvizna ploščad stane 60 milijonov funtov, zato bi morali v osnovna sredstva dodatno vložiti 3 milijarde funtov. V primerjavi z že omenjenimi 33 milijardami ob tem mogoče ne bi niti privzdignili obrvi, so pa dvizne ploščadi vsekakor podrobnost, ki zahteva nekaj vnaprejšnjega načrtovanja.

Cena ptic?

Ali vetrnice res pobijejo »ogromne količine« ptic? Vetrne elektrarne je pred časom doletela negativna reklama iz Norveške, kjer je zaradi vetrnih turbin na otočju Smola ob severozahodni obali v 10 mesecih poginilo 9 orlov belorepcev. Ko govorimo o skrbi za blaginjo ogroženih ptic, smo z organizacijo BirdLife International na istem bregu. Vedno pa sem mnenja, da je treba gledati številke. Na Danskem, kjer vetrnice proizvedejo 19 % električne energije, po ocenah zaradi vetrnih turbin pogine 30.000 ptic na leto. Strah in groza! Prepovejmo vetrnice! Najdemo pa tudi podatek, da na Danskem zaradi *prometa* pogine *milijon* ptic na leto. Tridesetkrat večja strah in groza! Tridesetkrat večji razlog, da prepovemo avtomobile! V Veliki Britaniji 55 milijonov ptic na leto pogine zaradi *mačk* (slika 10.6).

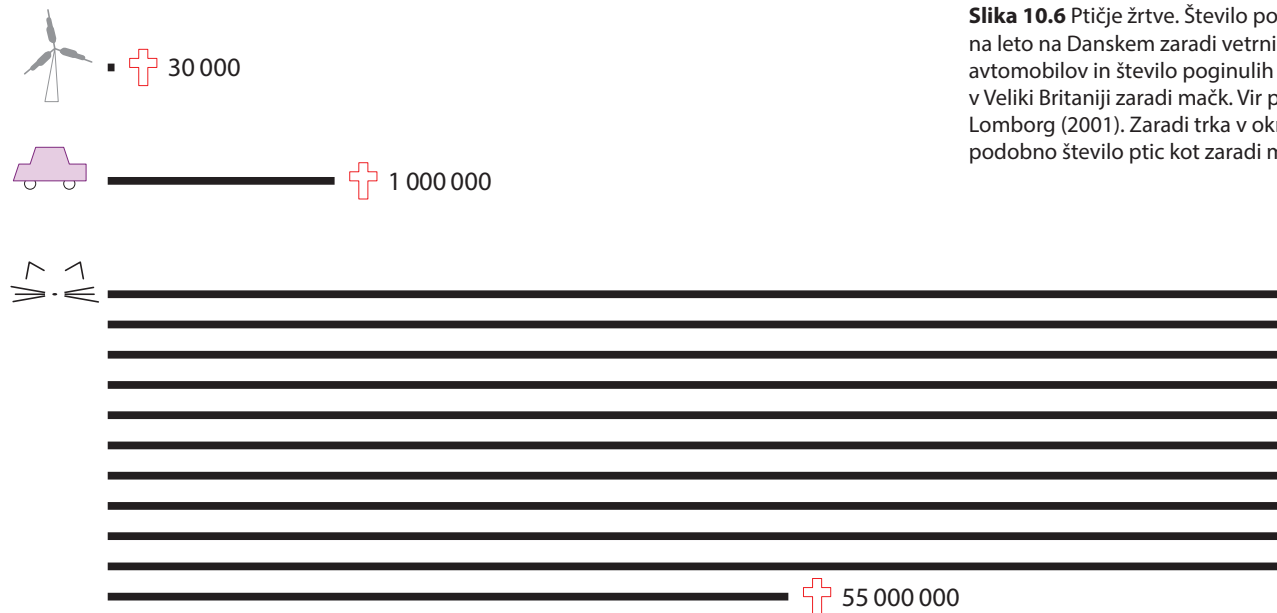
Če bi govoril samo po občutku, bi želel živeti v državi, kjer skoraj ni avtomobilov in vetrnic, je pa obilo mačk in ptic (pri čemer bi mačke, ki lovijo ptice, lahko lovili norveški orli belorepcci, da bi se izravnilo). Toda v resnici upam, da odločitev o avtomobilih in vetrnicah ne sprejemamo zgolj po občutku, pač pa po skrbnem racionalnem premisleku. Mogoče vetrnice kljub vsemu potrebujemo!



Slika 10.4 Ploščad Magnus v severnem britanskem delu Severnega morja vsebuje 71.000 ton jekla. Leta 2000 je s te ploščadi prišlo 3,8 milijona ton nafte in plina – kar ustreza moči 5 GW. Ploščad je stala 1,1 milijarde funtov.
Foto: Terry Cavern.



Slika 10.5 Cevi za plinovod Langeled.
Foto: Bredero-Shaw [brederoshaw.com].



Slika 10.6 Ptičje žrtve. Število poginulih ptic na leto na Danskem zaradi vetrnih turbin in avtomobilov in število poginulih ptic na leto v Veliki Britaniji zaradi mačk. Vir podatkov: Lomborg (2001). Zaradi trka v okno pogine podobno število ptic kot zaradi mačk.

Opombe in dodatno branje

stran

- 60 *Elektrarna Kentish Flats v ustju reke Temze /.../* Glejte www.kentishflats.co.uk. Trideset turbin Vestas V90 v konici doseže moč 90 MW, predvidoma pa naj bi povprečno zagotavljale 32 MW (ob predpostavki, da je stopnja izkoriščenosti zmogljivosti 36 %). Srednja hitrost vetra na višini osi rotorja je 8,7 m/s. Turbine so nameščene v 5 m globoki vodi, razdalja med njimi je 700 m, razprostirajo pa se na 10 km². Specifična moč naj bi bila po napovedih 3,2 W/m². V resnici je bila povprečna moč 26 MW, zato je bila leta 2006 povprečna stopnja izkoriščenosti 29 % [wbd80]. To pomeni specifično moč 2,6 W/m². Stopnja izkoriščenosti vetrne elektrarne North Hoyle ob obali kraja Prestatyn na severu Walesa je bila leta 2006 večja, znašala je 36 %. 2-megavatne turbine zavzemajo 8,4 km², zato je bila njihova povprečna specifična moč 2,6 W/m².
- */.../ naj bi bile naprave v plitvih vodah ob zmerni subvenciji ekonomsko upravičene, četudi približno dvakrat dražje od kopenskih.* Vir: Danska zveza za vetrno industrijo windpower.org.
 - */.../ naprave v globokih vodah pa za zdaj ne.* Vir: informativni dokument Britanske zveze za vetrno energijo, september 2005, www.bwea.com. Kljub temu so leta 2007 v okviru demonstracijskega projekta ob naftno ploščad Beatrice namestili dve turbini v globokih vodah, ki leži 22 km od vzhodne obale Škotske (slika 10.8). Turbini z »zmogljivostjo« po 5 MW sta nameščeni v globino 45 m. Višina osi rotorja: 107 m; premer: 126 m. Vso proizvedeno električno energijo bodo porabili na naftnih ploščadih. Če to ni od sile! 10-megavatni projekt je stal 30 milijonov funtov oziroma 3 funte na vat (pri

regija	globina 5 do 30 m		globina 30 do 50 m	
	površina (km ²)	potencialni viri (kWh/d/preb.)	površina (km ²)	potencialni viri (kWh/d/preb.)
severozahod	3300	6	2000	4
Greater Wash	7400	14	950	2
ustje Temze	2100	4	850	2
drugo	14000	28	45000	87
SKUPAJ	27000	52	49000	94

Tabela 10.7 Potencialni viri za proizvodnjo energije iz vetra na morju v predlaganih strateških regijah, če bi jih v *celoti* prekrili z vetrnimi turbinami. Vir: Britansko ministrstvo za trgovino in industrijo (2002b).

največji moči). Za primerjavo: cena elektrarne Kentish Flats je 1,2 funta na vat (105 milijonov za 90 MW). www.beatricewind.co.uk

Na gospodarnost vetrne tehnologije v globokih vodah bi morda lahko vplivale *plavajoče* vetrne turbine.

60 Površina, ki je na voljo za izkoriščanje vetrne energije na morju.

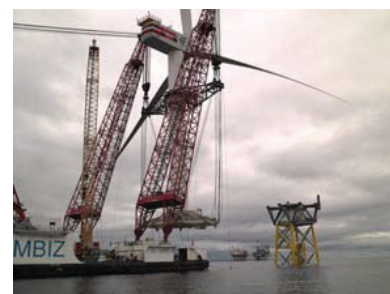
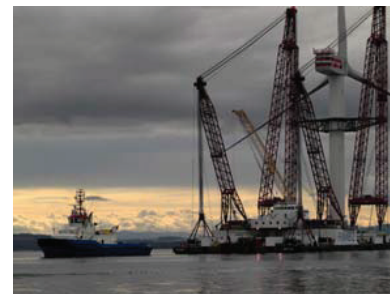
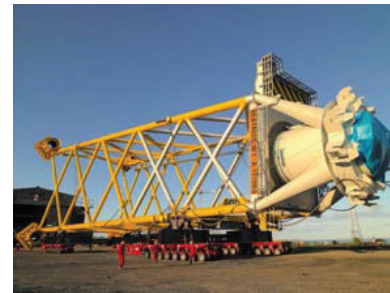
Ministrstvo za trgovino in industrijo (DTI) v dokumentu iz leta 2002 z naslovom »Vetrna energija na morju v prihodnosti« natančno razčleni območja, ki so uporabna za izkoriščanje vetrne energije na morju. V tabeli 10.7 so navedeni potencialni viri v plitvih in globokih vodah s skupno površino 76.000 km². DTI ocenjuje, da bi ta območja, če bi bila v *celoti* prekrita z vetrnicami, prispevala 146 kWh/d moči na prebivalca (52 kWh/d na preb. v plitvih vodah in 94 kWh/d na preb. v globokih vodah). Njihova ocena potencialne proizvodnje iz vetra na morju pa je samo **4,6 kWh na dan na prebivalca**. Zanimivo bi bilo pojasniti, kako so od potencialnih virov v obsegu 146 kWh/d na prebivalca prišli na 4,6 kWh/d na prebivalca. Zakaj je končna številka toliko nižja od naše? Prvič, določili so naslednje omejitve: šteje območje, ki je od obale oddaljeno največ 30 km in kjer je globina manjša od 40 m. Morsko dno ne sme biti nagnjeno za več kot 5°, izključene so pomorske plovne poti, vojaške cone, cevovodi, ribolovna območja in naravni rezervati. Drugič, predpostavili so, da bomo razvili samo 5 % potencialnih območij (zaradi zgradbe morskega dna ali projektantskih omejitev). Pri vseh območjih, ki ležijo manj kot 16 km od obale, so zmogljivost zaradi (ne)naklonjenosti javnosti zmanjšali za 50 %; še dodatno so jo za 95 % zmanjšali pri območjih, kjer je hitrost vetra večja od 9 m/s, in sicer zaradi »vpliva neugodnega okolja na razvoj«; pri drugih območjih, kjer je povprečna hitrost vetra 8–9 m/s, pa so jo zmanjšali za 5 %.

61 Če vzamemo celotno britansko obalo (dolžine 3000 km) in jo vsenaokrog obdamo s 4-kilometrskim pasom turbin /.../ Pedantneži bodo rekli, da »dolžina britanske obale ni natančno določena, saj je obala razčlenjena«. Ja, ja, res je razčlenjena. Ampak, dragi pedantneži, vzemite zemljevid in okrog kopenskega dela Velike Britanije speljite 4-kilometrski pas turbin. Ni dolžina pasu kljub vsemu 3000 km?

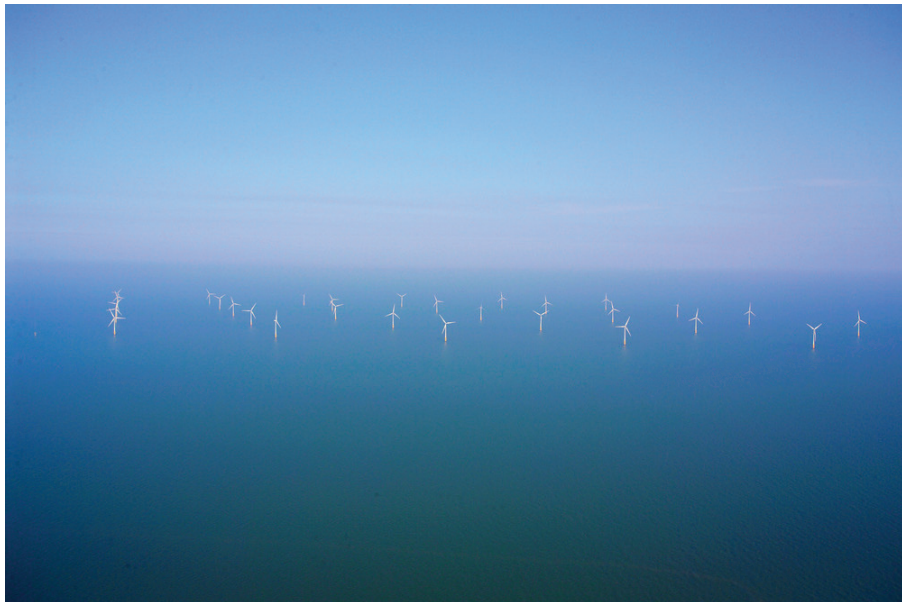
- **Horns Rev.** Težave s to 160-megavatno vetrno elektrarno ob obali Jutlanda na Danskem [www.horns-rev.dk] opisuje Halkema (2006).

Kadar Horns Rev deluje, je stopnja izkoriščenosti zmogljivosti 0,43, povprečna moč na enoto površine pa 2,6 W/m².

- 62 *Ladje tipa liberty* – www.liberty-ship.com/html/yards/introduction.html
 – /.../ je bilo v napravah za fosilna goriva v britanskih vodah Severnega morja 8 milijonov ton jekla in betona – Rice in Owen (1999).
 – Britanska vlada je 10. decembra 2007 sporočila, da bo dovolila gradnjo 33-gigavtnih vetrnih elektrarn na morju /.../ [25e59w].
 – /.../ »pobožne želje«. Vir: Guardian [2t2vjq].
- 63 *Koliko bi stala postavitev teh »33 GW«?* Po podatkih DTI iz novembra 2002 elektrika iz vetrnih elektrarn na morju stane približno 50 funtov na MWh (5 penijev na kWh) (Dept. of Trade and Industry 2002b, str. 21). Gospodarski podatki pa so različni in aprila 2007 je bil strošek vetrne energije na morju ocenjen na do 92 funtov na MWh (Dept. of Trade and Industry 2007, str. 7). Do aprila 2008 se je cena očitno še povzpela, Shell je namreč odstopil od svoje zaveze o gradnji elektrarne London Array. Zaradi visoke cene vetrne energije na morju mora vlada povečevati število certifikatov obnovljive energije ROC (renewable obligation certificate) na enoto vetrne energije na morju. ROC je enota subvencije, ki jo namenjajo nekaterim oblikam proizvodnje energije iz obnovljivih virov. Standardna vrednost certifikata je 45 funtov za 1 ROC na MWh; proizvajalci obnovljive energije tako dobijo 85 funtov na MWh, če je veleprodajna cena približno 40 funtov/MWh. Subvencija v višini 1 ROC na MWh torej ne zadošča za pokritje stroška v višini 92 funtov na MWh. V istem dokumentu najdemo naslednje ocene za druge obnovljive vire (srednje ravni stroškov leta 2010): kopenska vetrna energija: 65–89 GBP/MWh; soproizvodnja toplote in elektrike iz biomase: 53 GBP/MWh; velike hidroelektrarne: 63 GBP/MWh; kanalizacijski plin: 38 GBP/MWh; sončne elektrarne: 571 GBP/MWh; energija valovanja: 196 GBP/MWh; energija plimovanja: 177 GBP/MWh.
- »Dale Vince, prvi mož ponudnika okolju prijazne energije Ecotricity, ki se ukvarja z gradnjo kopenskih vetrnih elektrarn, pravi, da podpira vladne načrte [za vetrno energijo na morju], vendar ne na škodo kopenske vetrne energije. »Ne smemo pozabiti na ta izjemni vir, ki ga ima naša država na voljo ... Po naših ocenah bi gradnja 33 GW vetrnih zmogljivosti na morju, ki jih predlaga Hutton, stala kakšnih 40 milijard funtov. Enako bi lahko na kopnem naredili za 20 milijard funtov.« [57984r]
- *Na tipični mestni lokaciji v Angliji s pomočjo mikroturbin proizvedemo 0,2 kWh na dan.* Vir: Tretje vmesno poročilo, www.warwickwindtrials.org.uk/2.html. V študiji, ki so jo opravili pri Warwick Wind Trials, se je kot ena najboljših izkazala 1-kilovatna naprava Windsave WS1000 v Daventryju, ki je nameščena 15 m visoko in v povprečju proizvede 0,6 kWh/d. Nekatere mikroturbine proizvedejo samo 0,05 kWh na dan – Vir: Donnachadh McCarthy, »My carbon-free year«, The Independent, december 2007 [6oc3ja]. Vetrna turbina Windsave WS1000, ki jo v Angliji prodajajo v B&Q, je prejela nagrado »eko-sranje« avtorja knjige *Housbuilder's Bible*, Marka Brinkleyja. »Lepo vas prosim, priznajmo že, da je industrija strešnih vetrnih turbin popolna blamaža. Za izum, ki ne deluje, razmetavamo poštene denarje. To je Sinclair C5 prvega desetletja tega stoletja.« [5soq12]. Britanska meteorološka služba in Carbon Trust sta julija 2008 objavila poročilo [6g2jm5],



Slika 10.8 Gradnja demonstracijske vetrne elektrarne Beatrice v globokih vodah. Fotografije so prijazno prispevali Talisman Energy (UK) Limited.



Slika 10.9 Kentish Flats. Foto: © Elsam (elsam.com). Objavljeno z dovoljenjem.

v katerem ocenjujeta, da bi z malimi turbinami, če bi jih namestili na vse hiše v Veliki Britaniji, kjer bi bilo to gospodarno, skupaj proizvedli približno **0,7 kWh/d na preb.** Posvarila sta, da so strešne turbine celo slabše kot neuporabne: »V urbanih območjih se v mnogih primerih lahko zgodi, da strešne turbine ne odtehtajo ogljika, ki se sprošča ob njihovi proizvodnji, namestitvi in delovanju.«

- 63 *Ena dvizna ploščad stane 60 milijonov funtov.* Vir: [news.bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm](https://www.bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm). Ocenil sem, da bi jih potrebovali kakšnih 50 ob predpostavki, da bi bilo na leto za delo primernih dni 60 in da bi za postavitev ene turbine potrebovali 3 dni.

Dodatno branje: britanska baza podatkov o vetrni energiji [www.bwea.com/ukwed/].

11 Zabavna elektronika

Ena največjih nevarnosti, ki pretijo naši družbi, so polnilci za mobilne telefone. Pri BBC News nas pred njimi svarijo že od leta 2005:

»Čez nekaj let bodo vse jedrske elektrarne zaustavljene. Kako bomo dosegli, da luči v Veliki Britaniji ne ugasnejo? /.../ **izklopite polnilce za mobilni telefon, kadar ga ne uporabljate.**«

Leto pozneje Britanija žal še ni doumela sporočila in pri BBC-ju so morali poročati:

»**Velika Britanija na prvem mestu po energijski potratnosti.**«

In kako je prišlo do tega? BBC jasno daje vedeti:

»65 % britanskih potrošnikov pušča polnilce priklopljene.«

Glede na to, kako novinarji poročajo o teh za planet uničujočih črnih napravah, so očitno približno enako zlo kot Darth Vader. Toda kako hudo zlo so v resnici?

V tem poglavju bomo razkrili resnico o polnilcih. Preučili bomo tudi njihovo sorodstvo v falangi zabavne elektronike: računalnike, telefone in televizorje. Digitalne sprejemnike. Kabelske modeme. V tem poglavju bomo ocenili, koliko energije porabimo za njihovo delovanje in polnjenje, ne pa tudi za njihovo izdelavo – s tem se bomo ukvarjali v poglavju o »stvareh«.

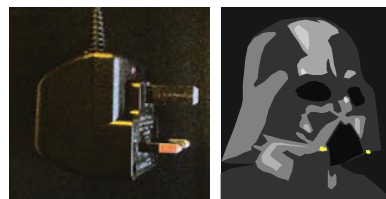
Resnica o polnilcih

Moč, ki jo za delovanje potrebuje sodobni polnilec za telefon, je približno pol vata, kadar ga pustimo priklopljenega in ni povezan s telefonom. V naših izbranih enotah za moč to pomeni približno **0,01 kWh na dan**. Če vaš stolpec porabe presega 100 kWh na dan, bi z upoštevanjem BBC-jevega nasveta, da *vedno izklopite polnilec za telefon*, porabo energije potencialno lahko zmanjšali za eno stotinko odstotka (ko bi to le naredili oni sami).

Vsaka malenkost šteje!

Ne bi rekel. Obsesivno izklapljanje polnilca je kot praznjenje Titanika s čajno žličko. Le izklaplajte, zavedajte pa se, kako neznatno je to dejanje. Naj povem drugače:

Enako količino energije, kot jo prihranite z izklopom polnilca za en dan, porabite v *eni sekundi* vožnje z avtomobilom.



polnilec

negativec

Slika 11.1 Uničevalca planeta. Poiščite razlike.



Slika 11.2 Pri teh petih polnilcih – treh za mobilni telefon, enem za žepni računalnik in enem za prenosnik – je merilec moči pokazal manj kot en vat.

Z izklopom polnilca za *eno leto* prihranite toliko energije, kot jo porabite z eno samo vročo kopeljo.

Res je, da nekateri starejši polnilci potrebujejo več kot pol vata – če je topel na dotik, najbrž en vat ali celo tri (slika 11.3). Polnilec pri moči treh vatov žre 0,07 kWh na dan. Rekel bi, da je takšen polnilec pametno izklapljudi – s tem boste prihranili tri funte na leto. Ne slepite pa se, da ste s tem »prispevali svoj delež«. 3 W prispeva le drobec k skupni porabi.

Naj bo zdaj dovolj praznjenja Titanika s čajno žličko. Poglejmo, kje elektrika v resnici teče v potokih.

Zares požrešna elektronika

Tabela 11.4 prikazuje, koliko moči (v vatih) rabi po vsej hiši nabrana zabavna elektronika. Prvi stolpec prikazuje potrebno moč, ko je naprava dejansko v uporabi – na primer ko zvočni sistem dejansko predvaja zvok. Drugi stolpec prikazuje potrebno moč, ko je naprava priključena, a ne v uporabi. Posebej me je presenetilo, da nedejaven laserski tiskalnik potrebuje 17 W, kar je enako povprečni potrebi po moči hladilnika z zamrzovalnikom! Tretji stolpec prikazuje potrebno moč, ko napravo izrecno pošljemo v stanje mirovanja ali stanje pripravljenosti. Četrty prikazuje potrebno moč, ko je popolnoma ugasnjena – a še vedno priključena na elektroenergetsko omrežje. Vse te vrednosti prikazujem v vatih – za pretvorbo v naše standardne enote naj spomnim, da je 40 W enako 1 kWh/d. Mimogrede, čez palec lahko priročno rečemo, da vat stane približno funt na leto (ob predpostavki, da elektrika stane 10 penijev na kWh).

Najbolj požrešni so računalnik, njegov zaslon in televizor, pri katerih potrebna moč ob delovanju preseže sto vatov. Sistemi zabavne elektronike, kot so zvočni sistemi in DVD-predvajalniki računalniku dihaajo za ovratnik, saj mnogi rabijo kakšnih 10 W. DVD-predvajalnik v trgovini morda res stane samo 20 funtov, a če ga imate ves čas prižganega, vas stane še dodatnih 10 funtov na leto. Nekatero zvočne in računalniške komponente po zaslugi omrežnega transformatorja rabijo nekaj vatov celo takrat, ko so ugasnjene. Da bo naprava zares ugasnjena, izvlecite kabel iz vtičnice.

Napajanje skritega živčevja informacijske dobe

Po navedbah Jonathana Koorneyja (2007) računalniški strežniki v ameriških podatkovnih središčih in z njimi povezana infrastruktura (klimatske naprave, varnostni napajalni sistemi in tako naprej) porabijo **0,4 kWh na dan na prebivalca** – nekaj več kot 1 % ameriške porabe električne energije. Gre za vrednost iz leta 2005. Mimogrede, ta je dvakrat večja od porabe leta 2000, saj je število strežnikov v tem času s 5,6 milijona naraslo na 10 milijonov.



Slika 11.3 Ta potratni brezžični telefon in njegov polnilec potrebuje 3 W, če ju pustimo priključena. To pomeni **0,07 kWh/d**. Če elektrika stane 10 penijev na kWh, 3-vatno curljanje stane 3 funte na leto.

naprava	moč porabe (W)			
	prižgana, dejavna	prižgana, nedejavna	stanje pripravljenosti	ugasnjena
računalnik in komponente:				
računalnik	80	55		2
katodni zaslon	110		3	0
LCD zaslon	34		2	1
projektor	150		5	
laserski tiskalnik	500	17		
brežžični in kabelski modem	9			
prenosnik	16	9		0,5
prenosni CD-predvajalnik				
radioura	2			
radioura	1,1	1		
radioura	1,9	1,4		
digitalni radio	9,1		3	
kasetofon	3	1,2		1,2
stereo ojačevalnik	6			6
stereo ojačevalnik II	13			0
zvočni sistem za domači kino	7	7	4	
DVD predvajalnik	7	6		
DVD predvajalnik II	12	10	5	
TV	100		10	
videorekorder	13		1	
digitalni sprejemnik za TV	6		5	
ura na mikrovalovni pečici	2			
Xbox	160		2,4	
Sony Playstation 3	190		2	
Nintendo Wii	18		2	
telefonski odzivnik				
		2		
telefonski odzivnik II		3		
brežžični telefon		1,7		
polnilec za mobilni telefon	5	0,5		
sesalnik	1600			

Tabela 11.4 Moč, s katero rabijo energijo različne elektronske naprave. 40 W je 1 kWh/d.



prenosnik: 16 W računalnik: 80 W



LCD 31 W CRT 108 W tiskalnik 17 W (prižgan, nedejaven)



projektor: 150 W digitalni radio: 8 W

Druge naprave

Če sesalnik uporabljate par ur na teden, to pomeni približno **0,2 kWh/d**. Pri košenju trave porabimo približno **0,6 kWh**. Še bi lahko naštevali, predvidevam pa, da so računalniki in sistemi zabavne elektronike pri večini ljudi tisti najbolj požrešni del elektroenergetske bilance.

In skupna številka tega poglavja? Odvisno, koliko naprav imate doma in v službi, a zdrava mera ves čas prižgane domače ali službene elektronike zlahka porabi **5 kWh/d**.

Miti in zmote

»Ugašanje luči in televizorjev ter izklapljanje polnilcev pozimi nima smisla. Energija, ki jo oddajajo in naj bi šla v nič, mi ogreva dom, torej ne gre v nič.«

Ta pogosti mit občasno sicer *drži*, vendar še to samo pozimi, običajno pa *ne drži*.

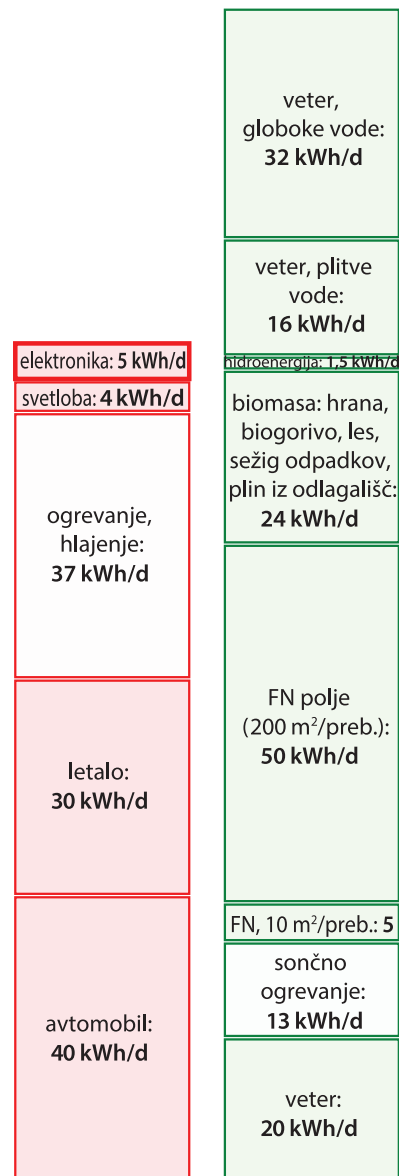
Če dom ogrevate na elektriko s pomočjo tipičnih električnih grelcev ali kaloriferjev, potem je to res enako, kot če bi ga ogrevali s katerokoli energijsko potratno napravo. Toda v tem primeru spremenite način ogrevanja. Električna energija je energent z veliko uporabno vrednostjo, toplota pa energent z majhno uporabno vrednostjo. *Elektriko je škoda spreminjati v toploto*. Če smo natančnejši: če iz ene enote elektrike pridobite samo eno enoto toplote, je to izguba. Grelci, ki jim pravimo toplotne črpalke zrak/voda ali toplotne črpalke zemlja/voda, se odrežejo veliko bolje, saj za vsako porabljeno enoto elektrike proizvedejo 3 ali 4 enote toplote. Delujejo kot narobe obrnjeni hladilniki, saj iz zunanjega zraka črpajo toploto v vaš dom (glejte 21. poglavje).

Vsi drugi pa, ki ogrevate dom s fosilnimi gorivi ali biogorivi, elektronskih naprav raje ne uporabljajte kot vira toplote – vsaj dokler naše naraščajoče potrebe po elektriki zadovoljujemo s fosilnimi gorivi. Fosilna goriva raje kurite doma. Stvar je v tem: če uporabljate elektriko iz tipične termoelektrarne, žal več kot polovica energije iz fosilnih goriv izgine v hladilni stolp. Od energije, ki se pretvori v elektriko, se je približno 8 % izgubi v prenosnem sistemu. Če fosilna goriva kurite doma, gre več te energije neposredno za ogrevanje zraka okoli vas.

Opombe in dodatno branje

stran

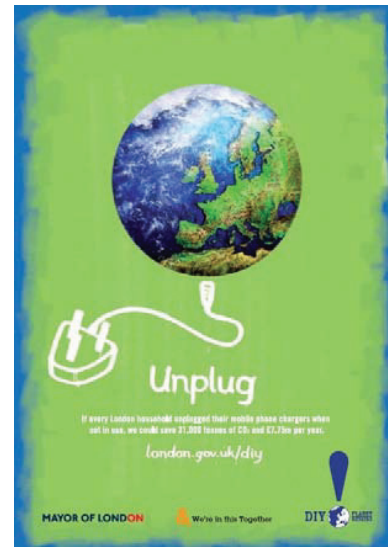
- 68 *Pri BBC News nas svariijo /.../ izklopite polnilec za mobilni telefon, kadar ga ne uporabljate.* Pri BBC News so leta 2005 v članku zapisali: »Čez nekaj let bodo vse jedrske elektrarne zaustavljene. Kako bomo dosegli, da luči v Veliki Britaniji ne ugasnejo? Z energijo lahko varčujete takole: ugasnite videorekorder, kadar ni v uporabi, ne puščajte televizorja v stanju pripravljenosti in izklopite polnilec za mobilni telefon, kadar ga ne uporabljate.«



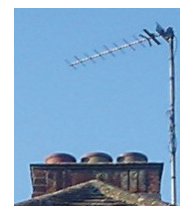
Slika 11.5 Informacijski sistemi in druga zabavna elektronika.

68 Moč, ki jo za delovanje potrebuje sodobni polnilec za telefon, je približno pol vata, kadar ga pustimo priklopljenega in ni povezan s telefonom. Maplinov merilnik porabe na sliki 11.2 ni dovolj natančen, da bi izmeril takšno vrednost. Zahvaljujem se Svenu Weierju in Richardu McMahonu z Oddelka za tehniške vede Univerze v Cambridgeu, ki sta porabo standardnega Nokiinega polnilca izmerila s pomočjo natančnega kalorimetra. Ugotovila sta, da ta, kadar ni povezan z mobilnim telefonom, potrebuje 0,472 W. Opravila sta še druge zanimive meritve: kadar je polnilec povezan z napolnjenim telefonom, potrebuje 0,845 W, kadar pa počne to, čemur je namenjen, torej polni nena-polnjen Nokiin mobilni telefon, se 4,146 W izgubi v obliki toplote. Pedantneži utegnejo vprašati: Kaj pa *jalova moč* polnilca? To je tehnična drobnarija, za katero je škoda časa. A naj povem, da sem izmeril jalovo moč (s cenanim merilnikom) in ta je približno 2 VA na polnilec. Glede na to, da so v državnem omrežju pri prenosu energije izgube približno 8-odstotne, bi rekel, da je izguba, povezana z jalovo močjo, največ 0,16 W. Kadar dejansko kličemo, je potrebna moč mobilnega telefona 1 W.

Dodatno branje: Kuehr (2003).



Slika 11.6 Oglas iz kampanje »DIY planet repairs« (Sam svoj mojster za planet, op. p.). Besedilo se glasi: »**Izklopi**. Če bi v vseh londonskih gospodinjstvih izklopili polnilce za mobilni telefon, kadar niso v uporabi, bi prihranili 31.000 ton CO₂ in 7,75 milijona funtov na leto.« london.gov.uk/diy/



12 Energija valovanja

Če energija valovanja kateri državi vzbuja upanje, ga vzbuja Veliki Britaniji in Irski – na eni strani ju obdaja Atlantski ocean, na drugi Severno morje.

Pojasnimo najprej, od kod valovi: *sonce povzroča veter in veter povzroča valove*.

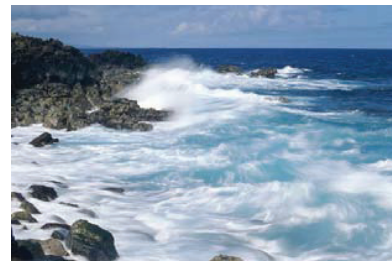
Večina sončnega sevanja, ki doseže naš planet, segreva oceane. Ogreta voda segreva zrak nad sabo in izhlapeva. Ogreti zrak se dviguje, se ob dvigovanju hladi in sčasoma spet kondenzira, pri čemer nastanejo oblaki in dež. Na najvišji točki zrak še dodatno ohlaja ledena črnina vesolja. Hladni zrak se spet spusti. Ta velika črpalka na sončni pogon potiska zrak naokrog v velikih konvekcijskih tokovih. Z vidika nas na površju ti povzročajo veter. Veter je posredna energija sonca. Ko se zaganja prek odprtega morja, povzroča valove. Valovi so tako dvojno posredna energija sonca. (Valovi, ki udarijo ob obalo, nimajo zveze s plimovanjem.)

Na odprtem morju valovi nastanejo, kadar je hitrost vetra večja od približno 0,5 m/s. Valovni vrhovi se premikajo s približno enako hitrostjo kot veter, ki jih ustvarja, in v isto smer. *Valovna dolžina* valov (razdalja med dvema vrhovoma) in *perioda* (čas med dvema vrhovoma) sta odvisni od hitrosti vetra. Dlje kot piha veter in večja kot je površina vode, prek katere piha, *višji* so valovi, ki jih veter dviguje. Ker torej vetrovi prek Atlantika večinoma pihajo od zahoda proti vzhodu, so valovi ob atlantski obali Evrope pogosto še posebej visoki. (Valovi ob vzhodni obali Britanskega otočja so po navadi veliko manjši, zato bom v svojih ocenah potencialne moči valovanja pozornost usmeril v vire v Atlantskem oceanu.)

Valovi imajo dolg spomin in v isto smer potujejo še dneve po tem, ko veter ne piha več, vse dokler ob kaj ne zadenejo. Tam kjer se smer vetra pogosto spreminja, iz valov, ustvarjenih ob različnih dnevih, nastane večplastna zmešnjava, saj potujejo v različne smeri.

Če valovi na poti naletijo na predmet, ki absorbira njihovo energijo – na primer vrsto otokov s peščenimi plažami –, potem je morje na drugi strani mirnejše. Predmeti mečejo senco in v valovih, ki se prebijejo mimo, je manj energije. Zato v nasprotju s soncem, ki zagotavlja moč na enoto *površine*, valovi zagotavljajo moč na enoto *dolžine* obale. Preprosto niso molzna krava. Energije valov ne morete izkoriščati dva kilometra pred obalo in ponovno en kilometer pred obalo. Oziroma lahko poskusite, vendar bo naprava pri dveh kilometrih absorbirala energijo, ki bi sicer šla v napravo pri enem kilometru, in ta se ne bo obnovila. Veter potrebuje na tisoče kilometrov, da ustvari visoke valove.

Zgornjo mejo moči, ki bi jo realno lahko pridobili iz moči valovanja, lahko določimo tako, da ocenimo vstopno moč na enoto dolžine izpostavljene obale in jo pomnožimo z dolžino obale. Vprašanje, s kakšnim mehanizmom bi lahko vso to moč izkoristili, bomo zanemarili in najprej izračunali, kolikšna je.



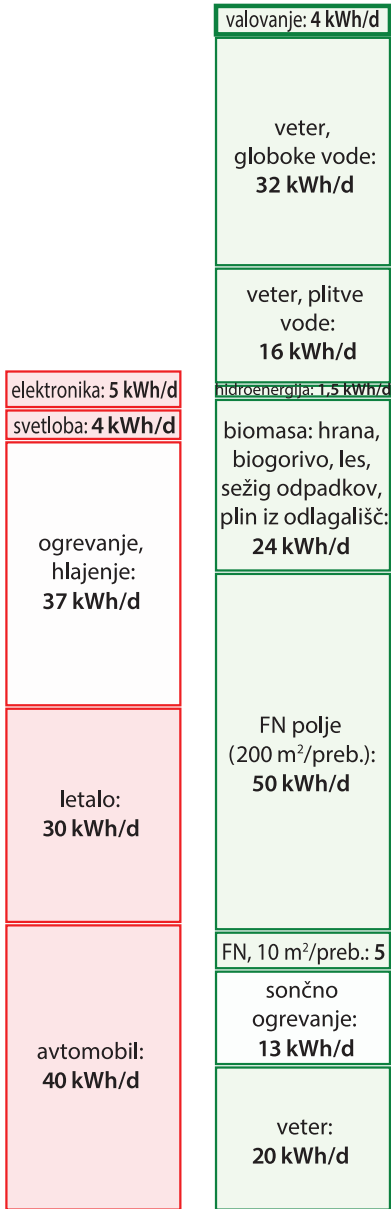
Slika 12.1 Zbiralnik valovne energije Pelamis je iz štirih delov sestavljena morska kača. Z nosom je obrnjen proti vstopnemu valovanju. Ob valovanju se kača pregiba, ob tem pa se v hidravličnih generatorjih ustvarja upor. Največja moč kače je 750 kW, na najboljših mestih v Atlantiku bi v povprečju zagotavljala 300 kW. Foto: Pelamis wave power. www.pelamiswave.com.

Moč morskih valov v Atlantiku so že izmerili: znaša približno 40 kW na meter izpostavljene obale. Sliši se veliko! Če bi vsakdo imel v lasti meter obale in bi lahko izkoristil vseh njenih 40 kW, bi dobili lepo količino moči za sodobne potrebe. Vendar je *prebivalstvo preveliko*. Obale, obrnjene proti Atlantiku, ni dovolj, da bi je vsakdo imel meter.

Kot prikazuje zemljevid na str. 73, Velika Britanija vlada približno 1000 kilometrom (milijon metrom) atlantske obale, kar pomeni 1/60 m na prebivalca. Skupne surove vstopne moči je torej 16 kWh na dan na prebivalca. Če bi izčrpali vso, bi bil Atlantik ob obali raven kot deska. V praksi sistemi ne bi mogli načrpati vse in še nekaj bi se je neizbežno izgubilo med pretvorbo iz mehanske v električno energijo. Predpostavimo, da imajo imenitne valovne naprave pri spreminjanju vstopne moči valovanja v elektriko 50-odstotni izkoristek in da z njimi lahko obložimo 500 km atlantske obale. V tem primeru lahko pridobimo 25 % teoretične mejne vrednosti oz. **4 kWh na dan na prebivalca**. Kot običajno so moje predpostavke namenoma precej skrajne, da bi povišal zeleni stolpec – ta, da bi z absorberji valovanja obdali *polovico atlantske obale*, se bo najbrž številnim bralcem zdela posebej za lase privlečena.

Kakšne so v izračunih predpostavljene številke v luči sedanje tehnologije? V času pisanja so v globokih vodah samo tri valovne naprave: gre za zbiralnike energije valovanja Pelamis (slika 12.1), ki so jih izdelali na Škotskem in jih uporabljajo ob portugalski obali. Podatkov o dejanski storilnosti niso objavili, proizvajalci naprave Pelamis (pri kateri je »vzdržljivost še pomembnejša od učinkovitega zajemanja energije«) pa so napovedali, da naj bi dvokilometrski valovna elektrarna s svojimi 40 morskimi kačami zagotavljala 6 kW na meter elektrarne. Če to številko uporabimo v prejšnjem izračunu, se moč 500 kilometrov valovnih elektrarn zmanjša na **1,2 kWh na dan na prebivalca**. Energija valovanja je morda lahko uporabna za manjše skupnosti na odročnih otočjih, pri reševanju britanskih težav s trajnostno energijo pa vidnejše vloge po mojem mnenju ne more igrati.

Koliko Pelamis tehta in koliko jekla vsebuje? Ena kača z močjo do 750 kW tehta 700 ton, pri čemer je 350 ton balasta. Jekla je torej približno 350 ton. Razmerje masa/moč je tako približno 500 kg na kW (konična moč). Primerjajmo to količino jekla, ki jo potrebujemo pri vetrni energiji na morju: vetrna turbina z močjo do 3 MW vključno s temeljem tehta 500 ton. To pomeni, da je razmerje masa/moč približno 170 kg na kW oziroma tretjino vrednosti valovne elektrarne. Pelamis je prvi prototip in predvidevam, da bi se z nadaljnjim vlaganjem in razvojem valovne tehnologije razmerje masa/moč izboljšalo.



Slika 12.2 Valovanje.

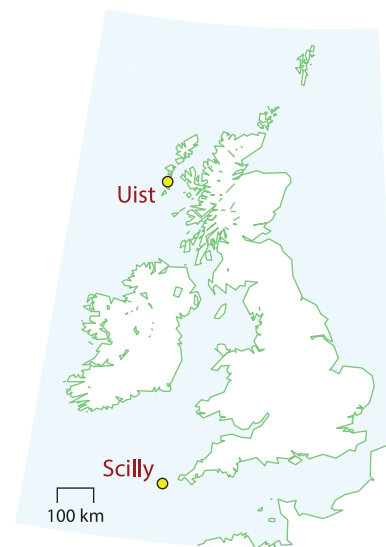
Opombe in dodatno branje

stran

- 73 *Valovi nastanejo, kadar je hitrost vetra večja od približno 0,5 m/s. Valovni vrhovi se premikajo s približno enako hitrostjo kot veter, ki jih ustvarja.* Po najpreprostejši teoriji proizvodnje valovne energije (Faber 1995, str. 337) naj bi se (pri nizkih valovih) vrhovi premikali s približno polovično hitrostjo vetra, ki jih ustvari. Empirično pa je bilo potrjeno naslednje: dlje kot piha veter, večja je valovna dolžina prevladujočih valov in večja je njihova hitrost. Značilna hitrost ob največjem valovanju je skoraj popolnoma enaka hitrosti vetra 20 metrov nad morsko gladino (Mollison 1986).
- *Valovi ob vzhodni obali Britanskega otočja so po navadi veliko manjši.* Specifična moč morskih valov pri Lewisu (Atlantik) je 42 kW/m, vrednosti ob vzhodni obali pa so naslednje: Peterhead 4 kW/m, Scarborough 8 kW/m, Cromer 5 kW/m. Vir: Sinden (2005). Sinden pravi: »Severno morje je okolje z zelo majhno količino energije valovanja.«
- 74 *Specifična moč morskih valov v Atlantiku je približno 40 kW na meter izpostavljene obale.* (V poglavju F pojasnim, kako lahko to moč ocenimo, če imamo nekaj podatkov o valovanju.) Podatek temelji na virih, ki govorijo o moči morskih valov v Atlantiku (Mollison in sod. 1976, Mollison 1986, 1991). Mollison (1986), na primer, pravi: »Neto vrednost obsežnih virov severovzhodnega Atlantika od Islandije do severa Portugalske je 40–50 MW/km, pri čemer bi bilo ekonomsko mogoče izkoristiti 20–30 MW/km«. V poljubni točki odprtega morja razlikujemo tri vrste specifične moči na enoto dolžine: skupno specifično moč, ki prehaja skozi točko v vseh smereh (povprečno 63 kW/m pri otočju Scilly in 67 kW/m pri Uistu), neto specifično moč, ki jo prestreže usmerjevalna zbiralna naprava, obrnjena v optimalno smer (47 kW/m oz. 45 kW/m), in specifično moč na enoto obale, ki upošteva neusklajenost optimalne smeri usmerjevalnega zbiralnika z obalo (na Portugalskem, na primer, je optimalna smer severozahod, obala pa gleda proti zahodu).
- *V praksi sistemi ne bi mogli izčrpati vse energije in še nekaj bi se je neizbežno izgubilo med pretvorbo iz mehanske v električno energijo.* Limpet pri otoku Islay, ki je prva britanska valovna naprava, priključena na omrežje, je osupljiv primer teh izgub. Ob zasnovi so njen izkoristek pretvorbe energije valovanja v električno energijo v omrežju ocenili na 48 % in napovedali, da bo povprečno proizvedla 200 kW. Zaradi izgub v sistemu zajemanja, vztrajnikih in električnih komponentah pa v resnici povprečno zagotavlja 21 kW – samo 10 % napovedane vrednosti (Wavegen 2002).



Foto: Terry Caver.



13 Hrana in kmetijstvo

Sodobno kmetijstvo je raba zemlje za pretvorbo nafte v hrano.

Albert Bartlett

V 6. poglavju smo že govorili o tem, koliko trajnostne energije bi lahko *proizvedli* s pomočjo zelenja, v tem poglavju pa bomo govorili o tem, koliko energije *porabljamo* za svoj vsakdanji kruh.

Energijska vrednost hrane, ki jo na dan pojé zmerno aktiven človek z maso 65 kg, je približno 2600 »kalorij«. »Kalorija«, kot jo uporabljamo v prehrabnih krogih, v resnici pomeni 1000 kemijskih kalorij (1 kcal). 2600 »kalorij« na dan je približno 3 kWh na dan. Večina te energije sčasoma zapusti telo v obliki toplote, zato je ena od funkcij tipičnega človeka ta, da deluje kot grelec okolice z močjo nekaj nad 100 W, kar lahko primerjamo s srednje močno žarnico. Če v majhen hladen prostor zaprete 10 ljudi, lahko 1-kilovatno konvekcijsko pečko kar ugasnete.

Koliko energije v resnici porabimo, da dobimo svoje 3 kWh na dan? Če pogledamo širše in vključimo neizbežne stroške proizvodnje hrane na začetku verige, utegnemo priti do spoznanja, da je naš energijski odtis precej večji. Odvisno od tega, ali smo vegani, vegetarijanci ali mesojedci.

Najmanjši neizbežni odtis ima vegan: **3 kWh** energije iz rastlin, s katerimi se prehranjuje, **na dan**.

Poraba energije pri pitju mleka

Obožujem mleko. Koliko energije porabimo, da lahko popijem dva kozarca mleka na dan? Tipična krava molznica da 16 litrov mleka na dan. Za dva kozarca (pol litra) mleka na dan moram zaposliti $\frac{1}{32}$ krave. Ne, trenutek – tudi sir imam rad. Za 1 kg irskega čedarja potrebujemo približno 9 kg mleka. Če pojem 50 g sira na dan, je torej treba proizvesti dodatnih 450 g mleka. Dobro, za svoje mlečne in sirne navade moram zaposliti $\frac{1}{16}$ krave. In kolikšno moč potrebujemo za napajanje krave? Če ima 450-kilogram-ska krava podobne energijske potrebe na kilogram kot človek (ki pri 65 kg pokuri 3 kWh na dan), potem zagotovo porabi kakšnih 21 kWh/d. Niste najbolj zadovoljni z ekstrapolacijo človeka v kravo? Preverimo številke: na www.dairyaustralia.com.au pravijo, da 450-kilogramsko tele potrebuje 85 MJ/d, kar je 24 kWh/d. Odlično, pri ugibanju nismo veliko zgrešili! Moja krava torej porabi približno **1,5 kWh** energije **na dan**. V tej številki ni zajeta druga poraba energije, povezana s prepričevanjem krave, naj proizvaja mleko, in mleka, naj se spremeni v sir, pa še z urejanjem tega, da mleko in sir pripotujeta od nje do mene. Nekaj te porabe bomo zajeli, ko bomo v 15. poglavju govorili o tovarnem prometu in supermarketih.



Slika 13.1 Niška solata

minimum: 3 kWh/d



Slika 13.2 Človekova minimalna potreba po energiji.

mleko, sir: 1,5 kWh/d



Slika 13.3 Mleko in sir.

Jajca

Nesnica (kokoš, ki leže jajca) pojé približno 110 g kokošje krme na dan. Če predpostavimo, da je vsebnost presnovljive energije v kokošji krmi 3,3 kWh na kg, to pomeni porabo v višini 0,4 kWh na dan na kokoš. Nesnice povprečno znesejo 290 jajc na leto. Če pojemo dve jajci na dan, to zahteva **1 kWh na dan**. Vsako jajce vsebuje 80 kcal, kar je približno 0,1 kWh. Z energijskega vidika ima torej proizvodnja jajc 20-odstotni izkoristek.

jajca: 1 kWh/d

Poraba energije pri prehranjevanju z mesom

Vzemimo, da zagrizeni mesojedec pojé približno pol funta mesa na dan (227 g). (Takšna je povprečna poraba mesa pri Američanih.) Če želimo izračunati, koliko moči potrebujemo za rejo mesojedčevih živali, dokler ne dozori in jih ne odrežejo, moramo vedeti, koliko življenja je živalim za porabljanje energije sploh na voljo. Bi piščanca, svinjino ali govedino?

Piščanca, gospod? Vsak piščanec, ki ga pojedete, je po piščančje kokodakal sem in tja približno 50 dni. Za redno porabo v obsegu pol funta piščanca na dan mora biti v pričakovanju konca na krožniku živih približno 25 funtov piščanca. In teh 25 funtov piščanca porablja energijo.

Svinjino, gospa? Prašiči so na svetu dlje – kakšnih 400 dni od rojstva do slanine –, zato mora biti za redno porabo v obsegu pol funta svinjine na dan v pričakovanju konca na krožniku živih približno 200 funtov svinjine.

Kravo? Pri proizvodnji govedine je cikel najdaljši. Izdelava zrezka vzame približno 1000 dni govejega časa. Za redno porabo v obsegu pol funta govedine na dan mora biti v pričakovanju konca na krožniku živih približno 500 funtov govedine.

Da zgostimo vse te misli v eno številko, predpostavimo, da pojedete pol funta (227 g) mesa na dan, od tega enako količino piščanca, svinjine in govedine. Ta mesna navada zahteva trajno rejo 8 funtov piščančjega mesa, 70 funtov svinjskega mesa in 170 funtov govejega mesa. Skupaj to pomeni 110 kg mesa oz. 170 kg živali (saj v meso spremenimo približno dve tretjini živali). In če ima 170 kg živali podobne energijske potrebe kot človek (čigar 65 kg porabi 3 kWh/d), potem je moč, s katero zadostimo mesni navadi, naslednja:

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

Spet sem si dovolil fiziološko primerjavo živali in človeka; natančnejša ocena energije za pripravo piščanca je v opombah na koncu poglavja. To ni pomembno, hočem samo grobo oceno in imamo jo. Moč, ki jo potrebujemo za pripravo hrane za tipičnega porabnika zelenjave, mlečnih izdelkov, jajc in mesa je $1,5+1,5+1+8=12 \text{ kWh na dan}$. (Dnevna kalorična bilanca

Slika 13.4 Dve jajci na dan.

mesojedci: 8 kWh/d

Slika 13.5 Prehranjevanje z mesom zahteva dodatno energijo, saj moramo hraniti postrojene živali, ki jih bo človek pojedel.

tega orisa prehrane je 1,5 kWh iz zelenjave; 0,7 kWh iz mlečnih izdelkov; 0,2 kWh iz jajc in 0,5 kWh iz mesa, skupaj 2,9 kWh na dan.)

Številka ne vključuje nobene porabe energije, povezane z gojenjem, gnojenjem, predelavo, hlajenjem in prevozom hrane. Nekatere od teh porab bomo ocenili v nadaljevanju poglavja in nekatere v 15. poglavju.

Govorijo ti izračuni v prid vegetarijanstva, kjer je poraba energije manjša? Odvisno, kje se živali hranijo. Vzemimo strme valižanske griče in gore. Bi to zemljo lahko uporabljali za kaj drugega kot pašo? Ti kamniti pašniki se pri prehrani ljudi lahko uporabljajo izključno za rejo ovac. Vzemite naravna zelena pobočja kot nasade biogoriva, ki ne zahtevajo vzdrževanja, ovce pa kot avtomatizirane razmnožujoče se stroje za spravilo biogoriva. Izgube energije na poti od sončnega sevanja do bravine so precejšnje, toda na takšnih mestih boljšega načina zajemanja sončne energije najverjetneje ni. (Nisem prepričan, da ta argument za ovčerejo v Walesu v resnici drži: v najhujšem vremenu valižanske ovce preselijo na nižjeležeče pašnike, kjer jim v prehrano dodajo sojino krmo in drugo hrano, gojeno s pomočjo energijskeko intenzivnih gnojil. Kolikšna je v resnici poraba energije? Ne vem.) Na podoben način lahko zagovarjamo mesojedstvo v neobdelanih goščavah Afrike in na pašnikih Avstralije ali porabo mlečnih izdelkov v Indiji, kjer milijone krav hranijo s stranskimi produkti gojenja riža in koruze.

Po drugi strani pa ni dvoma: kjerkoli živali redimo v kletkah in jih hranimo z žitaricami, ki bi jih lahko jedli ljudje, bi bilo z energijskega vidika učinkoviteje odstraniti vmesni kokošji ali svinjski člen in z žitaricami hraniti neposredno ljudi.

Gnojila in druga poraba energije v kmetijstvu

Vgrajen ekvivalent moči je pri evropskih gnojilih približno **2 kWh na dan na prebivalca**. Glede na poročilo, ki ga je Univerza v Warwicku pripravila za britansko Ministrstvo za okolje, hrano in podeželje, smo leta 2005 v Veliki Britaniji v kmetijstvu porabili **0,9 kWh na dan na prebivalca** za kmetijska vozila, mehanizacijo, ogrevanje (predvsem rastlinjakov), razsvetljavo, ventilacijo in hlajenje.

Poraba energije Murija, Fifija in Bliska

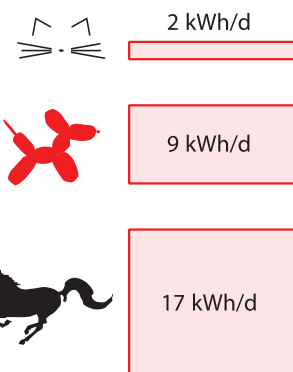
Štirinožni prijatelji! Ste služabnik psa, mačke ali konja?

V Veliki Britaniji je kakšnih 8 milijonov mačk. Predpostavimo, da skrbite za eno od njih. Kakšna je poraba energije Murija? Če pojé 50 g mesa na dan (piščanca, svinjine in govedine), potem izračun prejšnjih odstavkov pove, da za pripravo Murijeve hrane porabimo nekaj manj kot **2 kWh na dan**. Za vegetarijansko mačko bi bila številka manjša.

Če vaš pes Fifi pojé 200 g mesa in za 1 kWh ogljikovih hidratov na dan, za pripravo njegove hrane porabimo približno **9 kWh na dan**.



Slika 13.6 Energijske rastline žanjem za hrano.



Slika 13.7 Moč, potrebna za pripravo hrane za štirinožne prijatelje.

Konj Blisk tehta približno 400 kg in porabi **17 kWh na dan**.

Miti in zmote

Slišal sem, da je energijski odtis hrane tako velik, da se je »bolje voziti kot hoditi«.

Ali to drži, je odvisno od vaše prehrane. Vsekakor lahko najdete hrano, pri kateri je odtis fosilnih goriv večji od energije, ki jo hrana daje človeku. Primer: vgrajena energija vrečke čipsa je 1,4 kWh fosilnih goriv na kWh zaužite kemične energije. Pri mesu je še večja. Pri tipični prehrani je po podatkih študije Univerze v Exeterju približno 6 kWh na zaužito kWh. Če nas zanima, ali manj energije porabimo z vožnjo avtomobila ali hojo, moramo poznati izkoristek obeh oblik transporta. Pri tipičnem avtomobilu v 3. poglavju je bila poraba energije 80 kWh na 100 km. Neto količine energije, ki jo porabimo pri hoji, je 3,6 kWh na 100 km, kar je 22-krat manj. Če se prehranjujete izključno s hrano, katere odtis je večji od 22 kWh na kWh, potem je poraba energije prevoza iz točke A v točko B v vozilu na fosilna goriva dejansko manjša, kot če greste lastnonožno. Ob tipični prehrani (6 kWh na kWh) pa »bolje voziti kot hoditi« postane zmota. Pri hoji porabimo štirikrat manj energije.

Opombe in dodatno branje

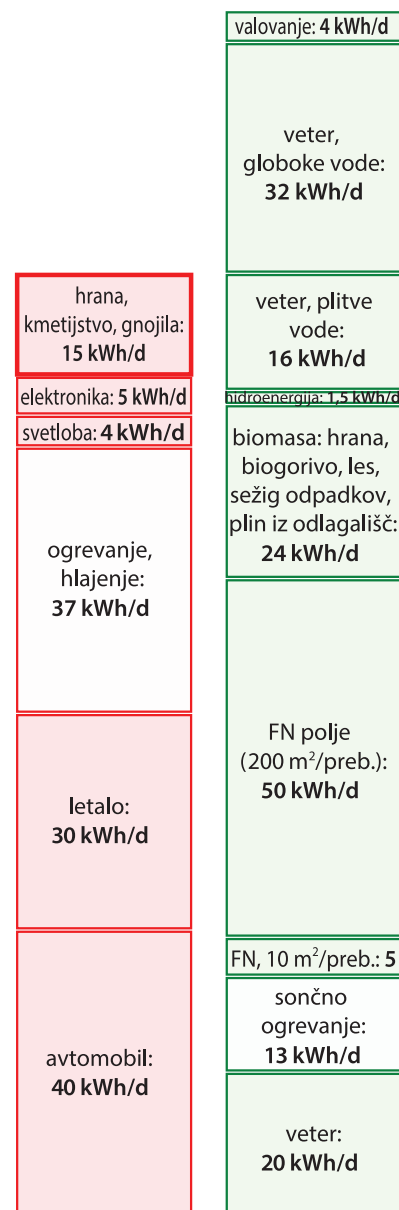
stran

76 Tipična krava molznica da 16 litrov mleka na dan. V Veliki Britaniji je 2,3 milijona krav molznic in vsaka da približno 5900 litrov na leto. Polovica vsega kravjega mleka gre v prodajo kot tekoče mleko. www.ukagriculture.com, www.vegsoc.org/info/cattle.html

77 Izdelava zrezka vzame približno 1000 dni govejega časa. 33 mesecev od spočetja do klavnice: 9-mesečna brejost in 24-mesečna reja. www.shabdenparkfarm.com/farming/cattle.htm.

- **Kokoši.** Odrasla (20-tedenska) nesnica tehta 1,5 ali 1,6 kg. Njena krma vsebuje 2850 kcal energije na kg, kar je 3,3 kWh na kg; njena poraba krme pri 6 tednih starosti doseže 340 g na teden, pri 20 tednih pa 500 g. Ko začne nesti jajca, običajno porabi 110 g krme na dan.

Energijska vsebnost krme za pitovne piščance je 3,7 kWh na kg. Poraba energije je 400–450 kcal na dan na piščanca (0,5 kWh/d na piščanca), pri čemer je običajna telesna masa 2 kg. Pitovni piščanec z maso 2,95 kg skupaj porabi 5,32 kg krme [5h69fm]. Količina vgrajene energije je pri pitovnem piščancu tako približno 6,7 kWh na kg živali oz. 10 kWh na kg zaužitega mesa. Če bi namesto okvirne domneve uporabil to številko, bi energijske potrebe piščanca nekoliko narasle. A glede na to, da v energijskem odtisu mešane mesne prehrane glavno vlogo igra govedina, v resnici ni pomembno, da sem piščance podcenil. Vir: Pododbor za prehrano s perutninskim mesom, National Research Council (1994), www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923, MacDonald (2008) in www.statistics.gov.uk/statbase/datasets2.asp.



Slika 13.8 Hrana in kmetijstvo.

- 77 *Predpostavimo, da pojedete pol funta (227 g) mesa na dan, od tega enako količino piščanca, svinjine in govedine.* To je skoraj raven povprečne porabe mesa v Ameriki, ki je 251 g na dan – od tega 108 g piščanca, 81 g govedine in 62 g svinjine (MacDonald 2008).
- 78 *Vgrajen ekvivalent moči je pri evropskih gnojilih približno 2 kWh na dan na prebivalca.* V obdobju 1998–9 smo v Zahodni Evropi porabili 17,6 Mt gnojil na leto: 10 Mt nitratov, 3,5 Mt fosfata in 4,1 Mt kalijevih gnojil. Energijski odtisi teh gnojil so 21,7, 4,9 oz. 3,8 kWh na kg. Če to energijo porazdelimo med 375 milijonov ljudi, dobimo skupni odtis v višini 1,8 kWh na dan na prebivalca. Vira: Gellings in Parmenter (2004), International Fertilizer Industry Association [5pwojp].
- *Leta 2005 smo v Veliki Britaniji v kmetijstvu porabili 0,9 kWh na dan na prebivalca.* Vir: Warwick HRI (2007).

79 *Vgrajena energija vrečke čipsa je 1,4 kWh fosilnih goriv na kWh zaužite kemične energije.* To vrednost sem ocenil na podlagi ogljičnega odtisa vrečke čipsa: 75 g CO₂ za standardno 35-gramsko vrečko [5bj8k3]. 44 % tega odtisa je povezanega s kmetijstvom, 30 % s predelavo, 15 % z embalažo ter 11 % s transportom in z odpadki. Potrošnik prejme 770 kJ kemične energije. Ogljični odtis tega prehranbnega izdelka je torej 350 g na kWh. Če predpostavimo, da večina tega ogljičnega odtisa izvira iz fosilnih goriv z 250 g CO₂ na kWh, potem je energijski odtis čipsa 1,4 kWh fosilnih goriv na kWh zaužite kemične energije.

 - *Količina vgrajene energije tipične prehrane je približno 6 kWh na zaužito kWh.* Coley (2001) ocenjuje, da je količina vgrajene energije tipične prehrane 5,75-krat večja od pridobljene energije. Odtis CO₂ pri hoji je 42 g/km, pri kolesarjenju 30 g/km. Za primerjavo: pri vožnji povprečnega avtomobila oddajamo 183 g/km.
 - *Pri hoji porabimo 3,6 kWh na 100 km.* Človek pri hoji skupaj porabi 6,6 kWh na 100 km [3s576h]. Da dobimo energijski odtis hoje, odštejemo energijo, ki jo porabimo med počivanjem (Coley 2001).

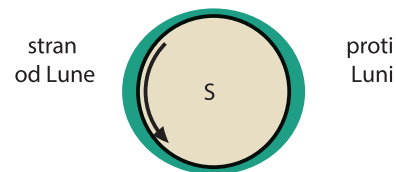
Dodatno branje: Weber in Matthews (2008).

14 Energija plimovanja

Luna in Zemlja se vrtinčita in sučeta v plesu okrog Sonca. Skupaj se okoli Sonca zavrtita v enem letu, Luna okoli Zemlje pa v 28 dneh. Hkrati se Luna v 28 dneh tudi zasučje okrog svoje osi, zato svoji plesni partnerki vedno kaže isti obraz. Diva Zemlja ni tako galantna, vsak dan izvede po eno pirueto. Plesalce skupaj vleče sila gravitacije; vsi delci Zemlje, Lune in Sonca težijo drug k drugemu. Vsota vseh teh sil *skoraj* natančno zadostuje za to, da se vrteči ples nadaljuje po začrtanih tirnicah. Med gravitacijskimi silami in tistimi, ki ples ohranjajo pri življenju, pa so vendarle drobna neravnovesja. Posledica teh je plimovanje.

Neravnovesja, ki izhajajo iz medsebojnega vrtenja Lune in Zemlje, so približno trikrat večja od neskladja zaradi tega, ker Zemlja okrog Sonca pleše počasneje, zato se višina plime in oseke spreminja glede na lunine mene, ob katerih sta Luna in Sonce bolj poravnana ali manj poravnana. Ob ščipu in mlaju (ko so Zemlja, Luna in Sonce v ravni črti) se neravnovesje okrepi ter povzroča najvišjo plimo in najnižjo oseko, čemur pravimo obdobje izrazitega plimovanja ali *žive morske mene*. (Začnejo se natančno kot ura vsaka dva tedna.) Ob vmesnem prvem in zadnjem kraju neravnovesja deloma izginejo in plimovanje se zmanjša; temu pravimo obdobje šibkega plimovanja ali *mrtve morske mene*. Ob izrazitem plimovanju je amplituda približno dvakrat večja kot ob šibkem plimovanju, torej je plima takrat glede na srednjo raven morja dvakrat višja, oseka dvakrat nižja, plimski tokovi pa dvakrat močnejši.

Zakaj pride do plime in oseke po dvakrat na dan? No, če bi bila Zemlja popolna krogla, gladka, z oceani obdana biljardna krogla, bi ples Zemlje in Lune na plimovanje učinkoval tako, da bi vode na eni strani povlekel proti Luni, na drugi strani pa odrinil od njega, da bi dobile obliko žoge za ragbi (slika 14.1). Če bi živeli na ekvatorju te biljardne Zemlje, ki se znotraj vodnega zapredka v enem dnevu zavrti okrog svoje osi, bi se vodna gladina pred vami dvignila in spustila dvakrat na dan: dvignila bi se, ko bi potovali mimo obeh konic žoge za ragbi. Ta ilustrativna razlaga nima povsem realne osnove. Zemlja v resnici ni gladka in (kot ste morebiti opazili) ni enakomerno obdana z vodo. Voda ne more v dveh grbah na dan pljuskniti okrog Zemlje, ker so ji napoti celine. Delovanje plime in oseke je zato bolj zapleteno. V velikem vodnem telesu, kakršen je Atlantski ocean, nastajajo vrhovi in doline, a ker ne morejo huškniti okrog Zemlje, naredijo tisto, kar pač lahko: hušknijo po obodu oceana. V severnem Atlantiku sta dva vrhova in dve dolini in vsi ga v nasprotni smeri urinega kazalca obkrožijo enkrat na dan. Pri nas v Veliki Britaniji atlantskih vrhov in dolin ne vidimo neposredno – od tistega pravega Atlantika nas loči nekaj sto kilometrov plitvega bazenčka, ki mu pravimo kontinentalna polica. Vsakokrat, ko vrh huškne mimo v pravem Atlantiku, se en vrh odvali tudi po bazenčku. Med zaporednimi vrhovi in dolinami mine šest ur. Ali če smo natančnejši,



Slika 14.1 Ocean, ki obdaja Zemljo v obliki biljardne krogle. Gledamo naravnost v severni pol, Luna pa je 60 cm od roba strani na desni. Zemlja se v enem dnevu zavrti okrog svoje osi znotraj vodnega oklepa, ki ima obliko žoge za ragbi. Oceani so razpotegnjeni proti Luni in v nasprotno smer, saj se gravitacijske sile Lune ne ujemajo natančno s centripetalno silo, ki jo Zemlja in Luna potrebujeta, da se lahko še naprej sučeta okrog skupnega težišča. Človek na ekvatorju (ki se vrti, kot kaže puščica) vsak dan doživi po dve plimi in oseki.

šest ur in petnajst minut, saj Luna ne vzide vsakih 24 ur, ampak približno vsakih 25.

Hitrost potovanja vrhov in dolin se spreminja z globino bazenčka. Plitvejši kot je, počasnejši in večji so vrhovi in doline. Na odprtem morju je višina plimovanja okrog pol metra. V ustjih evropskih rek amplituda pogosto doseže tudi štiri metre. Na severni polobli se zaradi Coriolisove sile (ta je povezana z rotacijo Zemlje in deluje samo na premikajoča se telesa) plimski vrhovi in doline na svoji poti držijo desnih bregov. Na primer, plima in oseka v Rokavskem prelivu sta izrazitejši na francoski strani. Podobno se vrhovi in doline ob vstopu v Severno morje pri otočju Orkney držijo britanske strani, odpotujejo navzdol do izliva Temze in pri Nizozemski zavijejo levo, da se poklonijo še Danski.

Energiji plimovanja ponekod pravijo »lunarna energija«, saj voda pljuska naokrog večinoma po zaslugi Lune. Vendar pa večina energije plimovanja v resnici izhaja iz rotacijske energije vrteče se Zemlje. Ta pa se zato počasi upočasnjuje.

Kako torej lahko uporabimo energijo plimovanja in koliko je lahko zajamemo?

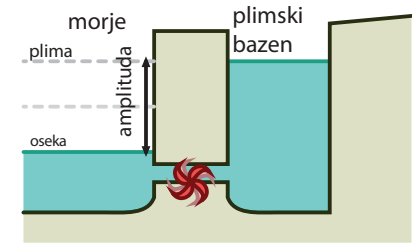
Grobe ocene moči plimovanja

Ko razmišljamo o moči plimovanja, si lahko ob morju zamislimo umetni bazen z vodnim kolesom, ki se ob polnjenju ali praznjenju bazena vrti (sliki 14.2 in 14.3). V poglavju G se naučimo oceniti, koliko moči lahko zagotovi takšen plimski bazen. Če naj bo amplituda plimovanja 4 m, kolikor je tipično v ustjih evropskih rek, potem je največja moč umetnega plimskega bazena, ki se ob plimi hitro napolni in ob oseki hitro izprazni ter energijo proizvaja iz obeh smeri toka, približno 3 W/m^2 . Specifična moč je tako enaka kot pri vetrni elektrarni na morju. Kako velike morajo biti vetrne elektrarne, da imajo viden učinek, že vemo. *Približno tako velike kot države.* Prav tako bi tudi skupna površina plimskih bazenov morala biti približno primerljiva s površino Velike Britanije, če naj bi z njimi proizvedli toliko moči, kolikor je skupna britanska poraba.

Neverjetno, ampak Velika Britanija ima v resnici naravni plimski bazen ravno pravih dimenzij. Pravimo mu Severno morje (slika 14.5). Če bi na prava mesta preprosto namestili generatorje, bi lahko zajeli precejšnjo moč. Generatorji bi bili kot podvodne vetrnice. Ker je gostota vode približno tisočkrat večja od gostote zraka, je moč vodnega toka približno tisočkrat večja od moči vetra pri isti hitrosti. A pustimo plimske elektrarne za hip ob strani, pogledjmo najprej, koliko »surove« energije plimovanja se vsak dan vali okrog Velike Britanije.



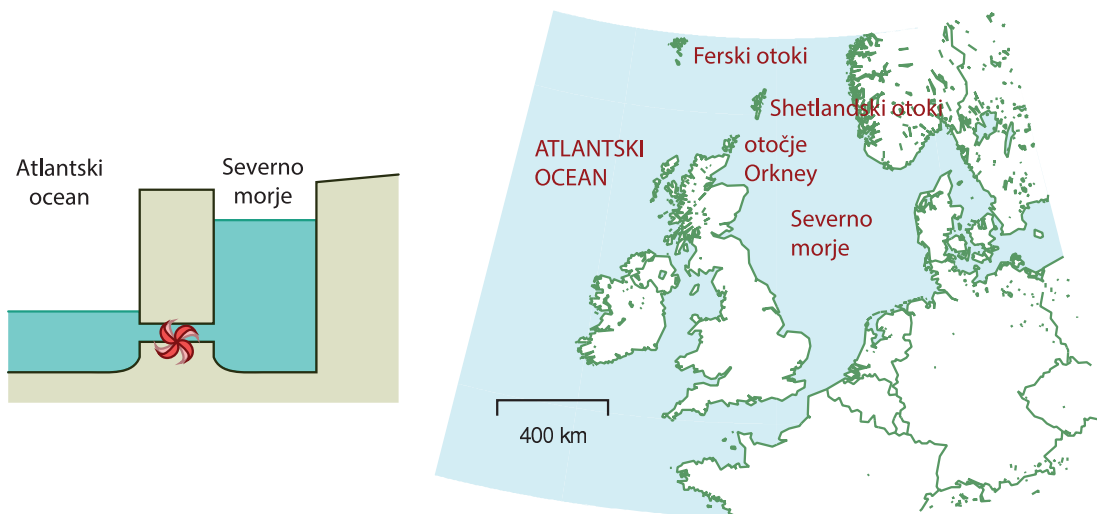
Slika 14.2 Plimski bazen in mlin Woodbridge. Fotografiji je prijazno prispeval Ted Evans.



Slika 14.3 Umetni plimski bazen. Ob plimi so ga napolnili, zdaj pa je oseka. Vodo spustimo čez električni generator, ki potencialno energijo vode spremeni v elektriko.

amplituda plimovanja	specifična moč
2 m	1 W/m ²
4 m	3 W/m ²
6 m	7 W/m ²
8 m	13 W/m ²

Tabela 14.4 Specifična moč (moč na enoto površine) plimskih bazenov, če predpostavimo proizvodnjo tako ob plimi kot ob oseki.



Slika 14.5 Britansko otočje ima ugoden položaj: Severno morje tvori naravni plimski bazen, v katerega – in iz njega – dvakrat na dan pljuskne velikanska količina vode.

Surova vstopna moč plimovanja

Pri plimovanju ob britanski obali gre za prave plimske valove – tako namreč ponekod pravijo tudi cunamiju, čeprav s plimovanjem nima zveze. Poglejmo, kako plima pripotuje z Atlantika. Vzhodneje kot se pomaknemo po Rokavskem prelivu od otočja Scilly do Portsmoutha in naprej do Dovra, pozneje nastopi. Vrh plimskega vala se po prelivu pomika s hitrostjo približno 70 km/h. (Vrh potuje veliko hitreje kot sama voda, tako kot običajni valovi na morju.) Podobno se plima s hitrostjo 100 km/h pomika v smeri urinega kazalca okrog Škotske, se po Severnem morju spusti od Wicka do Berwicka in naprej do Hulla. Njuni poti se sekata ob izlivu Temze. Po naključju škotski vrh prispe približno 12 ur pozneje kot vrh, ki je pripotoval mimo Dovra, torej skoraj sočasno z naslednjo plimo prek Dovra, v Londonu pa imamo plimo tako dvakrat na dan, kot je tudi običajno.

Iz plimovanja nikoli ne moremo pridobiti več moči, kot je seštevek moči teh plimskih valov iz Atlantika. Skupno moč valov, ki prečkajo črto na sliki 14.6, so že izmerili: v povprečju je 100 kWh na dan na prebivalca. Če bi lahko izkoristili 10 % te vstopne moči in če je izkoristek pri pretvorbi in prenosu 50 %, bi v povprečju dobili **5 kWh na dan na prebivalca**.

To je samo začetno ugibanje brez upoštevanja tehničnih podrobnosti. Zato zdaj ocenimo, koliko moči bi lahko zagotovile tri konkretne rešitve: plimske elektrarne, zajezitev in plimske lagune na morju.



Slika 14.6 Povprečna vstopna moč plimskih valov, ki prečkajo črto, naj bi bila po meritvah 250 GW. Če to »surovo« moč porazdelimo med 60 milijonov ljudi, dobimo 100 kWh na dan na prebivalca.

Elektrarne na plimski tok

Energijo plimovanja bi lahko zajeli tako, da bi zgradili podobne elektrarne, kot jih uporabljamo za veter. Prva na elektroenergetsko omrežje priključena »podvodna vetrnica« oz. plimski generator je 300 kW turbina, ki so jo leta 2003 namestili v bližino severnjaškega Hammerfesta na Norveškem. Natančnih podatkov o doseženi proizvodnji niso objavili in doslej še nihče ni zgradil plimske elektrarne z več kot eno turbino, zato se bomo morali za oceno, koliko moči lahko zagotovijo, opreti na fiziko in sklepanje. Če predpostavimo, da za elektrarne na plimski tok veljajo podobna pravila smiselnega načrtovanja kot za vetrne in da plimske turbine dosežejo največ tak izkoristek kot najboljše vetrne, pridemo do številke o specifičnih močeh (pri različnih hitrostih toka), kot jih vidimo v tabeli 14.7.

Glede na to, da so plimski tokovi s hitrostjo dveh ali treh vozlov pogosti, bi bila specifična moč na mnogih krajih okoli Britanskega otočja 6 W/m² ali več. Številko lahko primerjamo z našimi ocenami za vetrne (2–3 W/m²) in sončne elektrarne (5–10 W/m²).

Moč plimovanja sploh ni od muh! Koliko bi se je nabralo, če nikjer okrog Velike Britanije ne bi bilo nobenih ekonomskih omejitev za njeno izkoriščanje? V poglavju G navajamo hitrost tokov na najboljših območjih ob Veliki Britaniji in ocenimo, da bi lahko proizvajali 9 kWh/d na prebivalca.

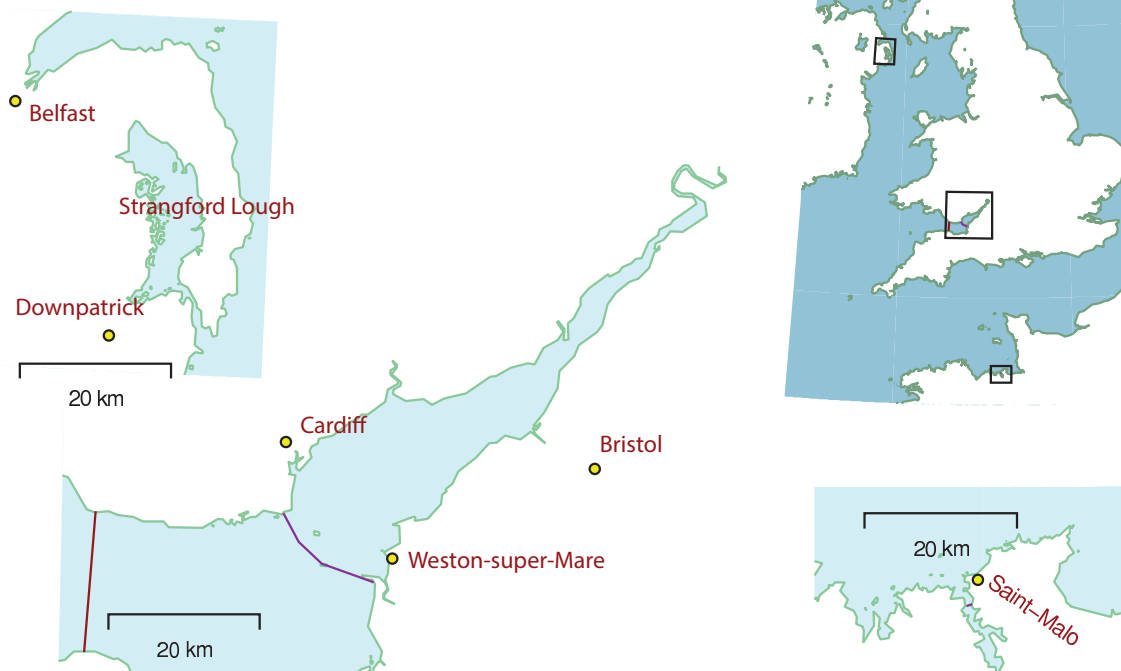
Zajezev

Plimske zajezev so preskušena tehnologija. Slovita elektrarna La Rance v Franciji, kjer je povprečna amplituda plimovanja osupljivih 8 metrov, od leta 1966 zagotavlja povprečno 60 MW. Tudi v ustju britanske reke Severn je amplituda neverjetno velika. Pri Cardiffu doseže 11,3 m v obdobju izrazitega plimovanja in 5,8 m v obdobju šibkega plimovanja. Če bi ustje (od kraja Weston-super-Mare do Cardiffa) zajezili, bi dobili plimski bazen s površino 500 km² (slika 14.8). Ne pozabite, koliko večji je od ustja reke Rance. Koliko moči bi zagotovil, če bi vodo ob pravem času spuščali v bazen in iz njega ter izkoriščali tako plimo kot oseko? Glede na teoretične podatke v tabeli 14.4 bi bil povprečen prispevek pregrade (s 30 W/m²) največ 14,5 GW oz. 5,8 kWh/d na prebivalca, kadar je amplituda plimovanja 11,3 m. Kadar je amplituda 5,8 m, bi bil povprečen prispevek elektrarne z jezom (z 8 W/m²) največ 3,9 GW oz. 1,6 kWh/d na prebivalca. Pri teh številkah predpostavljamo, da vodo spustimo noter na mah, takrat, ko plima doseže najvišjo točko, ven pa, ko oseka doseže najnižjo točko. V praksi bi pritekanje in odtekanje trajalo nekaj ur, to pa bi moč nekoliko zmanjšalo.

Sedanji načrti za zajezev predvidevajo proizvodnjo samo v eni smeri, kar količino zmanjša za dodatnih 50 %. Inženirji so v poročilu o predlogu za pregrado na reki Severn zapisali, da bi z izkoriščanjem oseke povprečno zagotovili 0,8 kWh/d na prebivalca. Poleg tega bi pregrada ščitila pred poplavami, stroške katerih ocenjujejo na 120 milijonov funtov na leto.

hitrost (m/s)	(vozli)	specifična moč (W/m ²)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabela 14.7 Specifična moč elektrarne na plimski tok (v vatih na kvadratni meter morskega dna) kot funkcija hitrosti toka (1 vozlel = 1 navtična milja na uro = 0,514 m/s).



Plimske lagune

Plimske lagune ustvarimo tako, da del morja ogradimo z zidom in ga potem uporabljamo kot umetna ustja rek. Za gradnjo lagune nujno potrebujemo plitvo vodo in veliko amplitudo plimovanja. Velja ekonomija obsega: v velikih lagunah proizvajamo cenejšo elektriko kot v majhnih. Najboljše britanski območji za veliko plimsko laguno sta zaliv Wash ob vzhodni obali in morje ob Blackpoolu na zahodni obali (slika 14.9). Manjše zmožljivosti bi lahko zgradili tudi na severu Walesa, v Lincolnshiru, na jugozahodu Walesa in v vzhodnem Sussexu.

Če na enem mestu zgradimo dve laguni, lahko z elegantnim trikom povečamo proizvodnjo in dosežemo, da laguna zagotavlja moč glede na potrebe, in to ves čas, ne glede na fazo plimovanja. Eno laguno določimo za »visoko«, drugo pa za »nizko«. Ob oseki z nekaj energije, ki jo proizvedemo ob praznjenju visoke lagune, izčrpamo vodo iz nizke lagune, da bo njena gladina še nižja od najnižje gladine morja ob oseki. Energija, ki jo porabimo za črpanje, se povrne z obrestmi ob plimi, ko se pri polnjenju nizke lagune ustvarja električna energija. Podobno lahko ob plimi z energijo, ki jo proizvaja nizka laguna, črpamo dodatno vodo v visoko laguno. Ne glede na fazo plimovanja bo tako ena od lagun proizvajala električno energijo. Takšna dvojica plimskih lagun bi lahko delovala tudi kot črpalna elektrarna in bi shranjevala presežno energijo elektroenergetskega omrežja.

Slika 14.8 Predlogi za zaježitev reke Severn (spodaj levo) in Strangford Lough na Severnem Irskem (zgoraj levo) v istem merilu kot pregrada La Rance (spodaj desno).

Zemljevid prikazuje dve predlagani lokaciji za zaježitev reke Severn. S pregrado pri kraju Weston-super-Mare bi zagotavljali povprečno 2 GW (0,8 kWh/d na prebivalca), z bolj oddaljeno različico pa dvakrat toliko. Veliko plimske moči je na voljo na Severnem Irskem pri morskem rokavu Strangford Lough. Njegova površina meri 150 km², amplituda plimovanja v Irskem morju je 4,5 m v obdobju izrazitega plimovanja oz. 1,5 m v obdobju šibkega plimovanja – žal je to manj kot pri rekah Rance in Severn. »Surova« moč tega naravnega plimskega bazena je približno 150 MW, kar porazdeljeno med 1,7 milijona prebivalcev Severne Irske pomeni 2 kWh/d na prebivalca. V rokavu Strangford Lough je prvi na elektroenergetsko omrežje priključen plimski generator v Veliki Britaniji.

Povprečna specifična moč plimskih lagun v britanskih vodah bi lahko dosegla $4,5 \text{ W/m}^2$. Če bi torej uredili lagune s skupno površino 800 km^2 (kot kaže slika 14.9), bi zagotovili **$1,5 \text{ kWh/d}$ na prebivalca**.

Prednosti plimovanja

Če vržemo številke na kup, bi z zaježitvami, lagunami in elektrarnami na plimski tok lahko proizvedli kakšnih **11 kWh/d na prebivalca** (slika 14.10).

V Veliki Britaniji energije plimovanja nikoli nismo izkoriščali v industrijskem obsegu, zato je težko predvideti, s kakšnimi ekonomskimi in tehničnimi težavami bi se srečali ob nameščanju in vzdrževanju plimskih turbin – korozijo, nabiranjem mulja, zapletanjem naplavin in brodolomnih ostankov. Vendar pa nam na Britanskem otočju energija plimovanja lahko vzbuja navdušenje vsaj zaradi naslednjih sedmih razlogov. 1. Energija plimovanja je popolnoma predvidljiva; gre za obnovljiv vir, na katerega se v nasprotju z vetrno in sončno energijo lahko zanesemo; deluje dan in noč, vse leto; s pomočjo plimskih lagun bi lahko energijo shranjevali tudi za rabo na zahtevo. 2. Zaporedne plime in oseke okrog Britanskega otočja potujejo približno 12 ur, zato so pri otokih Anglesey, Islay, otočju Orkney in Dovru najmočnejši tokovi ob različnih urah, skupaj pa bi bila lahko vrsta elektrarn na plimski tok konstantnejši vir moči za elektroenergetsko omrežje kot eno samo plimsko polje, četudi bi ta moč z luninimi menami naraščala in upadala. 3. Moč plimovanja se v milijonih let ne bo spremenila. 4. V nasprotju s fotonapetostno sončno energijo ne zahteva drage opreme. 5. Še več, ker je specifična moč tipičnega plimskega toka večja od specifične moči tipičnega vetra, je 1-megavatna plimska turbina manjša od 1-megavatne vetrne turbine, zato bi morebiti utegnili biti tudi cenejša. 6. Življenje pod valovi je umirjeno, tam ne more priti do nenadnega plimskega neurja, zato pri načrtovanju podvodnih plimskih turbin ne bo treba upoštevati tako velikih varnostnih dejavnikov kot pri vetrnih, ki morajo zdržati tudi najhujše viharje. 7. Ljudje večinoma živijo na kopnem in pod morje ne vidijo, zato bi morali biti nasprotovanje plimskim turbinam iz estetskih razlogov manjše kot pri vetrnih turbinah.



Slika 14.9 Plimski laguni s površinama 400 km^2 , ena pri Blackpoolu in ena v zalivu Wash. Za primerjavo je označeno tudi ustje reke Severn.

Miti in zmote

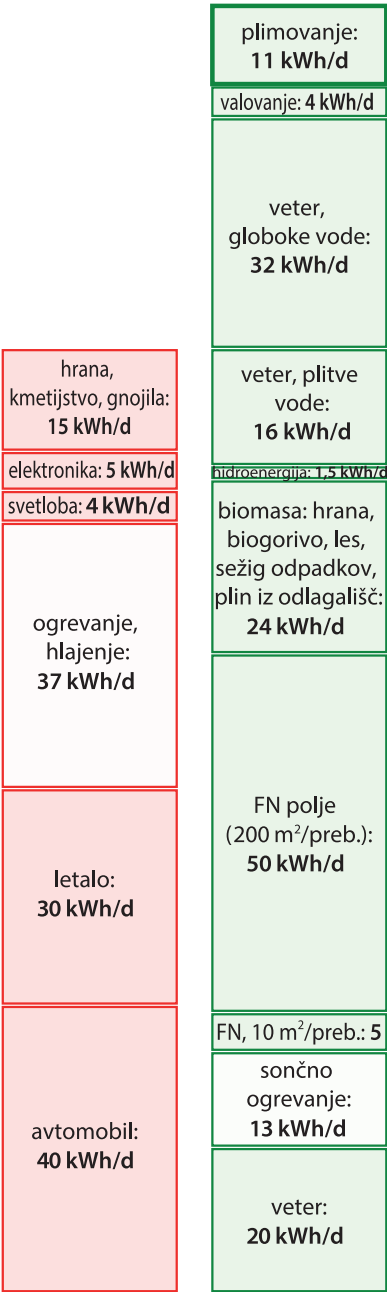
Energija plimovanja ne bi smela veljati za obnovljivo, četudi je čista in okolju prijazna. Njeno izkoriščanje upočasnjuje rotacijo Zemlje. Dolgoročno je zagotovo ne moremo uporabljati.

Ne drži. Naravno plimovanje že tako ali tako upočasnjuje rotacijo Zemlje. Naravna izguba rotacijske energije znaša približno 3 TW (Shepherd 2003). Zaradi plimskega trenja se dan vsako stoletje podaljša za 2,3 milisekunde. Številni sistemi izkoriščanja energije plimovanja preprosto izkoriščajo energijo, ki bi se zaradi trenja tako ali tako izgubila. Tudi če bi moč, ki bi jo pridobili iz sistema Zemlja-Luna, *podvojili*, bi zadoščala še za več kot milijardo let.

Opombe in dodatno branje

stran

- 82 *Moč umetnega plimskega bazena.* Površinsko specifično moč plimskega bazena izpeljemo v poglavju G na str. 311.
- *Velika Britanija že ima naravni plimski bazen /.../ Pravimo mu Severno morje.* Ne smem vzbujati vtisa, da se Severno morje polni in prazni kot plimski bazen ob angleški obali. Pritoki v Severno morje so bolj zapleteni, saj se grbina na morski gladini po Severnem morju širi približno tako dolgo, kolikor je dolg plimski interval. A kljub temu v Severno morje in iz njega, pa tudi znotraj, krožijo zajetni plimski tokovi.
- 83 *Skupno vstopno moč plimskih valov, ki prečkajo črto, so že izmerili: v povprečju je 100 kWh na dan na prebivalca.* Vir: Cartwright in sod. (1980). Bralcem, ki imajo radi hitre grobe izračune, v poglavju G pokažemo, kako izpeljati to oceno iz teoretičnih osnov.
- 84 *La Rance* – tam so v treh desetletjih proizvedli 16 TWh, povprečna moč je tako 60 MW. (Največja moč je 240 MW.) Amplituda plimovanja doseže 13,5 m, zajezena površina meri 22 km²; pregrada je dolga 750 m. Povprečna specifična moč: 2,7 W/m². Vir: [6xrm5q].
- 85 *Inženirji so v poročilu o predlogu za pregrado na reki Severn zapisali /.../ 17 TWh/leto.* (Taylor 2002b). To (2 GW) ustreza 5 % sedanje skupne povprečne britanske porabe električne energije.
- 86 *Povprečna specifična moč plimskih lagun bi lahko dosegla 4,5 W/m².* MacKay (2007a).



Slika 14.10 Plimovanje.

15 Stvari in predmeti vsakdanje rabe

Eden glavnih ponorov energije v »razvitem« svetu je ustvarjanje stvari in predmetov vsakdanje rabe. Ti imajo v svojem naravnem življenjskem ciklu tri stopnje. Novorojeno stvar najprej v sijoči embalaži razstavijo na polici v trgovini. V tej fazi ji rečemo »blago«. Ko jo odnesemo domov, kjer odloži embalažo, se iz »blaga« preobrazi v drugo razvojno stopnjo, »navlako«. Navlaka z lastnikom živi nekaj mesecev ali let. V tem obdobju se lastnik zanjo večinoma ne zmeni, saj v trgovinah kupuje novo blago. Sčasoma se kot po čudežu sodobne alkimije navlaka preobrazi v svojo zadnjo obliko, odpadek. Neizurjeno oko včasih težko razloči med »odpadkom« in tem, kar je ta nekoč bil, torej zaželeno »blago«. Kakorkoli, na tej stopnji skrbni lastnik smetarju plača, da stvar odpelje.

Recimo, da nas zanima celotna poraba energije stvari, saj bomo tako morebiti zasnovali boljše stvari. Postopku pravimo analiza življenjskega cikla. Porabo energije česar koli, od sušilnika za lase do križarke, običajno razsekamo na štiri dele:

Faza S: pridobivanje **surovin**. V tej fazi iz tal kopljemo minerale, jih pretopimo, prečistimo in preoblikujemo v lego-gradnike za proizvajalce: na primer plastiko, steklo, kovine in keramiko. Poraba energije te faze zajema tudi stroške transporta surovin do naslednje destinacije.

Faza P: **proizvodnja**. V tej fazi surovine predelajo v proizvod. Tovarna, v kateri zvijejo žice sušilnika, ulijejo elegantne krivine in pozorno sestavijo vse dele, porablja toploto in svetlobo. Poraba energije te faze zajema tudi embalažo in spet transport.

Faza U: **uporaba**. Sušilnik in križarka ob predvideni uporabi žreta energijo.

Faza O: upravljanje z **odpadki**. V tej fazi poraba energije nastaja pri tem, ko stvari spet odložimo v tla (odlagališče odpadkov) ali jih spremenimo nazaj v surovine (reciklaža), ter pri odpravljanju onesnaženja, ki so ga stvari povzročile.

Če nas zanima, koliko energije porabi stvar v svojem življenju, moramo oceniti porabo energije vseh štirih faz in jih sešteti. Običajno v seštevku ena od faz prevladuje, zato za razumno oceno skupne porabe potrebujemo natančno oceno samo za to prevladujočo fazo. Če želimo stvar predelati tako, da bomo zmanjšali njeno skupno porabo energije, običajno moramo zmanjšati predvsem porabo energije prevladujoče faze, hkrati pa paziti, da prihranka energije v tej fazi ne bo izničilo posledično povečanje porabe energije v drugih treh fazah.



Slika 15.1 Oglasno smetenje veleblagovnice Selfridges. (V prevodu: Zaželite si, kupite, pozabite, op. prev.)

	vgrajena energija (kWh na kg)
fosilno gorivo	10
les	5
papir	10
steklo	7
plastika PET	30
aluminij	40
jeklo	6

Tabela 15.2 Vgrajena energija materialov.

Namesto da natančno ocenjujemo, kolikšno moč zahtevata neprestana proizvodnja in transport vseh stvari, pogledimo najprej nekaj pogostih primerov: embalažo pijače, računalnike, baterije, tiskovine, avtomobile in hiše. V tem poglavju se bomo posvetili porabi energije faz S in P, ki jim pravimo tudi »vgrajena« energija. To je rahlo zavajajoče, saj energija v stvareh ni dobesedno vgrajena.

Embalaža pijače

Predpostavimo, da radi pijete kolo in izpraznite pet pločevink multinacionalnih kemikalij na dan, aluminijaste pločevinke pa nato zavržete. To je ena od stvari, pri kateri prevladuje faza pridobivanja surovin. Proizvodnja kovin je, predvsem to velja za aluminij, energijsko intenzivna. Za eno pločevinko porabimo 0,6 kWh, zato z navado »pet na dan« porabljate energijo s hitrostjo **3 kWh/d**.

Vgrajena energija 500-mililitrske (25-gramske) plastenke iz plastike PET je 0,7 kWh – nič bolje od aluminijaste pločevinke!

Druga embalaža

Povprečni Britanec dnevno zavrže 400 g embalaže, pretežno tiste za hrano. Vsebnost vgrajene energije, ko se pomikamo po lestvici embalaže od stekla in papirja do plastike in jeklenih konzerv, je nekje med 7 in 20 kWh na kg. Če je tipična vsebnost vgrajene energije 10 kWh/kg, potem je energijski odtis embalaže **4 kWh/d**. Nekaj te vgrajene energije lahko povrnemo s sežiganjem odpadkov, kot bomo videli v 27. poglavju.

Računalniki

Izdelava osebnega računalnika stane 1800 kWh energije. Če torej novega kupite vsaki dve leti, to ustreza potrebnemu moči **2,5 kWh na dan**.

Baterije

Poraba energije izdelave polnilne nikelj-kadmijeve baterije AA z maso 25 g, ki shrani 0,001 kWh električne energije, je 1,4 kWh (fazi S in P). Če je pri baterijah za enkratno uporabo podobna, potem za dve bateriji AA na mesec potrebujemo približno **0,1 kWh/d**. Poraba energije baterij bo tako najbrž neznamenit prispevek na vašem stolpcu porabe.



aluminij:
3 kWh/d

embalaža:
4 kWh/d

Slika 15.3 Pet pločevink na dan pomeni 3 kWh/d. Vgrajeni ekvivalent moči druge embalaže, ki jo odvrže povprečni Britanec, je 4 kWh/d.

čipi: **2,5 kWh/d**



Slika 15.4 Delavka izdeluje čipe. Foto: ABB. Z izdelavo osebnega računalnika vsaki dve leti porabimo 2,5 kWh na dan.

Časopisi, revije in oglasni letaki

36-stranski časopis, ki ga brezplačno delijo na železniških postajah, tehta 90 gramov, Cambridge Weekly News (56 strani) 150 g, *The Independent* (56 strani) 200 g. 56-stranska revija z nepremičninskimi oglasi na povečanem papirju in revija Cambridgeshire Pride Magazine (32 strani), ki ju domov dobimo zastonj, tehtata 100 g oz. 125 g.

Ta poplava branja in oglasne solate, ki se steka v naše nabiralnike, vsebuje energijo. Energijo porabljamo tudi za njihovo izdelavo in dostavo. Vgrajena energija papirja je 10 kWh na kg, kar pri tipičnem osebnem prilivu oglasov, revij in časopisov, ki skupaj nanese 200 g papirja na dan (kar na primer pomeni en *Independent* na dan), pomeni približno **2 kWh na dan**.

Z recikliranjem papirja bi prihranili približno polovico energije, ki jo potrebujemo za proizvodnjo, nekaj vgrajene energije pa bi morda lahko uporabili s sežigom odpadkov oz. kurjenjem papirja doma.

Večje stvari

Za večino ljudi je največji nakup hiša.

V poglavju H ocenimo porabo energije gradnje nove hiše. Če vsako hišo vsakih 100 let nadomestimo z novo, to pomeni porabo energije 2,3 kWh/d. Nanaša se samo na *lupino* hiše – temelje, opeko, kritino, strešne tramove. Če v hiši živita povprečno 2,3 človeka, je povprečna poraba energije gradnje hiše **1 kWh na dan na prebivalca**.

Kaj pa avtomobil in cesta? Prvega nekateri imamo, drugo pa si običajno delimo. Vgrajena energija novega avtomobila je 76.000 kWh – če ga menjate na 15 let, je povprečna poraba energije **14 kWh na dan**. Treloar, Love in Crawford v analizi življenjskega cikla ocenjujejo, da gradnja ceste v Avstraliji stane 7600 kWh na meter (armiranobetonska gradnja) in da je skupna poraba energije v 40 letih, ki vključuje tudi vzdrževanje, 35.000 kWh na meter. Izračunajmo na podlagi tega okvirno porabo energije britanskih cest. Če izvezemo avtoceste, ostane za 45.000 kilometrov hitrih cest. Če velja 35.000 kWh na meter v 40 letih, nas te stanejo **2 kWh/d na prebivalca**.

Transport stvari

Doslej sem delal ocene *osebne* porabe. »Če izpraznite pet pločevink kole, so to 3 kWh; če kupite *The Independent*, sta to 2 kWh.« Odslej pa bo vse skupaj malo manj osebno. Ko bomo ocenjevali, koliko energije potrebujemo za transport stvari po državi in planetu, bom vzel skupno vrednost za državo in jo delil s številom prebivalcev.



časopisi,
oglasni letaki,
revije:
2 kWh/d



gradnja hiše: **1 kWh/d**



izdelava
avtomobila:
14 kWh/d

gradnja cest: **2 kWh/d**





Slika 15.5 Prehrambni kilometri: prevoz domačih žepkov iz Helstona v Cornwallu za prodajo v 580 kilometrov oddaljeni Cambridge.

Tovorni promet merimo v tonskih kilometrih (tkm). Če tono cornwalskih žepkov prepeljemo 580 km daleč (slika 15.5), potem rečemo, da je bilo opravljenih 580 tonskih kilometrov. Energijska intenzivnost cestnega prometa v Veliki Britaniji je približno **1 kWh na tkm**.

Ko kontejnerska ladja na sliki 15.6 prepelje 50.000 ton tovora 10.000 km daleč, opravi 500 milijonov tonskih kilometrov. Energijska intenzivnost transporta tovora s to ladjo je **0,015 kWh na tkm**. Ste opazili, koliko učinkovitejši je ladijski promet v primerjavi s cestnim? Energijsko intenzivnost različnih oblik transporta prikazuje graf na sliki 15.8.



Slika 15.6 Kontejnerska ladja Ever Uberty v kontejnerskem terminalu Thamesport. Foto: Ian Boyle, www.simplonpc.co.uk

Transport stvari po cesti

Leta 2006 je bil skupen obseg cestnega prometa s težkimi tovornimi vozili v Veliki Britaniji 156 milijard tkm. Če številko porazdelimo med 60 milijonov, dobimo 7 tkm na dan na prebivalca, kar stane **7 kWh na dan na prebivalca** (če predpostavimo, da je energijska intenzivnost 1 kWh na tkm). Mimogrede, četrtno tega prometa so predstavljali hrana, pijača in tobaki izdelki.

Transport po vodi

Leta 2002 je skozi britanska pristanišča šlo 560 milijonov ton tovora. V Centru Tyndall so izračunali, da britanski delež porabe energije mednarodnega ladijskega tovornega prometa znaša **4 kWh/d na prebivalca**.

Transport vode; lulanje

Voda ni posebej prestižna stvar, je pa veliko porabimo – približno 160 litrov na osebo na dan. Zato komunalnim službam prispevamo približno

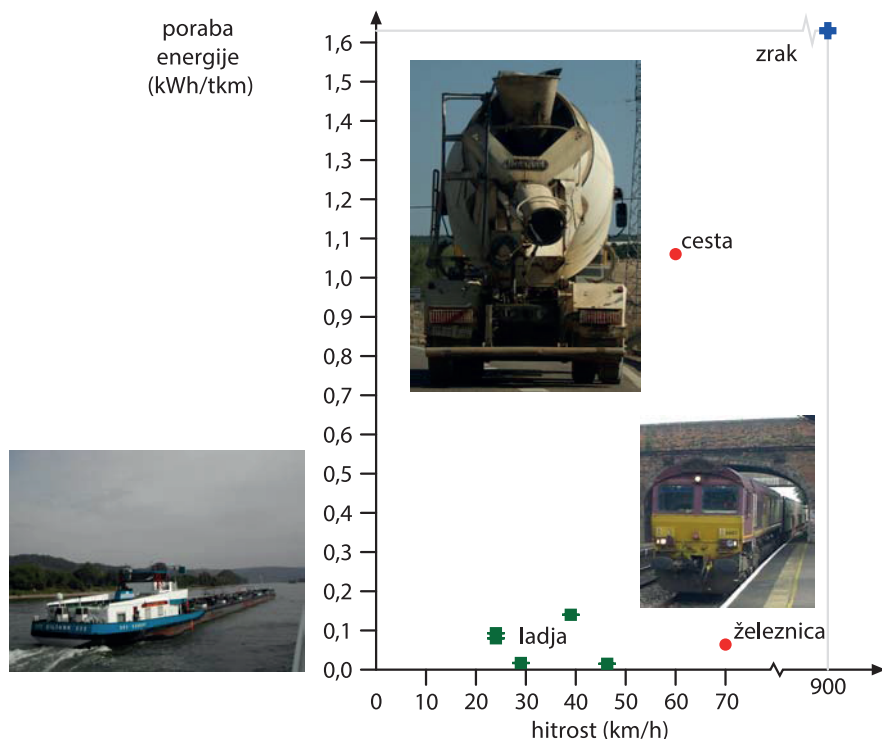
cestni tovorni promet: **7 kWh/d**



Slika 15.7 Kamion je dal, kamion je vzel. Poraba energije cestnega tovornega prometa v Veliki Britaniji: 7 kWh/d na prebivalca.

ladijski tovorni promet: **4 kWh/d**





Slika 15.8 Potrebe po energiji različnih oblik transporta tovora. Ordinatna os prikazuje porabo energije v kWh na neto tonski km (torej energijo na tkm prenesenega tovora, kar ne vključuje mase prevoznega sredstva). Glejte tudi sliko 20.23 (potrebe po energiji za potniški promet).



Pri vodnem prometu se energija porablja, ker ladje povzročajo valove, kljub temu pa je ladijski tovorni promet presenetljivo energijsko učinkovit.

160 litrov odpadne vode na osebo na dan. Poraba energije črpanja vode naokrog po državi in čiščenja odpadnih vod je približno **0,4 kWh na dan na prebivalca**.

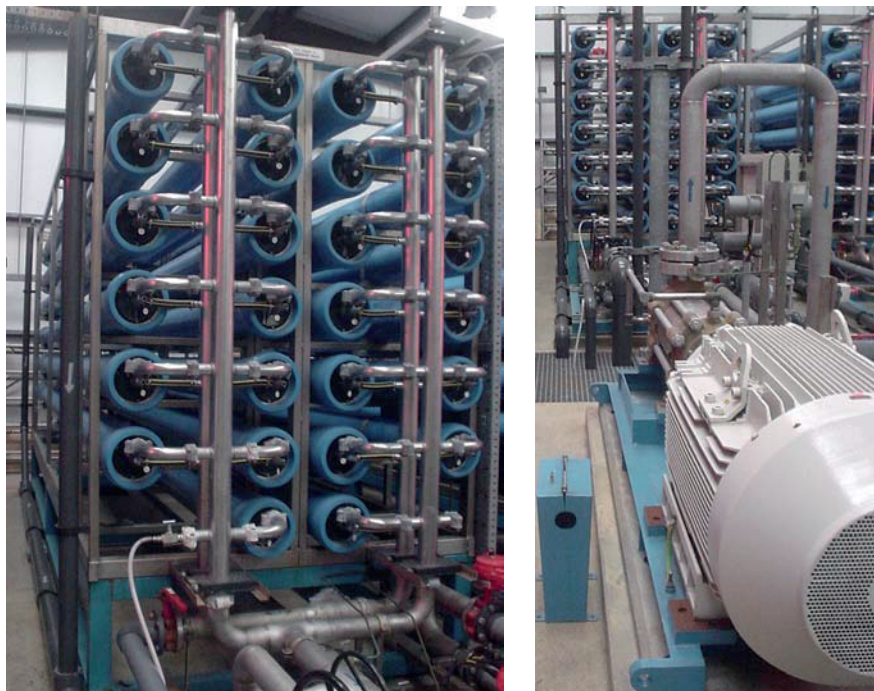
Razsoljevanje

Velika Britanija za zdaj ne porablja energije za razsoljevanje vode, govori pa se o gradnji objektov za takšne namene v Londonu. Kakšna je poraba energije spreminjanja slane vode v pitno? Energijsko najmanj intenzivna metoda je reverzna osmoza. Vzamemo membrano, ki prepušča samo vodo, in na eno stran damo morsk vodo, v kateri povečamo tlak. Voda počasi curlja skozi membrano in se pri tem prečisti – počasi pa zato, ker ima voda, ki jo ločimo od soli, nizko entropijo, narava pa ima pri pomešanih rečeh raje visokoentropijska stanja. Ločitev moramo plačati z energijo z večjo uporabno vrednostjo.

Na otoku Jersey je naprava za razsoljevanje, v kateri pridobijo 6000 m^3 pitne vode na dan (slika 15.10). Potrebna moč celotnega objekta je 2 MW, kar vključuje tudi črpalke za črpanje vode iz morja in skozi vrsto filtrov. Poraba energije je tako 8 kWh na m^3 pridobljene pitne vode. Pri tej porabi bi za 160 litrov dnevne porabe potrebovali **1,3 kWh na dan**.

oskrba z vodo
in čiščenje:
0,4 kWh/d

Slika 15.9 Oskrba z vodo: 0,3 kWh/d; predelava odpadne vode: 0,1 kWh/d.



Slika 15.10 Del naprave za razsoljevanje na otoku Jersey, ki deluje na osnovi reverzne osmoze. Črpalka v prednjem delu slike na desni ima moč 355 kW. Morsko vodo pod tlakom 65 barov potiska v 39 spiralno zviti membrani v seriji modrih vodoravnih cevi na levi in tako zagotavlja 1500 m³ pitne vode na dan. Skupna poraba energije pitne vode iz te naprave je 8 kWh na m³.

Maloprodaja stvari

Supermarketi v Veliki Britaniji porabijo približno 11 TWh energije na leto. Če to enakomerno porazdelimo med 60 milijonov veselih potrošnikov, dobimo porabo **0,5 kWh na dan na prebivalca**.

supermarketi:
0,5 kWh/d

Vloga uvoženih stvari

Pri standardnem merjenju »britanske porabe energije« ali »britanskega ogljičnega odtisa« uvoženega blaga ne upoštevajo. Velika Britanija je nekdaj naprave izdelovala sama, zato je bil njen odtis na prebivalca leta 1910 tako velik, kot je sedaj v Ameriki. Na Otoku zdaj ne proizvajamo več toliko (zato so se naša poraba energije in izpusti ogljika malo zmanjšali), naprave pa imamo še vedno radi, zato drugim državam naročamo, da jih izdelajo za nas. Naj odmislimo porabo energije izdelave naprave samo zato, ker je uvožena? Ne bi rekli. Dieter Helm in njegovi sodelavci z oxfordske univerze ocenjujejo, da je ob pravilnem merjenju, ki vključuje uvoz in izvoz, britanski ogljični odtis približno 21 ton CO₂e na prebivalca, kar je skoraj *dvakrat več* od uradnih »11 ton«. Iz tega sledi, da je največja postavka v energijskem odtisu povprečnega Britanca poraba energije izdelave uvoženih stvari.

To vprašanje podrobneje raziščem v poglavju H, kjer me zanima masa britanskega uvoza. Če zanemarimo uvoz goriv, letno uvozimo nekaj več

kot 2 toni stvari na prebivalca, pri čemer je približno 1,3 tone na prebivalca predelanih in končnih izdelkov, kot so vozila, stroji, bela tehnika ter električna in elektronska oprema. To pomeni približno 4 kg predelanih stvari na prebivalca na dan. Večinoma so izdelane iz materialov, za proizvodnjo katerih so porabili vsaj 10 kWh energije na kilogram stvari. Zato ocenjujem, da je vgrajen ekvivalent moči te gore avtomobilov, hladilnikov, mikrovalovnih pečic, računalnikov, fotokopirnih strojev in televizorjev vsaj 40 kWh na dan na prebivalca.

Če povzamemo vse vrste stvari in oblike njihovega transporta: za izdelavo stvari bom v stolpec porabe dodal **48 kWh na dan na prebivalca** (vsaj 40 za uvoz, 2 za dnevno časopisje, 2 za gradnjo cest, 1 za gradnjo hiš in 3 za embalažo); za transport stvari po morju, cestah in ceveh ter shranjevanje hrane v supermarketih pa še **12 kWh na dan na prebivalca**.

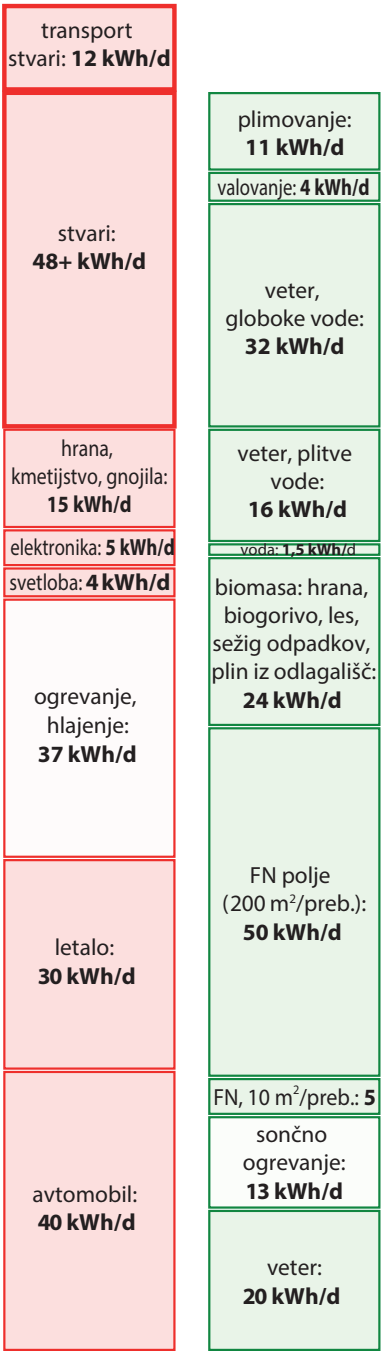
Delam zato, da nakupujem.

Pregovor

Opombe in dodatno branje

stran

- 89 *Za eno pločevinko porabimo 0,6 kWh.* Masa pločevinke je 15 g. Ocene o skupni porabi energije proizvodnje aluminija segajo od 60 MJ/kg do 300 MJ/kg. [yx7zm4], [r22oz], [yhrest]. Vir mojega podatka: The Aluminum Association [y5as53], 150 MJ na kg aluminija (40 kWh/kg).
- *Vgrajena energija plastenke iz plastike PET.* Vir: Hammond in Jones (2006), vgrajena energija plastike PET je 30 kWh na kg.
- *Povprečni Britanec dnevno zavrže 400 g embalaže.* Leta 1995 smo v Veliki Britaniji porabili 137 kg embalaže na prebivalca (Hird in sod. 1999).
- *Izdelava osebnega računalnika stane 1800 kWh energije.* Poraba (energije in surovin) za izdelavo osebnega računalnika ustreza količini fosilnih goriv, ki je 11-kratnik njegove mase.
Za hladilnik potrebujemo 1- do 2-kratnik njegove mase, prav tako za avtomobil. Williams (2004); Kuehr (2003).
- */.../ polnilne nikelj-kadmijeve baterije.* Vir: Rydh in Karlström (2002).
- */.../ jeklenih /.../* Pri podjetju Swedish Steel pravijo: »Poraba premoga in koksa je 700 kg na tono končnega jekla, kar ustreza približno 5320 kWh na tono končnega jekla. Poraba nafte, utekočinjenega naftnega plina in električne energije je 710 kWh na tono končnega proizvoda. Skupna poraba [primarne] energije je tako približno 6000 kWh na tono končnega jekla.« (6 kWh na kg) [y2ktgg]
- 90 *Vgrajena energija novega avtomobila je 76.000 kWh.* Vir: Treloar in sod. (2004). Burnham in sod. (2007) navedejo manjšo številko: 30.500 kWh za neto porabo energije življenjskega cikla avtomobila. Do razlike je morda prišlo, ker slednja analiza življenjskega cikla predpostavlja, da je vozilo reciklirano, zato se neto poraba energije materialov zmanjša.



Slika 15.11 Izdelava naših stvari stane najmanj 48 kWh/d. Njihova dostava stane 12 kWh/d.

- 90 *Vgrajena energija papirja je 10 kWh na kg.* Poraba energije izdelave papirja iz neobdelanih celuloznih vlaken je približno 5 kWh/kg, vsebnost energije v papirju pa je podobna kot v lesu, približno 5 kWh/kg. (Vir: Ucuncu (1993); Erdinciler in Vesilind (1993); glejte str. 284.) Poraba energije je po tovarnah in državah različna. Podatek 5 kWh/kg iz leta 1973 za švedsko tovarno časopisnega papirja navede Norrström (1980), ki je ocenil, da bi z ukrepi za izboljšanje energijske učinkovitosti porabo energije lahko zmanjšali na približno 3,2 kWh/kg. V novejši analizi življenjskega cikla (Denison 1997) neto porabo energije proizvodnje časopisnega papirja iz neobdelanih celuloznih vlaken v ZDA, ki ji sledi tipična mešanica odvoza na odlagališče in sežiga, ocenjujejo na 12 kWh/kg; poraba energije proizvodnje časopisnega papirja iz recikliranih materialov, ki ga potem spet recikliramo, je 6 kWh/kg.
- 91 *Energijska intenzivnost cestnega transporta v Veliki Britaniji je približno 1 kWh na tkm.* Vir: www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment.
- *Energijska intenzivnost tovornega transporta s to ladjo je 0,015 kWh na tkm.* Zmogljivost (285 m dolge in 40 m široke) ladje Ever Uberty je 4948 TEU (kontejnerskih enot), nosilnost 63.000 t, vozna hitrost pa 25 vozlov. Običajna moč motorja je 44 MW. En TEU pomeni velikost majhnega šestmeterskega kontejnerja, torej približno 40 m³. Večina kontejnerjev, ki so sedaj v uporabi, je dolgih 12 metrov in imajo zmogljivost 2 TEU. 12-metrski kontejner tehta 4 tone in lahko prenese 26 ton stvari. Če je izkoristek ladijskega motorja 50 %, potem je poraba energije ladje 0,015 kWh kemične energije na tkm. www.mhi.co.jp/en/products/detail/container_ship_ever_uberty.html
 - *Britanski delež porabe energije mednarodnega ladijskega transporta /.../* Vir: Anderson in sod. (2006).
- 92 *Slika 15.8.* Poraba energije pri ladjah. Pet točk na sliki predstavljajo kontejnerska ladja (46 km/h), plovilo za prevoz suhega tovora (24 km/h), tanker (29 km/h), ladja za kopenske plovne poti (24 km/h) in ladja na jedrski pogon Savannah (39 km/h).
- Plovilo za prevoz suhega tovora** 0,08 kWh/tkm. Plovilo z zmogljivostjo 5200 m³ žita ima nosilnost 3360 ton. (Nosilnost pomeni maso tovora, ki ga ladja lahko prepelje.) Potuje s hitrostjo 13 vozlov (24 km/h); njen motor, ki zagotavlja moč 2 MW, porabi 186 g kurilnega olja na kWh oddane energije (42-odstotni izkoristek). conoship.com/uk/vessels/detailed/page7.htm
- Tanker.** Sodobni tanker za prevoz nafte porabi 0,017 kWh/tkm [61brab]. Masa tovora: 40.000 t. Zmogljivost: 47.000 m³. Glavni motor: največja moč 11,2 MW. Hitrost pri 8,2 MW: 15,5 vozlov (29 km/h). Vsebnost energije v naftnem tovoru je 520 milijonov kWh. Za prevoz nafte četrtno poti okrog sveta (10.000 km) torej porabimo 1 % energije v nafti.
- Ro-ro transportno plovilo.** Poraba energije prevoza tovora pri ladjah podjetja Wilh. Wilhelmsen je od 0,028 do 0,05 kWh/tkm [5ctx4k].
- 92 *Poraba energije oskrbe z vodo in čiščenja odpadnih vod je približno 0,4 kWh/d na prebivalca.* Skupna poraba energije vodne industrije je v obdobju 2005–2006 znašala 7703 GWh. Poraba energije dobave 1 m³ vode je 0,59 kWh, čiščenja 1 m³ odpadnih vod pa 0,63 kWh. Če vas zanimajo izpusti toplogrednih plinov: odtis oskrbe z vodo je 289 g CO₂ na m³ dobavljene vode, čiščenja odpadnih vod pa 406 g CO₂ na m³ odpadnih vod.
- Domača poraba vode je 151 litrov na dan na prebivalca. Skupna poraba vode je 221 l/d na prebivalca. Izgub zaradi uhajanja vode je za 57 litrov na dan na prebivalca. Vira: Urad za znanost in tehnologijo pri britanskem parlamentu [www.parliament.uk/documents/upload/postpn282.pdf], Water UK (2006).
- 93 *Supermarketi v Veliki Britaniji porabijo približno 11 TWh energije na leto.* [yqbz13]
- *Helm in sod. ocenjujejo, da je ob pravilnem merjenju, ki vključuje uvoz in izvoz, britanski ogliščni odtis približno 21 ton CO₂e na prebivalca, kar je skoraj dvakrat več.* Helm in sod. (2007).



16 Geotermalna energija

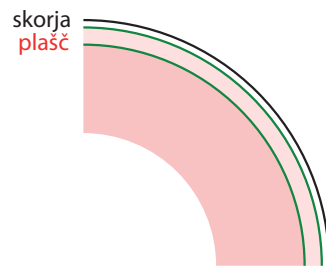
Geotermalna energija nastaja na dva načina: ob razpadu radioaktivnih elementov v Zemljini skorji in pronicanju toplote iz Zemljinega jedra skozi plašč. V jedru je toplota zato, ker je bila Zemlja nekoč razbeljena krogla ter se zdaj še vedno hladi in strjuje. Vročino v jedru še dodatno povečuje plimsko trenje: Zemlja se zaradi gravitacijskih polj Lune in Sonca upogiba podobno kot pomaranča, ko jo stisnete in posvaljkate med rokama.

Geotermalna energija je privlačen obnovljiv vir, ker je »vklopljen« ves čas, ne glede na vreme. Če zgradimo elektrarno na geotermalno energijo, jo lahko vklopimo in izklopimo glede na povpraševanje.

Koliko geotermalne energije pa je sploh na voljo? Lahko bi ocenili dva tipa te energije: tisto na običajnem mestu na Zemljini skorji in ono na posebnih žariščih, na primer na Islandiji (slika 16.3). Čeprav geotermalno tehnologijo vsekakor najprej velja razviti na slednjih, bom predpostavil, da je skupna količina dostopne energije na običajnih mestih večja, saj je teh mest preprosto veliko več.

Na poti do tega, da energija, ki jo pridobimo iz geotermalne, zares postane *trajnostna*, obstaja težava: hitrost potovanja toplote skozi trdno kamnino nas omejuje pri tem, kako hitro lahko toploto trajnostno črpamo iz razbeljene notranjosti Zemlje. Kot da bi po slamici pili pijačo iz zdrobljenega ledu. Slamico vtaknete v pijačo, srknete in dobite soliden požirek hladne tekočine, a kmalu zatem začnete srkati zrak. Iz ledu ob konici slamic ste izčrpali vso tekočino, zato začetna hitrost srkanja ni bila trajnostna.

Če v 15-kilometrsko luknjo v zemlji vtaknete slamico, boste ugotovili, da je spodaj tako prijetno vroče, da bi zlahka zavreli vodo. Torej bi lahko vtaknili dve slamici, po eni vbrizgavali hladno vodo navzdol, z drugo pa srkali. Srkali bi paro, s katero bi lahko napajali elektrarno. Neomejena moč? Ne. Čez čas bi s srkanjem toplote iz kamnin zmanjšali njihovo temperaturo. Niste srkali trajnostno in dolgo bi trajalo, da bi se kamnine ob konici slamic spet segrele. Na to težavo lahko gledamo tako, da geotermalno toploto obravnavamo enako, kot sedaj obravnavamo fosilna goriva: ne kot vir, ki bi ga zbirali trajnostno, temveč izčrpavali z rudarjenjem. Za planet bi bilo morebiti bolje, če bi tako živeli na račun geotermalne toplote, kot da netrajnostno živimo na račun fosilnih goriv. Toda ali ne bi bila to samo novačasna rešitev za še 100 let netrajnostnega življenja? Kot namiguje naslov, me v tej knjigi zanima predvsem *trajnostna* energija. Preračunajmo.



Slika 16.1 Zemlja v prerezu.



Slika 16.2 Granit.



Slika 16.3 Izkoriščanje geotermalne energije na Islandiji. V tej državi (s 300.000 prebivalci) je bila leta 2006 povprečna moč elektrarn, ki izkoriščajo geotermalno energijo, 300 MW (24 kWh/d na prebivalca). Na Islandiji več kot polovico svoje elektrike porabijo za proizvodnjo aluminija. Foto: Gretar Ívarsson.

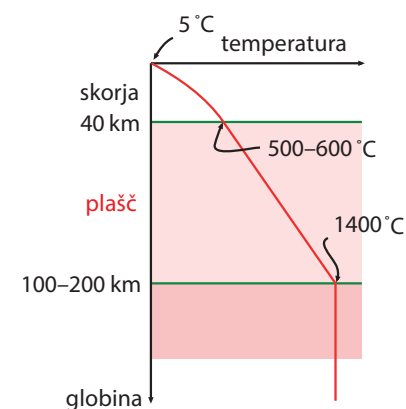
Za vselej trajnostna geotermalna energija

Zamislite si najprej trajnostno rabo geotermalne energije, pri kateri bi namestili slamici na primerno globino in srkali *narahlo*. S takšno hitrostjo, da se kamnine ob konici slamic ne bi čedalje bolj hladile. To pomeni z naravno hitrostjo, s kakršno toplota tako ali tako prihaja iz Zemlje.

Kot sem že rekel, geotermalna energija nastaja na dva načina: ob razpadu radioaktivnih elementov v Zemljini skorji in pronicanju toplote iz Zemljinega jedra skozi plašč. Na tipični celini je specifični toplotni tok, ki iz sredice pride skozi plašč, približno 10 mW/m^2 . Specifični toplotni tok na površini je 50 mW/m^2 . Razpad radioaktivnih elementov torej k specifičnem toplotnem toku iz sredice doda 40 mW/m^2 .

Na tipični lokaciji je potemtakem največja moč na enoto površine 50 mW/m^2 . Toda pri tem ne gre za moč z veliko uporabno vrednostjo, temveč na površje s temperaturo okolice pronica toplota z majhno uporabno vrednostjo. Ker najbrž hočemo proizvajati električno energijo, moramo vrtati globlje. Toplota je uporabna samo, če prihaja iz vira s temperaturo, ki je višja od tiste v okolici. Kot kaže slika 16.4, temperatura raste z globino in pri 40 km doseže približno 500°C . Nekje med globino 0 km, kjer je specifični toplotni tok največji, temperatura kamnin pa prenizka, in 40 km, kjer so kamnine najtoplejše, je pa specifični toplotni tok petkrat manjši (saj zaobidemo vso toploto, ki nastaja ob razpadu radioaktivnih elementov), je optimalna globina, pri kateri bi morali srkati. Natančna številka je odvisna od tega, kakšno opremo za srkanje in proizvodnjo elektrike uporabljamo. Ko najdemo optimalno globino, lahko določimo največji možni

en milivat (1 mW) je $0,001 \text{ W}$.



Slika 16.4 Temperaturni profil pod tipično celino.

obseg trajnostnega zagotavljanja moči ob predpostavki, da imamo popoln stroj za pretvorbo toplote v elektriko in da lahko prosto vrtamo do katerekoli globine.

Za temperaturni profil na sliki 16.4 sem izračunal, da je optimalna globina približno 15 km. V teh pogojih bi s popolnim toplotnim strojem zagotovili 17 mW/m^2 . Če je gostota naseljenosti na svetu 43 ljudi na kvadratni km, to pomeni 10 kWh na prebivalca na dan, če bi uporabili vso površino Zemlje. V Veliki Britaniji je gostota naseljenosti petkrat večja, zato bi z obsežnim izkoriščanjem geotermalne energije na trajnosten način pridobili največ **2 kWh na prebivalca na dan**.

Gre za količino za vselej trajnostne energije, če zanemarimo žarišča in predpostavimo popolne elektrarne, izkoriščanje vsakega kvadratnega metra Zemlje in prosto vrtanje. In da je mogoče zvrtniti 15-kilometerske vrtine.

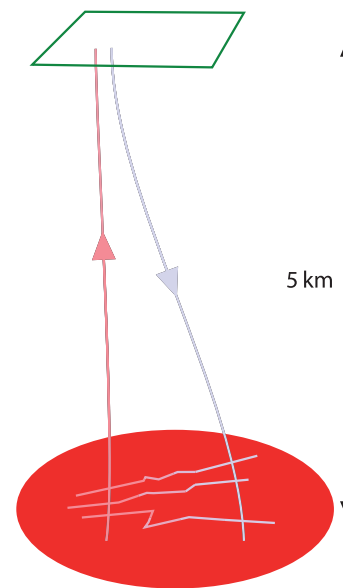
Geotermalna energija kot rudarjenje

Druga geotermalna strategija je toploto obravnavati kot vir, ki ga bomo izčrpavali z rudarjenjem. Pri »izboljšanem črpanju geotermalne energije« iz vročih kamnin (slika 16.5) najprej zvrtnemo do globine 5 do 10 km in z vbrizgavanjem vode skozi vrtino razlomimo kamnine. (Pri tem koraku lahko povzročite potrese, ki se jih lokalno prebivalstvo ne bo preveč razveselilo.) Potem med razpoke zvrtnemo drugo vrtino. Nazadnje v eno vrtino vbrizgavamo vodo in iz druge črpamo močno segreto vodo ali paro, to pa uporabimo za proizvodnjo električne energije ali za ogrevanje. Koliko je v Veliki Britaniji vročih kamnin? Država s tem virom žal ni bogato obdarjena. Večina teh virov je zbranih v Cornwallu, kjer so nekaj geotermalnih poskusov izvedli leta 1985 v raziskovalnem objektu Rosemanowes, ki je zdaj zaprt. Strokovnjaki, ki so poskuse ocenjevali, so sklenili, da »proizvodnja električne energije s pomočjo vročih kamnin v Cornwallu ali kje drugje v Veliki Britaniji na kratki ali srednji rok zelo verjetno ne bi bila tehnično ali poslovno izvedljiva«. A kljub vsemu, koliko je tega vira? Po najbolj optimističnih ocenah bi bilo iz vročih kamnin v Veliki Britaniji skupaj na voljo 130.000 TWh energije, iz česar bi po navedbah strokovnjakov lahko približno 800 let realno proizvajali **1,1 kWh** električne energije **na dan na prebivalca**.

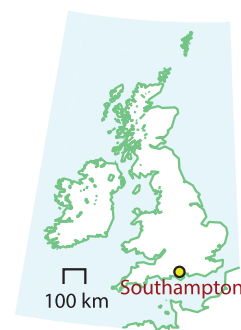
Ponekod po svetu so zaloge vročih kamnin bolj obetavne, zato o številki za izbrano državo povprašajte domačine. V Veliki Britaniji geotermalna energija žal nikoli ne bo igrala večje vloge.

Ni geotermalna energija že v uporabi v Southamptonu? Kolikšen je njen prispevek?

Ja, sistem daljinskega ogrevanja v Southamptonu je bil leta 2004 edini tovrstni sistem v Veliki Britaniji. Mesto oskrbuje s toplo vodo. Geotermalna vrtina je del sistema soproizvodnje toplote, električne energije in hladu, ki porabnike oskrbuje s toplo in ohlajeno vodo ter prodaja elektriko



Slika 16.5 Izboljšano črpanje geotermalne energije iz vročih kamnin. Zvrtnemo eno vrtino in kamnino pod tlakom razlomimo. Ob robu razpok zvrtnemo drugo vrtino, potem pa v eno vrtino vbrizgavamo hladno vodo, iz druge pa srkamo vročo vodo (oziroma paro).



v omrežje. Geotermalna energija prispeva približno 15-odstotkov vseh 70 GWh toplote, kolikor je zagotavlja sistem. Southampton je imel ob zadnjem popisu 217.445 prebivalcev, torej geotermalna energija tam prispeva **0,13 kWh/d na prebivalca** Southamptona.

Opombe in dodatno branje

stran

- 97 *Specifični toplotni tok na površini je 50 mW/m².* Na univerzi MIT (2006) so povprečje določili pri 59 mW/m², pri čemer je v ZDA razpon od 25 do 150 mW. Shepherd (2003) govori o 63 mW/m².
- 98 *»Proizvodnja električne energije s pomočjo vročih kamnin v Veliki Britaniji zelo verjetno ne bi bila tehnično ali poslovno izvedljiva.«* Vir: MacDonald in sod. (1992). Glejte tudi Richards in sod. (1994).
- *Po najbolj optimističnih ocenah bi iz vročih kamnin v Veliki Britaniji skupaj /.../ lahko približno 800 let realno proizvajali 1,1 kWh električne energije na dan na prebivalca.* Vir: MacDonald in sod. (1992).
- *Ponekod po svetu so zaloge vročih kamnin bolj obetavne.* Obstaja dobra študija (Massachusetts Institute of Technology 2006) zalog vročih kamnin v ZDA. Po neki drugi, manj preverjeni metodi, ki so jo v 70. letih prejšnjega stoletja raziskovali v ameriških nacionalnih laboratorijih Sandia, bi vrtali vse do magme s temperaturo med 600 in 1300 °C, ki je kakšnih 15 km globoko, in energijo črpali od tam. Na spletni strani www.magma-power.com ocenjujejo, da bi s pomočjo toplote v magmi pod ameriški tlemi pokrili porabo energije v ZDA za 500 ali 5000 let in da bi jo lahko črpali gospodarno.
- *Sistem daljinskega ogrevanja v Southamptonu.* www.southampton.gov.uk.

transport stvari: 12 kWh/d	geotermalna energija: 1 kWh/d
stvari: 48+ kWh/d	plimovanje: 11 kWh/d
	valovanje: 4 kWh/d
	veter, globoke vode: 32 kWh/d
	veter, plitve vode: 16 kWh/d
hrana, kmetijstvo, gnojila: 15 kWh/d	hidroenergija: 1,5 kWh/d
elektronika: 5 kWh/d	biomasa: hrana, biogorivo, les, sežig odpadkov, plin iz odlagališč: 24 kWh/d
svetloba: 4 kWh/d	FN polje (200 m ² /preb.): 50 kWh/d
ogrevanje, hlajenje: 37 kWh/d	FN, 10 m ² /preb.: 5
letalo: 30 kWh/d	sončno ogrevanje: 13 kWh/d
avtomobil: 40 kWh/d	veter: 20 kWh/d

Slika 16.6 Geotermalna energija.

17 Javne službe

Vsaka izdelana puška, vsaka splavljena vojna ladja, vsaka izstreljena raketa v končni perspektivi pomeni krajo tistim, ki so lačni in jih ne nasitimo, tistim, ki jih zebe in jih ne oblečemo.

Ta oboroženi svet ne zapravlja samo denarja. Zapravlja znoj svojih delavcev, talent svojih znanstvenikov, upe svojih otrok.

predsednik Dwight D. Eisenhower, april 1953

Poraba energije za "obrambo"

Poskusimo oceniti, koliko energije porabimo za vojsko.

V obdobju 2007–2008 je britanska vlada za obrambo porabila 33 milijard funtov oziroma 6 % vseh 587 milijard funtov izdatkov. Če prištejemo še britanske stroške protiteroristične in obveščevalne dejavnosti (2,5 milijarde funtov na leto, delež pa se povečuje), skupni strošek obrambnih dejavnosti doseže 36 milijard funtov.

Čez prst lahko ocenimo, da se 6 % teh 36 milijard porabi za energijo po ceni 2,7 penija za kWh. (6 % je delež BDP-ja, ki ga porabimo za energijo, 2,7 penija pa povprečna cena energije.) To pomeni, da približno 80 TWh energije na leto namenimo za obrambo: izdelavo nabojev, bomb, atomskega orožja; izdelavo naprav za izstrelitev nabojev, bomb in atomskega orožja ter tekanje in ohranjanje mišic za naslednjo igro dobrega proti zlu. V naših priljubljenih enotah to ustreza **4 kWh na dan na prebivalca**.

Poraba energije jedrske obrambe

Odhodki ZDA za proizvodnjo in uporabo atomskega orožja so med letoma 1945 in 1996 dosegli 5,5 bilijona dolarjev (v vrednosti dolarja iz leta 1996).

Izdatki za atomsko orožje v tem obdobju so presegli skupno vsoto zveznih odhodkov za šolstvo, kmetijstvo, usposabljanje, zaposlovanje in socialne storitve, naravne vire in okolje, splošno znanost, veselje in tehnologijo, lokalni in regionalni razvoj (vključno z odpravljanjem posledic naravnih nesreč), kazenski pregon ter proizvodnjo in regulacijo energije.

Če spet predpostavimo, da so 6 % tega zneska porabili za energijo po ceni 5 centov za kWh, je bila poraba energije posedovanja atomskega orožja 26.000 kWh na Američana oziroma **1,4 kWh na dan na Američana** (250 milijonov Američanov v 51 letih).

Koliko energije bi dostavili srečnim prejemnikom, če bi vse to atomsko orožje uporabili? Energijo največjega atomskega orožja, ki sta ga razvijali ZDA in Sovjetska zveza, merimo v megatonah TNT. Tona TNT je 1200 kWh. Energija bombe, ki je uničila Hirošimo, je bila 15.000 ton TNT (18 milijonov kWh). Energija *megatonske* bombe je 1,2 milijarde kWh.



Če bi jo spustili na milijonsko mesto, bi vsakemu prebivalcu podarila 1200 kWh energije, kar ustreza 120 litrom bencina na osebo. Skupna energija sedanjega ameriškega jedrskega arzenala je 2400 megaton v 10.000 bojnih glavah. V dobrih starih časih, ko so ljudje obrambo jemali resno, je bila energija arzenala 20.000 megaton. Če bi te bombe uporabili, bi prispevale 100.000 kWh energije na Američana, kar ustreza 7 kWh na dan na prebivalca, in to 40 let. Približno toliko je vse električne energije, ki jo ZDA proizvajajo iz jedrske energije.

Poraba energije izdelave jedrskih snovi za bombe

Glavni jedrski snovi sta plutonij, ki so ga ZDA proizvedle 104 t, in visoko obogateni uran, ki so ga ZDA proizvedle 994 t. Za proizvodnjo teh snovi potrebujemo energijo.

Najučinkovitejši objekti za proizvodnjo 1 grama plutonija porabijo 24.000 kWh toplote. Neposredna poraba energije izdelave ameriških 104 ton plutonija (1945–1996) je bila torej najmanj 2,5 bilijona kWh, kar je 0,5 kWh na dan na prebivalca (250 milijonov Američanov).

Pri proizvodnji visoko obogatenga urana največjo porabo energije predstavlja bogatenje. V ločevanje atomov ²³⁵U in ²³⁸U, ki sta v naravnem uranu, moramo vložiti delo, saj le tako lahko ustvarimo končni izdelek, ki je bogatejši z ²³⁵U. Poraba energije proizvodnje ameriških 994 ton visoko obogatenga urana (skupna količina v obdobju 1945–1996) je bil približno 0,1 kWh na dan na prebivalca.

»Z raketami ustvarjamo delovna mesta.« Saj bi jih tudi z azbestom, če bi ga spet položili v šole, pa zaradi tega to še ni dobra ideja!

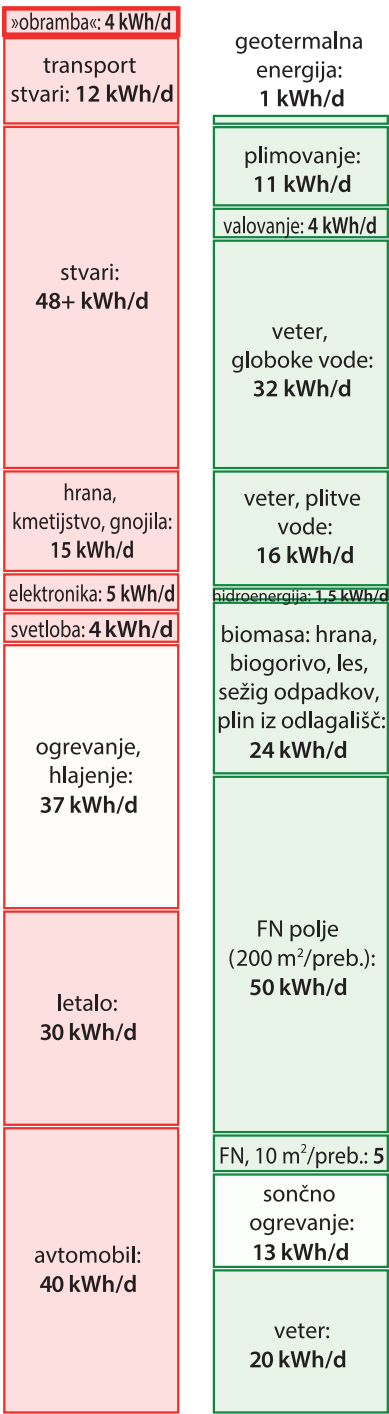
Marcus Brigstocke

Univerze

Po podatkih časopisa Times Higher Education Supplement (30. marec 2007) britanske univerze porabijo 5,2 milijarde kWh na leto. Če energijo porazdelimo med celotno prebivalstvo, to pomeni **0,24 kWh na dan na prebivalca**.

Poraba energije visokega šolstva in raziskav je, kot kaže, precej nižja od obrambnih vojnih igric.

Najbrž bi porabo energije lahko opazovali še pri kateri javni službi, a zdaj bi rad dirki rdečega in zelenega stolpca naredil konec.



Slika 17.1 Poraba energije obrambe v Veliki Britaniji je ocenjena na približno 4 kWh na dan na prebivalca.

Opombe in drugo branje

stran

100 *Proračun za energijo v vojski*. Britanski proračun je dostopen na [yttg7p]; za obrambo gre 33,4 milijarde funtov [fcqfw], za obveščevalno in protiteroristično dejavnost pa 2,5 milijarde funtov na leto [2e4fcs]. Kot piše v vladnem načrtu izdatkov za 2007/08 na str. 14 [33x5kc], je »proračun skupnih sredstev« Ministrstva za obrambo večji – 39 milijard funtov. Od tega je 33,5 milijarde funtov namenjenih za »zagotavljanje obrambne sposobnosti«, 6 milijard pa za plače in pokojnine pripadnikov oboroženih sil in vojne pokojnine. Razrez proračuna je na voljo na tej povezavi: [35ab2c]. Glejte tudi [yg5fsj], [yfgjna] in www.conscienceonline.org.uk.

Poraba energije v ameriški vojski je javno objavljena: »Ministrstvo za obrambo je največji posamezni porabnik energije v Združenih državah. Leta 2006 so porabili 13,6 milijarde dolarjev za nakup 110 milijonov sodčkov goriva [približno 190 milijard kWh] in 3,8 milijarde kWh električne energije.« (Dept. of Defense 2008). Številka zajema neposredno porabo goriva in elektrike, ne pa tudi vgrajene energije vojaških igračk. Če jo porazdelimo med 300 milijonov prebivalcev ZDA, dobimo **1,7 kWh/d na prebivalca**.

- *Odhodki ZDA za proizvodnjo in uporabo atomskega orožja so med letoma 1945 in 1996 dosegli 5,5 bilijona dolarjev (v vrednosti dolarja iz leta 1996)*. Vir: Schwartz (1998).

101 *Poraba energije proizvodnje plutonija*. [slbae].

- *Proizvodnje ameriških 994 ton visoko obogatenega urana /.../ Uranu, ki vsebuje med 4 in 5 % ^{235}U , pravimo nizko obogateni uran, uran z 90 % ^{235}U pa je visoko obogateni uran. Za obogatitev urana od naravnega stanja do 5 odstotkov je treba vložiti trikrat več dela kot za obogatitev od nizko do 90-odstotno obogatenega urana. V jedrski industriji te energijske potrebe merijo v enotah ločevalnega dela (SWU). Za kilogram ^{235}U v visoko obogatenem uranu potrebujemo 232 SWU, za kilogram ^{235}U v nizko obogatenem uranu (22,7 kg nizko obogatenega urana) pa 151 SWU. V obeh primerih začnemo z naravnim uranom (0,71 % ^{235}U), pri čemer osiromašenega urana z 0,25 odstotki ^{235}U ne uporabimo več.*

Na komercialnem trgu jedrskega goriva je SWU vredna približno 100 dolarjev. Za enoletno napajanje tipičnega 1000-megavatnega komercialnega jedrskega reaktorja potrebujemo približno 100.000 SWU za obogatitev urana. Za komercialne namene sta v uporabi dve metodi obogatitve urana: plinska difuzija in plinska centrifuga. Pri postopku plinske difuzije porabimo približno 2500 kWh na SWU, v sodobni plinski centrifugi pa samo kakšnih 50 kWh na SWU. [yh45h8], [t2948], [2ywzee]. Ena sodobna centrifuga proizvede približno 3 SWU na leto.

Proizvodnja ameriških 994 ton visoko obogatenega urana (skupna količina v obdobju 1945–1996) stane 230 milijonov SWU, kar pomeni 0,1 kWh/d na prebivalca (če je Amerikanov 250 milijonov in če za strošek obogatitve z difuzijo vzamemo 2500 kWh/SWU).



18 Lahko preživimo z obnovljivimi viri energije?

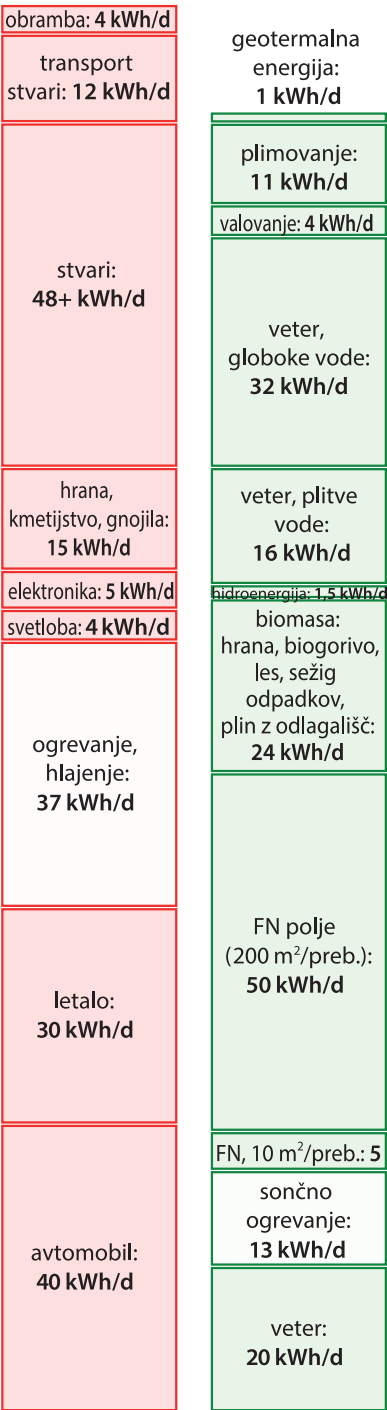
Seštevek rdečega stolpca na sliki 18.1 je **195 kWh na dan na prebivalca**, zelenega pa približno **180 kWh/d na preb.** Tesen izid! A ne pozabite, da smo pri preračunavanju proizvodnje vse ekonomske, družbene in okoljske omejitve zataknili za klobuk. Poleg tega so nekatera naša zelena polja najverjetneje nezdružljiva: sončne elektrarne in toplotni sprejemniki bi si hodili po prstih na strehah, velike sončne elektrarne na tleh, ki bi zasedle 5 % države, bi se utegnile spopasti z energijskimi posevki, s katerimi smo pokrili 75 % države. Če bi izgubili samo eno večje zeleno polje – na primer z odločitvijo, da vetrna energija v globokih vodah ne pride v poštev ali da je namestitev sončnih elektrarn po 5 % države za 200.000 funtov na prebivalca absurd –, se stolpec proizvodnje ne bi več mogel kosati s stolpcem porabe.

Še več, tudi če bi bil rdeči stolpec porabe nižji od zelenega stolpca proizvodnje, to še ne bi pomenilo, da se naši energijski izračuni izidejo. Televizorja ne moremo napajati z mačjo hrano, mačke pa ne moremo hraniti s pomočjo vetrne turbine. Energija ima različne oblike – na primer kemično, električno, kinetično, toplotno. Če hočemo, da se načrt trajnostne energije izide, se morajo ujemati tako oblike kot količine porabe in proizvodnje energije. Pri pretvorbi energije iz ene oblike v drugo – iz kemične v električno, kot to počnejo v elektrarni na fosilna goriva, ali iz električne v kemično kot v tovarni, kjer iz vode pridobivajo vodik – običajno prihaja do precejšnjih izgub uporabne energije. K tej pomembni podrobnosti se bomo vrnili v 27. poglavju, kjer bomo opisali nekaj energetskega načrtov, ki se izidejo.

V tem poglavju bomo premislili naše ocene porabe in proizvodnje, jih primerjali z uradnimi povprečji in ocenami drugih ter pogledali, kolikšno moč bi obnovljivi viri lahko realno prispevali v državi, kakršna je Velika Britanija.

Ukvarjali se bomo z vprašanji, ki so naštet v nadaljevanju.

1. Je višina rdečega stolpca vsaj približno točna? Kolikšna je *povprečna* poraba v Veliki Britaniji? Pogledali bomo uradne številke o porabi energije v Veliki Britaniji in nekaterih drugih državah.
2. Sem obnovljivim virom naredil krivico in podcenil njihov potencial? Ocene v zelenem stolpcu bomo primerjali z ocenami različnih organizacij, kot so Komisija za trajnostni razvoj (Sustainable Development Commission), Inštitut elektroinženirjev (Institution of Electrical Engineers) in Center za alternativno tehnologijo (Centre for Alternative Technology).
3. Kaj se zgodi z zelenim stolpcem, če upoštevamo družbene in ekonomske omejitve?



Slika 18.1 Stanje po tem, ko seštejemo vse tradicionalne obnovljive vire.

Rdeči premislek

Naša ocena porabe tipično premožnega posameznika (slika 18.1) se je povzpela do **195 kWh na dan**. Veliko ljudi zares porabi toliko energije, še več pa si jih takšno porabo prizadeva doseči. *Povprečni* Američan porabi približno **250 kWh na dan**. Če bi standard porabe vsi dvignili na raven povprečnega Američana, bi rdeči stolpec porabe povsem zagotovo zasenčil zeleni stolpec proizvodnje.

Kaj pa povprečni Evropejec in povprečni Britanec? Pri prvem je poraba »primarne energije« (kar pomeni energijo, shranjeno v gorivih, pa še vetrno in hidroenergijo) približno **125 kWh na dan na prebivalca**. Tudi britansko povprečje je **125 kWh na dan na prebivalca**.

Dva tokova energije v ta uradna povprečja nista všteta. Popolnoma je spregledana vgrajena energija v *uvoženih* stvareh (energija, ki jo porabijo za izdelovanje stvari). V 15. poglavju smo ocenili, da ta doseže najmanj 40 kWh na dan na prebivalca. In drugič, uradne ocene »porabe primarne energije« zajemajo samo industrijske tokove energije – na primer fosilna goriva in hidroenergijo – in ne beležijo kemijske energije vsebovane v hrani, torej energije, ki je bila prvotno pridobljena v procesu fotosinteze.

Rdeči stolpec, ki smo ga sezidali mi, in uradna statistika se razlikujeta tudi v tem, da smo v poglavjih o porabi večinoma zanemarili izgubo energije pri pretvorbi iz ene oblike v drugo in pri njenem transportu. Ocena za »avtomobil« v 1. delu knjige zajema samo energijo v bencinu, ne pa tudi energije, ki jo v rafineriji nafte porabijo za proizvodnjo bencina, in tiste, s pomočjo katere nafto in bencin spravijo od točke A do B. Uradna statistika zajema vso energijo pred izgubami pri pretvorbah. Te v resnici predstavljajo približno 22 % vse porabe energije na nacionalni ravni. Do večine teh izgub pride v elektrarnah. Izgube pri prenosu električne energije k skupni vsoti prispevajo 1 %.

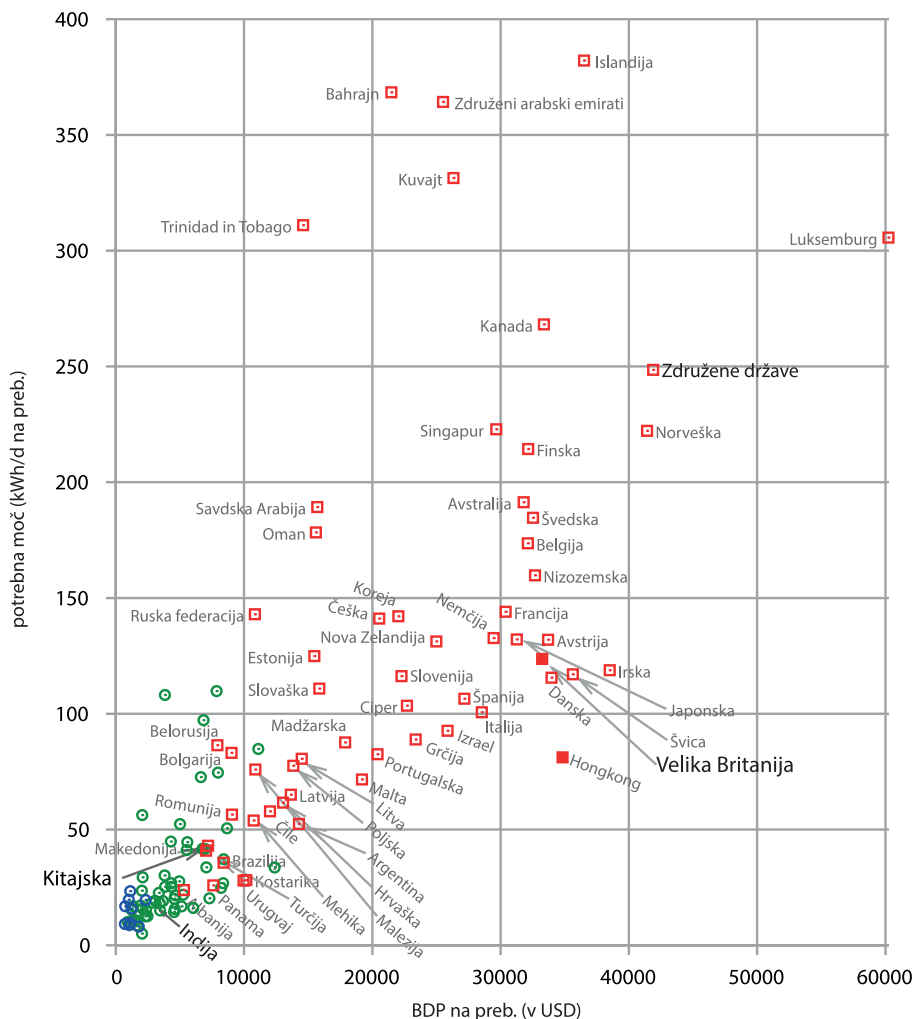
Pri gradnji rdečega stolpca smo imeli pred očmi vprašanje, koliko energije porabi tipično premožen posameznik. Je takšen pristop vplival na to, kolikšno težo pripisujemo različnim dejavnostim? Poglejmo nekaj uradnih števil. Na sliki 18.2 lahko vidimo razrez porabe energije po končni rabi. Glavni postavki sta promet in ogrevanje (topel zrak in topla voda). Isti dve prevladujeta tudi v rdečem stolpcu 1. dela knjige. Dobro.



Slika 18.2 Poraba energije po končni rabi, podatki britanskega Ministrstva za trgovino in industrijo.

cestni promet	nafta	22,5
železnice	nafta	0,4
vodni promet	nafta	1,0
letalstvo	nafta	7,4
vse oblike	elektrika	0,4
Skupne potrebe po moči v prometu 31,7		

Tabela 18.3 Razrez potrebne moči po obliki transporta leta 2006 v kWh/d na prebivalca. Vir: britansko ministrstvo za promet (2007).



Slika 18.4 Potrebna moč na prebivalca glede na BDP na prebivalca v USD glede na pariteto kupne moči. Kvadrati pomenijo države z »visoko stopnjo človekovega razvoja«, krogci pa države s »srednjo« ali z »nizko« stopnjo. Na sliki 30.1 (str. 231) so isti podatki prikazani v logaritemski skali.

Ozrimo se nekoliko pozorneje k prometu. V našem rdečem stolpcu smo ugotovili, da je energijski odtis približno enak, če vsak dan z avtom prevozite 50 km ali enkrat na leto letite v Cape Town. V tabeli 18.3 vidimo relativno težo različnih oblik prometa v nacionalni bilanci. V nacionalnem povprečju ima letalstvo manjši delež kot cestni promet.

Kakšne so uradne številke britanske porabe v primerjavi s porabo v drugih državah? Slika 18.4 prikazuje potrebo po moči različnih držav ali regij glede na njihov bruto družbeni proizvod (BDP). Obstaja očitna soodnosnost med potrebno močjo in BDP-jem: višji kot je BDP države (na prebivalca), večje so potrebe po moči na prebivalca. Velika Britanija je precej tipična država z visokim BDP-jem. Obkrožajo jo Nemčija, Francija, Japonska, Avstrija, Irska, Švica in Danska. Pravilo »visok BDP pomeni veliko



Slika 18.5 Hongkong. Foto: Samuel Louie in Carol Spears.

porabo» potrjuje častna izjema: Hongkong. Njegov BDP na prebivalca je približno na ravni britanskega, poraba pa približno **80 kWh/d na preb.**

Iz teh primerjav lahko razberem, da je Velika Britanija precej tipična evropska država in zato tudi dobra osnova za naslednje vprašanje: kako naj država z visoko kakovostjo življenja pridobiva energijo na trajnosten način?

Zeleni premislek

Pogosto slišimo, da je Velika Britanija polna obnovljivih virov. Sem z zeleno računal nepošteno? So moje številke navaden larifari? Sem trajnostno proizvodnjo podcenil? Primerjajmo moje zelene številke najprej z nekaj ocenami iz publikacije Komisije za trajnostni razvoj z naslovom *Vloga jedrske energije v nizkoogljičnem gospodarstvu. Zmanjševanje izpustov CO₂ – jedrska energija in alternative*. Ne boste verjeli, čeprav ima komisija izjemno pozitiven odnos do trajnostnih virov (»Imamo ogromno energije plimovanja, valovanja, biomase in sončne energije«), so vse ocene v njihovem dokumentu manjše od mojih! (Če sem natančen, vse ocene skupne vrednosti obnovljivih virov so manjše od moje skupne vrednosti.) V publikaciji navajajo ocene na podlagi štirih virov, ki so podrobneje predstavljeni v nadaljevanju (IEE, Tyndall, IAG in PIU). Na sliki 18.6 so vzporedno predstavljene moje ocene, številke teh štirih virov in številke Centra za alternativno tehnologijo (CAT). Sledijo opisi vseh virov.

IEE – Inštitut elektroinženirjev (Institute of Electrical Engineers) je leta 2002 objavil poročilo o obnovljivi energiji, ki ponuja pregled potencialnega prispevka britanskih obnovljivih virov. V drugem stolpcu na sliki 18.6 vidimo »tehnični potencial« različnih obnovljivih tehnologij za proizvodnjo električne energije v Veliki Britaniji, kar pomeni »zgornjo mejo, ki niti ob drastičnih spremembah v strukturi naše družbe in gospodarstva najbrž ne bi bila nikoli presežena«. Po izračunih IEE je skupna vrednost tehničnega potenciala vse obnovljive energije približno 27 kWh/d na prebivalca.

Moje ocene geotermalna energija:	IEE	Tyndall	IAG	PIU	CAT
1 kWh/d					
plimovanje: 11 kWh/d	geotermalna energija: 10 kWh/d				
	plimovanje: 2,4	plimovanje: 3,9	plimovanje: 0,09	plimovanje: 3,9	plimovanje: 3,4
valovanje: 4 kWh/d	valovanje: 2,3	valovanje: 2,4	valovanje: 1,5	valovanje: 2,4	valovanje: 11,4
veter, globoke vode: 32 kWh/d					
veter, plitve vode: 16 kWh/d	veter na morju: 6,4	veter na morju: 4,6	veter na morju: 4,6	veter na morju: 4,6	veter na morju: 21 kWh/d
hidroenergija: 1,5 kWh/d		hidroenergija: 0,08			hidroenergija: 0,5
biomasa: hrana, biogorivo, les, sežig odpadkov, plin z odlagališč: 24 kWh/d	odpadki: 4	energijske rastline, odpadki: 2	energijske rastline, odpadki, plin z odlagališč: 3	energijske rastline, sežig odpadkov, plin z odlagališč: 31 kWh/d	gorivo iz biomase, odpadki: 8
FN polje (200 m ² /preb.): 50 kWh/d					
FN, 10 m ² /preb.: 5		FN: 0,3	FN: 0,02	FN: 12	FN: 1,4
sončno ogrevanje: 13 kWh/d					sončno ogrevanje: 1,3
veter: 20 kWh/d	veter: 2	veter: 2,6	veter: 2,6	veter: 2,5	veter: 1

Slika 18.6 Ocene teoretične ali praktično izvedljive proizvodnje iz obnovljivih virov v Veliki Britaniji, ki so jih pripravili Inštitut elektroinženirjev (IEE), Center Tyndall, Medresorska skupina analitikov britanske vlade (IAG) in Skupina za učinkovitost in inovacije pri britanski vladi (PIU), ter predlogi iz načrta »Island Britain« za 2027, ki ga je pripravil Center za alternativno tehnologijo (CAT).

- Tyndall** – V Centru Tyndall so skupno praktično izvedljivo proizvodnjo iz obnovljivih virov ocenili na 15 kWh na dan na prebivalca.
- IAG** – Medresorska skupina analitikov britanske vlade (Interdepartmental Analysts Group) pri svojih ocenah upošteva gospodarske omejitve. Njihova skupna vrednost izvedljivega *in* gospodarnega prispevka obnovljivih virov (z maloprodajno ceno 7 penijev za kWh) je 12 kWh na dan na prebivalca.
- PIU** – Stolpec Skupine za učinkovitost in inovacije pri britanski vladi (PIU) prikazuje »okvirni potencial obnovljivih virov za proizvodnjo električne energije«, kot so ga leta 2001 v svojem prispevku k pregledu PIU ocenili na britanskem Ministrstvu za trgovino in industrijo. Pri vsaki tehnologiji navajam njihov »izvedljivi maksimum«, če ta ni bil naveden, pa »teoretični maksimum«.
- CAT** – Zadnji stolpec vsebuje številke načrta »Island Britain« Centra za alternativno tehnologijo (Helweg-Larsen in Bull 2007).

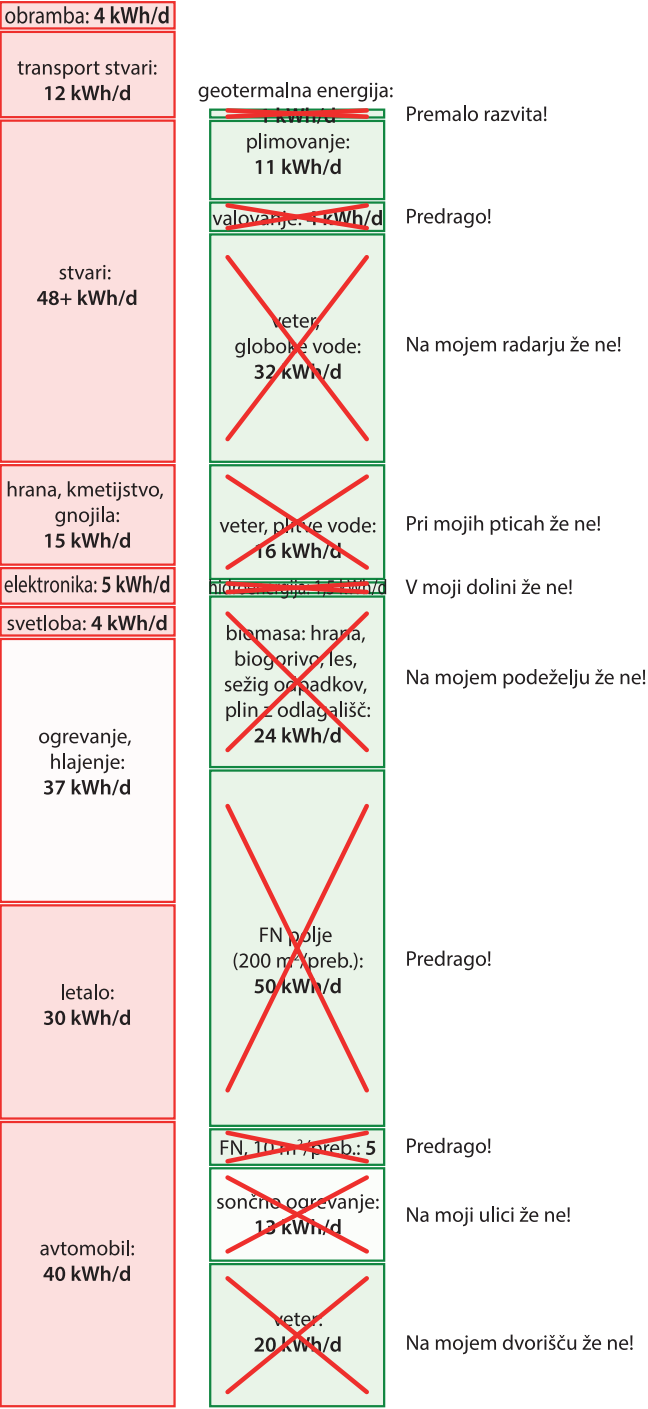
Evropa na bio-pogon

Ljudje me včasih sprašujejo: Kaj nismo pred industrijsko revolucijo brez problema preživeli z obnovljivimi viri? To že, ne pozabite pa, da je bilo tedaj drugače dvoje: življenjski slog in gostota prebivalstva.

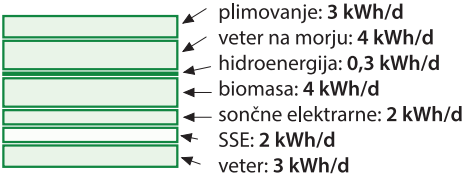
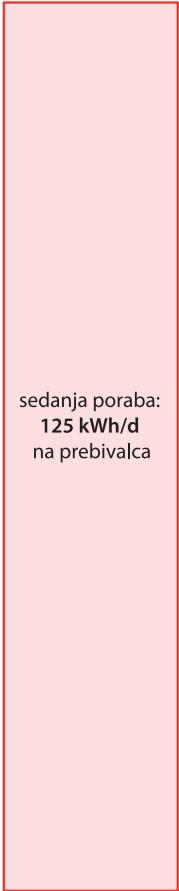
Če zavrtimo čas nazaj za več kot 400 let, se znajdemo v Evropi, ki porablja skoraj izključno trajnostne vire: večinoma les in pridelke, ki jih dopolnjuje nekaj vetrne energije, energije plimovanja in hidroenergije. Po ocenah je takrat povprečni življenjski slog zahteval 20 kWh energije na dan. Poraba lesa na prebivalca je bila 4 kg na dan, za to pa je bil potreben hektar (10.000 m²) gozda na prebivalca. V prvem desetletju 18. stoletja je na prebivalca Evrope prišlo 52.000 m² zemlje. Na območjih z največjo gostoto prebivalstva je bilo 17.500 m² orne zemlje, pašnikov in gozda na prebivalca. Danes je te površine v Veliki Britaniji samo 4000 m² na prebivalca – četudi bi se vrnil k srednjeveškemu življenjskemu slogu in državo povsem pogozdili, tu torej ne bi mogli več živeti trajnostno. Za to imamo precej preveliko gostoto prebivalstva.

Ko zelene ambicije trčijo ob družbeno realnost

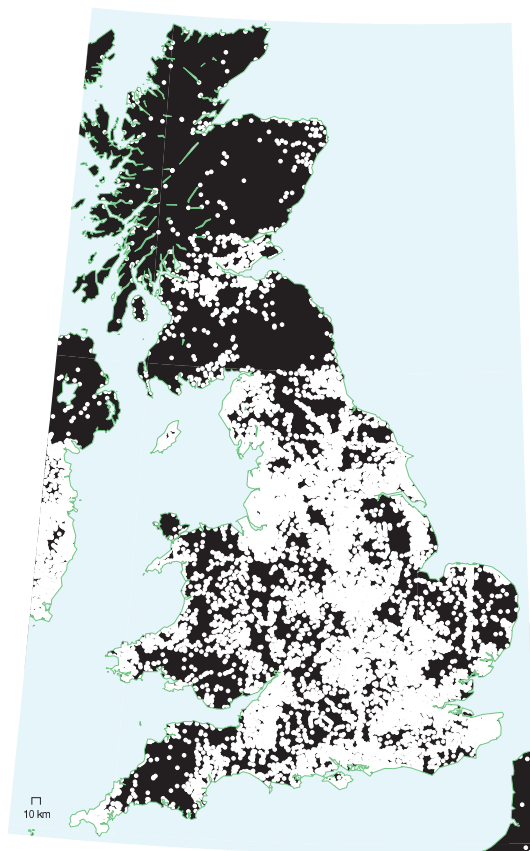
Slika 18.1 ne pomeni nič dobrega. Na papirju ima Velika Britanija res »ogromno« obnovljivih virov. Mislim pa, da realno ne more preživeti z lastnimi obnovljivimi viri – vsaj ne s sedanjim načinom življenja. K temu sklepu me je med drugim napeljalo enodušno nasprotovanje, na katerega naleti vsak večji predlog na področju obnovljive energije. Ljudje imajo obnovljivo energijo strašno radi, *le da je ni več kot za mišji rep*. Nekaj pa Britanci zares dobro obvladajo: kako reči »ne«.



Slika 18.7 Stanje po tem, ko seštejemo vse tradicionalne obnovljive vire in nato začnemo javno razpravo.



Po javni razpravi. Bojim se, da Velika Britanija iz obnovljivih virov nikoli ne bo pridobila več kot 18 kWh/d na prebivalca. (Pri številki na levi, 125 kWh/d na prebivalca, gre za povprečno britansko porabo, ki ne vključuje uvoza in zanemari sončno energijo pri proizvodnji hrane.)

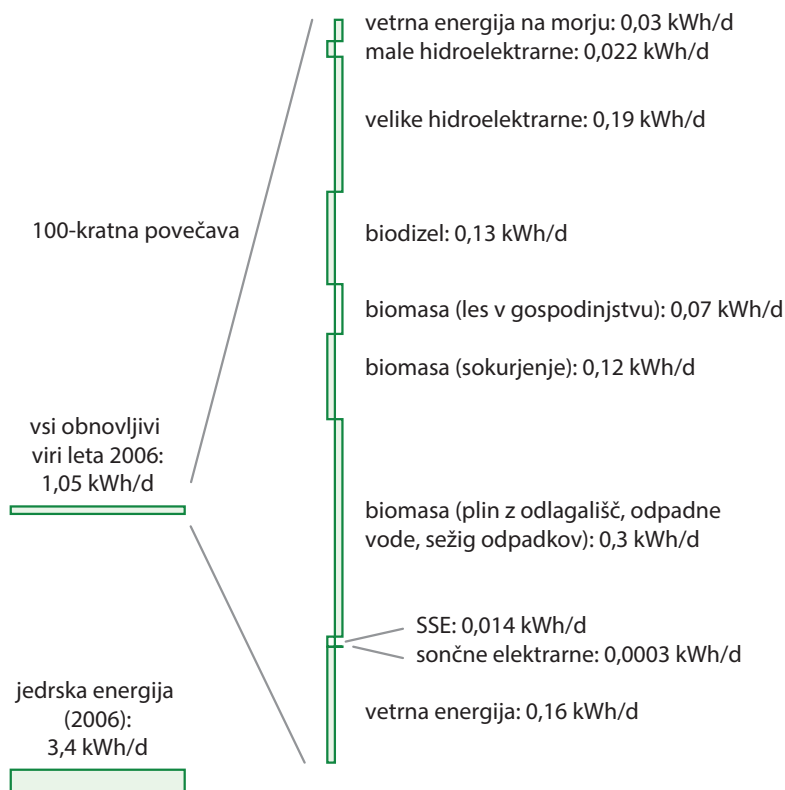


Slika 18.8 V kraljestvu divjih reči. Ljudje vetrnim elektrarnam med drugim nasprotujejo zaradi hrupa. Na zemljevidu glavnega britanskega otoka sem okrog vsakega zaselka, vasi in mesta zarezal prepovedano območje z radijem 2 km. Ta bela polja bi bila najverjetneje izvzeta iz razvoja vetrne energije. Zaradi zaščite mirnih območij pred industrializacijo pa bi bilo najbrž izvzetih tudi precej preostalih črnih polj. Vir podatkov o naseljih: www.openstreetmap.org.

- Vetrne elektrarne? »Ne, ker so grde in glasne.«
- Sončne elektrarne na strehah? »Ne, ker bi skazile vizualno podobo ulice.«
- Več gozda? »Ne, ker uničuje podeželje.«
- Sežiganje odpadkov? »Ne, ker to lahko pomeni tveganje za zdravje, prometne zamaške, prah in hrup.«
- Hidroenergija? »Ja, ampak ne *velikih* elektrarn, ker uničujejo okolje.«
- Vetrna energija na morju? »Ne, ker me je grdih električnih vodov do kopnega bolj strah, kot me je bilo strah nacistične okupacije.«
- Energija valovanja ali geotermalna energija? »Ne, to je bistveno predrago.«

Ob vseh teh ugovorih se bojim, da Velika Britanija iz obnovljivih virov nikoli ne bo iztisnila več, kot vidimo v desnem spodnjem kotu slike 18.7.

Slika 18.8 je v pomoč vsakomur, ki v Veliki Britaniji želi postaviti vetrne elektrarne. Na zemljevidu glavnega otoka sem z belo označil 2-kilometrsko prepovedano območje okrog vsakega zaselka, vasi in mesta. Predvidevam, da bi bila ta bela območja izvzeta iz razvoja vetrne energije, saj



Slika 18.9 Proizvodnja iz obnovljivih virov in jedrske energije v Veliki Britaniji leta 2006. Vse vrednosti so kot običajno navedene na prebivalca. Za razčlenbo obnovljivih virov na desni je višina polja 100-krat povečana.

so preblizu ljudi. Vsa območja, ki so od naselij oddaljena *več kot 2 km*, sem obarval črno. Ta so iz razvoja vetrne energije večinoma izvzeta zato, ker so *mirna*, mirne kraje pa je treba zaščititi pred industrializacijo. Če se želite izogniti ugovorom proti svoji vetrni elektrarni, izberite katerokoli parcelo, ki ni obarvana črno ali belo.

Okoljevarstveniki, ki so dobri po srcu, a imajo zmedeno pamet, včasih malodane ovirajo boj proti podnebnim spremembam.

Malcom Wicks, britanski minister za energijo

Približujemo se koncu 1. dela knjige. Predpostavili smo, da hočemo prekiniti rabo fosilnih goriv, in sicer zaradi kateregakoli razloga iz 1. poglavja – podnebnih sprememb, varnosti oskrbe in tako naprej. Na sliki 18.9 vidimo, kolikšno moč sedaj pridobimo s pomočjo obnovljivih virov in jedrske energije. Predstavljajo samo 4 % naše skupne porabe.

Iz 1. dela lahko potegnemo dva zaključka.

1. *Zmogljivosti za obnovljivo energijo morajo biti reda velikosti držav, da imajo opazen učinek.*

Površina naprave mora biti *reda velikosti države*, če želimo, da prispeva količino obnovljive energije, ki je primerljiva z našo sedanjo porabo. Za velik prispevek vetra smo predvideli, da vetrne

elektrarne prekrijejo območje velikosti Walesa. Za velik prispevek fotonapetostne energije sonca smo določili območje, veliko za pol Walesa. Za velik prispevek energije valovanja smo si zamislili, da se valovne elektrarne razprostirajo na 500 km obale. Za velik prispevek energijskih rastlin smo določili 75 % države.

Zmogljivosti za obnovljivo energijo morajo biti reda velikosti držav, ker so obnovljivi viri zelo razpršeni. V tabeli 18.10 povzamamo površinsko specifično moč za večino virov, ki smo jih srečali v 1. delu.

V Veliki Britaniji bi naš življenjski slog zelo težko vzdrževali samo z obnovljivimi viri. Energijska rešitev, ki bi temeljila na obnovljivi energiji, bi morala biti velika in vsiljiva.

2. Samo z obnovljivimi viri *ne bo lahko* narediti načrta, ki se izide. Če s prenehanjem rabe fosilnih goriv mislimo resno, se bodo morali Britanci naučiti čemu reči »ja«. Oziroma veliko večkrat »ja«.

V 2. delu se bom vprašal: Če predpostavimo, da proizvodnje iz obnovljivih virov ne moremo spraviti na raven naše sedanje porabe, katere so še druge možnosti?

Opombe in dodatno branje

stran

- 104 *Povprečna britanska poraba energije je 125 kWh na dan na prebivalca.* Številko sem našel v Poročilu o človekovem razvoju Programa Združenih narodov za razvoj (UNDP) iz leta 2007.

Britansko ministrstvo za trgovino in industrijo (DTI, zdaj DBERR) vsako leto objavi *Izveček britanske energijske statistike* (DUKES). [uzek2] Po teh podatkih je bila leta 2006 skupna poraba primarne energije 244 milijonov ton naftnega ekvivalenta, kar ustreza 130 kWh na dan na prebivalca.

Razloga za mali razkorak med številka UNDP in DUKES ne poznam, lahko pa pojasnim, zakaj sem izbral nižjo. Kot sem omenil na str. 27, pri DUKES energijske številke povzemajo enako kot jaz, in sicer, da 1 kWh kemične energije enačijo z 1 kWh elektrike. Z manjšo izjemno: »primarno energijo«, proizvedeno v jedrskih elektrarnah, definirajo kot toploto, te pa je bilo leta 2006 9 kWh/d na preb. Pretvorili so jo (z 38-odstotnim izkoristkom) v 3,4 kWh/d na preb. oddane električne energije. Sam sem računal z vidika električne energije, proizvedene iz hidroenergije, drugih obnovljivih virov in jedrske energije, ta mali premik v načinu računanja pa jedrski prispevek zmanjša za približno 5 kWh/d na preb.

- *Izgube pri prenosu električne energije k skupni vsoti prispevajo 1 %.* Ali drugače: izgube predstavljajo 8 % vse proizvedene električne energije. Od tega se približno 1,5 % izgubi v visokonapetostnem prenosnem sistemu, 6 % pa v lokalnem sistemu javne oskrbe. Vir: MacLeay in sod. (2007).

- 105 *Slika 18.4.* Podatki iz Poročila o človekovem razvoju Programa Združenih narodov za razvoj (UNDP) iz leta 2007. [3av4s9]

- 108 *V srednjem veku je povprečni življenjski slog zahteval 20 kWh energije na dan.* Vir: Malanima (2006).

- 110 *»Grdih električnih vodov do kopnega me je bolj strah, kot me je bilo strah nacistične okupacije.«* Vir: [6frj55]

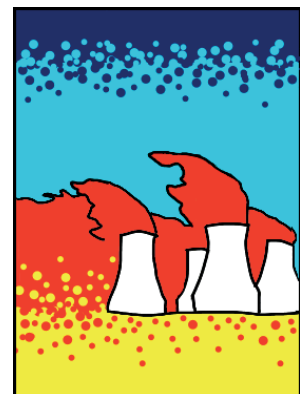
MOČ NA ENOTO POVRŠINE KOPNEGA ALI MORJA

vetrna energija	2 W/m ²
vetrna energija na morju	3 W/m ²
plimski bazeni	3 W/m ²
plimski tok	6 W/m ²
sončne elektrarne	5–20 W/m ²
rastline	0,5 W/m ²
odtekanje deževnice (višavje)	0,24 W/m ²
hidroelektrarne	11 W/m ²
geotermalna energija	0,017 W/m ²

Tabela 18.10 Ker so vsi obnovljivi viri zelo razpršeni, morajo biti zmogljivosti na obnovljivo energijo reda velikosti države.

2. del

Do opaznih sprememb



19 Vsako VELIKO dejanje šteje

Ugotovili smo, da Velika Britanija samo z lastnimi obnovljivimi viri ne more vzdrževati svojega sedanjega življenjskega sloga (razen z industrializacijo takšnih površin kopnega in morja, ki bi bile reda velikosti držav). Katere možnosti imamo torej na voljo, če želimo prekiniti rabo fosilnih goriv in živeti trajnostno? Energijsko bilanco lahko uravnotežimo bodisi z zmanjšanjem povpraševanja bodisi s povečanjem ponudbe ali, seveda, z obojim.

Ne slepite se. Če hočemo doseči cilj in prekiniti rabo fosilnih goriv, bomo morali *bistveno* zmanjšati povpraševanje in povečati ponudbo. Naj vas ne zavede mit, da »šteje vsaka malenkost«. Če vsakdo prispeva malo, bomo malo tudi dosegli. Narediti moramo veliko. V povpraševanju in ponudbi potrebujemo *velike* spremembe.

»Ampak če 60 milijonov ljudi prispeva malo, se bo veliko nabralo, kajne?« Ni res. Ta pomnoževalni stroj po imenu »če vsak« ni nič drugega kot način, kako *na videz* povečati majhno količino. »Če vsak« navdihuje z izjavami v slogu »če bi vsak naredil X, bi pridobili dovolj energije/vode/plina za Y«, Y zveni imenitno. Nas mora presenetiti, da Y zveni veliko? Jasno, da ne. Y smo dobili tako, da smo X pomnožili z ustreznim številom prebivalcev – na primer 60 milijonov! Takole je v sicer stvarnem *Načrtu zelenega gospodarstva* zapisala britanska konservativna stranka:

»Polnilec za mobilni telefon rabi v povprečju približno /.../ 1 W, a če bi bili ves čas priključeni in vklopljeni polnilci za vseh 25 milijonov mobilnih telefonov v državi, bi porabili toliko elektrike (219 GWh), kot je vse leto zadostuje za 66.000 gospodinjstev.«

66.000? Uh, toliko! Potegnite polnilce iz vtičnice! 66.000 zveni veliko, a bodimo pametni in primerjajmo številko s skupnim številom vseh gospodinjstev, ki smo si jih zamislili v tem varčevalnem podvigu. 25 milijonov jih je. 66.000 je pri 25 milijonih samo *četrtnina odstotka*. Četudi prejšnja izjava drži, jo lahko bolj umirjeno ubesedimo takole:

Če pustite polnilec vklopljen, bo predstavljal *četrtnino odstotka* porabe elektrike v vašem gospodinjstvu.

In če to naredimo vsi?

Če vsi pustimo polnilce vklopljene, bodo predstavljali *četrtnino odstotka* porabe elektrike v naših gospodinjstvih.

Pomnoževalni stroj »če vsak« je škodljiv, saj preusmeri pozornost od 25 milijonov morskih psov k 25 milijonom ribic. Kadar govorimo o podnebnih spremembah in energiji, je mantra »z malimi spremembami lahko



»Najprej sva hotela postaviti vetrno elektrarno, pa niso preveč učinkovite.«

Slika 19.1 Objavo so prijazno dovolili
PRIVATE EYE / Robert Thompson
www.private-eye.co.uk.

dosežemo veliko razliko» navadno nesmiselno govorjenje. »Če veliko ljudi prispeva malo, se nabere veliko«, morda že drži, če je vsak tak »malo« nekako usmerjen v en sam »veliko« – če na primer milijon ljudi prispeva 10 funtov za eno žrtev nesreče, žrtev prejme 10 milijonov funtov. To je veliko. Pri energiji pa je drugače. Porabljam jo vsi. Zato morajo za »veliko razliko« v skupni porabi energije pri svoji porabi skoraj vsi spremeniti »veliko«.

Potrebujemo torej *velike* spremembe v povpraševanju in ponudbi. Povpraševanje po energiji lahko zmanjšamo na tri načine:

1. z zmanjšanjem prebivalstva (slika 19.2);
2. s spremembo življenjskega sloga;
3. z ohranitvijo življenjskega sloga, a z zmanjšanjem njegove energijske intenzivnosti s pomočjo »učinkovitosti« in »tehnologije«.

Ponudbo lahko povečamo na tri načine.

1. Rabo fosilnih goriv lahko prekinemo z naložbami v tehnologijo »čistega premoga«. Ups! Premog je fosilno gorivo. Pa nič zato – pogledajmo, kakšen je ta predlog. Koliko energije bi pridobili s pomočjo premoga, če bi ga porabljali »trajnostno« (to misel bomo definirali malenkost pozneje)? Če nas trajnost ne zanima in hočemo samo »varnost oskrbe«, nam jo premog lahko ponudi?
2. Lahko bi investirali v jedrsko cepitev. Je sedanja jedrska tehnologija »trajnostna«? Je vsaj začasna rešitev za prihodnjih 100 let?
3. Obnovljivo energijo lahko kupimo, izprosimo ali ukrademo od drugih držav – zavedati pa se moramo, da jih bo večina pristala v istem čolnu in odvečne obnovljive energije ne bodo imele. Poleg tega pridobivanje obnovljive energije od drugod ne bo čudežno pomanjšalo potrebnih zmogljivosti. Če obnovljivo energijo uvozimo iz drugih držav, da nam zmogljivosti v velikosti Walesa ne bo treba graditi *doma*, bodo zmogljivosti približno takega obsega morali zgraditi v teh državah.

V naslednjih sedmih poglavjih bomo najprej govorili o tem, kako bistveno zmanjšati povpraševanje, potem pa, kako povečati ponudbo, da bo izpolnila to zmanjšano, a še vedno »ogromno« povpraševanje. V teh poglavjih ne bom omenil *vseh* dobrih idej. Govoril bom samo o tistih *velikih*.

Karikirana Britanija

Predlagam, da britansko porabo energije karikiramo in številne podrobnosti zanemarimo, da bomo imeli pred očmi bistvo, naša razprava o zmanjšanju povpraševanja pa bo preprostejša in učinkovitejša. Moja karikirana Britanija energijo porablja v samo treh oblikah: za ogrevanje, promet in elektriko. Poraba za ogrevanje je 40 kWh na dan na prebivalca

Človek svojega odtisa ne more spraviti na ničlo, ga pa njegova odsotnost.

Chris Rapley, nekdanji direktor Britanskega raziskovalnega urada za Antarktiko

Potrebujemo manj ljudi, ne bolj ozaveščene ljudi.

Daily Telegraph, 24. julij 2007

Demokracija ne more preživeti ob prenaseljenosti.

Človeško dostojanstvo ne more preživeti ob prenaseljenosti.

Isaac Asimov



Slika 19.2 Rast prebivalstva in izpusti. Objavljeno z dovoljenjem Colina Wheelerja.

(vso energijo sedaj prispevajo fosilna goriva), za promet prav tako 40 kWh na dan na prebivalca (vso energijo prispevajo fosilna goriva), za elektriko pa 18 kWh(e) na dan na prebivalca. Skoraj vso elektriko proizvedemo s pomočjo fosilnih goriv, izkoristek pretvorbe energije fosilnih goriv v elektriko je 40 %, zato za 18 kWh(e) elektrike v karikirani Britaniji potrebujemo 45 kWh vstopne energije fosilnih goriv na dan na prebivalca. Pri tej poenostavitvi zanemarimo nekaj precej konkretnih podrobnosti, kot so kmetijstvo in industrija ter vgrajena energija uvoženega blaga! A moj cilj je, da lahko *na hitro* povzamem glavne ukrepe, ki jih potrebujemo za prekinitev rabe fosilnih goriv. Ogrevanje, promet in elektrika predstavljajo več kot polovico energije, ki jo porabimo. Če torej izdelamo načrt, po katerem bomo energijo za ogrevanje, promet in elektriko pridobivali trajnostno, smo naredili odločen korak na poti k podrobnejšemu načrtu, ki se izide.

S to karikirano podobo Britanije bo naša razprava o zmanjšanju povpraševanja obsegala samo tri točke. Prvič, kako zmanjšati porabo energije v prometu in povsem prenehati z rabo fosilnih goriv na tem področju? O tem govori 20. poglavje. Drugič, kako zmanjšati porabo energije za ogrevanje in povsem prenehati z rabo fosilnih goriv na tem področju? O tem govori 21. poglavje. Tretjič, kaj pa elektrika? V 22. poglavju govorimo o učinkovitosti pri porabi elektrike.

V 23., 24. in 25. poglavju nato govorimo o treh možnostih na strani ponudbe – čistem premogu, jedrski energiji in obnovljivi energiji od drugod; v 26. poglavju pa, kako obvladovati nihanja v povpraševanju in proizvodnji električne energije iz obnovljivih virov.

Ko bodo na dlani vse možnosti zmanjšanja povpraševanja in povečanja ponudbe, bomo v 27. in 28. poglavju govorili o različnih načinih združevanja teh možnosti v načrte, ki se izidejo, da bi tako zagotovili energijo za promet, ogrevanje in elektriko karikirane Britanije.

Lahko bi pretil še in še črnili za »50 načinov, kako lahko prispevate k spremembi«, mislim pa, da karikirani pristop, ki se loti treh največjih rib, vodi k učinkovitejšim strategijam.

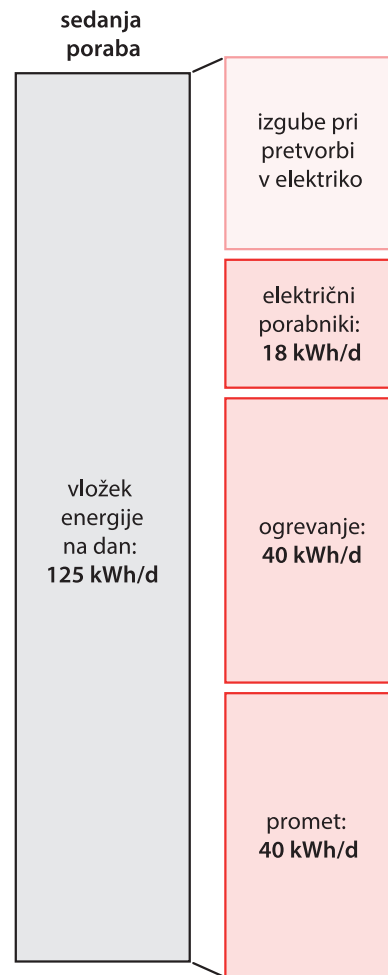
Kaj pa »stvari«? Kot smo videli v 1. delu, bi največja riba utegnila biti vgrajena energija v uvoženih stvareh! Ja, morda je ta riba res slon, pred katerim si zatiskamo oči. A pustimo zdaj defosilizacijo slona ob strani in se posvetimo živalim, na katere imamo neposreden vpliv.

Pa začnimo: pogovorimo se o prometu, ogrevanju in elektriki.

Za neučakane bralce

Vas zanima, kako se bo zgodba končala? Tule je kratek povzetek, s katerim pokukamo v 2. del.

Prvič, elektrificirajmo promet. Tako bomo na tem področju prekinili rabo fosilnih goriv in hkrati dosegli, da promet postane energijsko učinkovitejši. (Seveda pa se z elektrifikacijo poveča povpraševanje po okolju prijazni električni energiji.)



Slika 19.3 Poraba »karikirane Britanije leta 2008«.

Drugič, za ogrevanje zraka in vode na elektriko, s katerim bomo dopolnili sončno ogrevanje, večinoma uporabljajmo *toplotne črpalke*, ki so štirikrat učinkovitejše kot običajni električni grelniki. Z elektrifikacijo ogrevanja se še enkrat poveča potreba po okolju prijazni električni energiji.

Tretjič, vso potrebno okolju prijazno električno energijo pridobivajmo iz kombinacije štirih virov: iz lastnih obnovljivih virov; morda iz »čistega premoga«, morda iz jedrske energije in ne nazadnje zelo vljudno tudi iz obnovljivih virov drugih držav.

Najizdatnejša možnost med viri drugih držav je sončna energija v puščavah. Njen tehnični potencial je vsekakor tolikšen, da bi lahko mi, oni in vsi skupaj proizvedli 125 kWh na dan na prebivalca, če nam le uspe vzpostaviti mednarodno sodelovanje na mirnih temeljih.

Kakšno vprašanje? Berite dalje.

20 Boljši promet

Sodobna tehnologija prevoznih sredstev lahko zmanjša za podnebje škodljive izpuste, ne da bi vplivala na videz, občutek ali zmogljivost, ki jih lastniki pričakujejo.

Kalifornijski odbor za kakovost zraka

Približno tretjino energije porabimo za prevažanje. Lahko to količino zmanjšamo s pomočjo tehnologije? V tem poglavju bomo preučili možnosti, s katerimi bi izpolnili dva cilja: kar najbolj zmanjšali rabo energije v prometu *in* prekinili rabo fosilnih goriv na tem področju.

Promet smo omenjali v treh poglavjih o porabi: 3. poglavju (avtomobili), 5. poglavju (letala) in 15. poglavju (cestni in morski transport tovora). Pogovoriti se torej moramo o dveh vrstah prometa: potniškem in tovornem. Naša enota za potniški promet je potniški kilometer (pkm). Če z avtom prepeljemo enega človeka 100 km daleč, opravimo 100 pkm. Če na enaki razdalji prepeljemo štiri ljudi, opravimo 400 pkm. Podobno je s tonskim kilometrom (tkm) v tovornem prometu. Če s tovornjakom prepeljemo 5 t tovora 100 km daleč, smo opravili 500 tkm. Porabo energije v potniškem prometu bomo merili v »kWh na 100 potniških kilometrov«, v tovornem pa v »kWh na tonski km«. Ste opazili, da pri tem sledimo obratni logiki kot pri »miljah na galono«? Pri vozilu hočemo, da opravi *čim več* milj na galono (oz. čim manj litrov na sto kilometrov, op. ur.) in porabi *čim manj* kWh energije na 100 pkm.

Poglavje bomo začeli z vprašanjem, kako zmanjšati porabo energije v kopenskem prometu. Če hočemo dognati, kako bi to dosegli, moramo razumeti, kam gre energija pri kopenskem prometu. Sledijo glavni trije koncepti, ki so podrobneje pojasnjeni v Tehničnem poglavju A.

1. Pri *vožnji na kratke razdalje* z veliko speljevanja in ustavljanja se večina energije porabi za pospeševanje vozila skupaj z njegovo vsebino. Glavni strategiji za manjšo porabo pri tem načinu prevažanja sta zato *manjša masa* in *doljša pot med postanki*. Pomaga tudi regenerativno zaviranje, pri katerem se med ustavljanjem zajema sicer izgubljena energija. Ne nazadnje pa pomaga tudi, če vozite *počasneje in manj*.
2. Pri *vožnji na dolge razdalje* pri stalni hitrosti z vlakom ali avtomobilom se večina energije porabi za vrtinčenje zraka, saj vozilo pospešite samo enkrat. Glavne strategije za manjšo porabo so tako *počasnejša vožnja*, *manj vožnje* ter *uporaba dolgih, ozkih vozil*.
3. Pri vseh oblikah vožnje imamo verigo pretvorbe energije, pri kateri se nekaj energije iz izbrane vrste goriva porabi za premikanje vozila. Ta energijska veriga se ne more izogniti nekaterim izgubam. V običajnem avtomobilu na fosilna goriva se za premikanje porabi



Slika 20.1 Izhodišče tega poglavja: mestni luksuzni traktor. Poraba goriva povprečnega britanskega avtomobila je 33 milj na galono (8,6 l/100 km), kar ustreza porabi energije 80 kWh na 100 km. Se lahko odrežemo kaj bolje?

samo 25 % energije, 75 % pa se je izgubi pri segrevanju motorja in hladilnika. Zadnja strategija za manjšo porabo energije je torej povečati izkoristek v verigi pretvorbe energije.

S temi ugotovitvami pridemo do šestih načel oblikovanja in rabe vozil za učinkovitejši kopenski promet: a) zmanjšajmo prečni presekok (prednjo površino) vozila na osebo; b) zmanjšajmo maso vozila na osebo; c) vozimo s stalno hitrostjo in čim manj zavirajmo; d) vozimo počasneje; e) vozimo manj in f) povečajmo izkoristek pri pretvorbi energije. Zdaj bomo govorili o najrazličnejših načinih uveljavljanja teh načel.

Zapeljite bolje

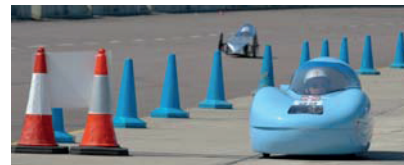
Pogosto citirani statistični podatek gre nekako takole: »En sam odstotek energije, ki jo avto porabi, gre za premikanje voznika.« To naj bi nas nape-ljalo na misel: Mar ne bi mogli z nekaj več pameti izdelati 100-krat učinko-vitejših avtomobilov? Odgovor je ja, skoraj, a samo če prej navedena načela oblikovanja in rabe vozil uveljavimo do njihovih *skrajnih* meja.

Primer skrajnega oblikovanja je eko-avtomobil, ki ima majhno prednjo površino, majhno maso in ga – če lovimo rekorde – vozimo previdno pri majhni, stalni hitrosti. Eko-avtomobil ekipe Team Crocodile (slika 20.2) prevozi 2184 milj na galono (0,1 l/100 km; **1,3 kWh na 100 km**) pri hitrosti 15 mph (24 km/h). Tehta 50 kg in je nižji od prometnega stožca, vanj pa se lahko udobno namesti en najstniški voznik.

Hm. Mislim, da bi voznik mestnega traktorja na sliki 20.1 utegnil opa-ziti spremembo »videza, občutka in zmogljivosti«, če bi ga posadili v eko-avtomobil in mu zabičali, naj ne vozi hitreje kot 24 km na uro. Misel, da bi bili avtomobili z lahkoto 100-krat energijsko učinkovitejši, je torej mit. K izzivu proizvodnje učinkovitejšega avtomobila se bomo vrnili kmalu, najprej pa pogledjmo nekaj drugih načinov izpolnjevanja načel učinkovitej-šega kopenskega prometa.

Na sliki 20.3 vidimo vozilo za več oseb, ki je energijsko vsaj 25-krat učinkovitejše od običajnega avtomobila na bencin: kolo. Učinkovitost kolesa (v vložku energije na prevoženo pot) je približno enaka kot pri eko-avtomobilu. Doseže enako hitrost, ima manjšo maso (ker rezervoar za gorivo in motor nadomesti človek), njegova efektivna prednja površina pa je večja, saj kolesar ni tako aerodinamičen kot eko-avtomobil.

Na sliki 20.4 je še en možni nadomestek za avtomobil na bencin: vlak. Njegova poraba energije je pri polni zasedenosti **1,6 kWh na 100 potniških km**. V nasprotju z eko-avtomobilom in kolesom vlak doseže izjemen izko-ristek, ne da bi moral voziti počasi ali imeti majhno maso na osebo. Visoko hitrost in težko konstrukcijo izravna z izkoriščanjem načela majhne pred-nje površine na osebo. Ta je pri kolesarju in običajnem avtomobilu približ-no 0,8 m² oz. 0,5 m², pri polnem potniškem vlaku, ki vozi od Cambridga do Londona, pa 0,02 m².



Slika 20.2 Eko-avtomobil ekipe Team Crocodile porabi 1,3 kWh na 100 km. Fotografijo je prijazno prispevala ekipa Team Crocodile. www.teamcrocodile.com



Slika 20.3 »Otroci v vozilu.« Poraba energije tega prevoznega sredstva je 1 kWh na 100 potniških km.



Slika 20.4 Ta 8-vagonski vlak pri največji hitrosti 100 mph (161 km/h) in polni zasedenosti porabi 1,6 kWh na 100 potniških km.

Ups, načeli smo kočljivo vprašanje – misel na to, da bi se morali voziti v družbi »vseh tistih groznih ljudi«. Kar lepo se stisnite, zastavili si bomo namreč naslednje vprašanje: koliko bi lahko zmanjšali porabo s prehodom od osebnih požrešnih bencinarjev k odličnemu integriranemu javnemu prometu?



4,4 kWh na 100 pkm ob polni zasedenosti



3–9 kWh na 100 pkm ob polni zasedenosti



7 kWh na 100 pkm ob polni zasedenosti



21 kWh na 100 pkm ob polni zasedenosti

Slika 20.5 Nekaj javnih prevoznih sredstev in njihova energijska učinkovitost, ko so kar najbolj pridni. Podzemna železnica, zunanost in notranost. Hitra vlaka. Električni porabi 3 kWh na 100 km sedeža, dizelski pa 9 kWh. Trolejbusi v San Franciscu. Vancouvrski SeaBus. Foto: Larry.

Javni promet

Skupni javni promet je v najboljši izvedbi energijsko veliko učinkovitejši od individualne vožnje z avtomobilom. **Avtobus** na dizelsko gorivo z 49 potniki in 10 prevoženimi miljami na galono pri hitrosti 65 milj na uro (28 l/100 km pri hitrosti 105 km/h) porabi 6 kWh na 100 pkm, kar je 13-krat bolje od avtomobila z enim potnikom. **Trolejbusi** v Vancouvru porabijo 270 kWh na 100 kilometrov, njihova povprečna hitrost pa je 15 km/h. Če prevažajo 40 potnikov, je njihova poraba energije pri transportu 7 kWh na 100 pkm. Poraba energije prevoza vancouvrskega **SeaBusa** je 83 kWh na kilometer pri hitrosti 13,5 km/h. Na njem je prostor za 400 ljudi, zato je poraba energije prevoza potnikov ob polni zasedenosti 21 kWh na 100 pkm. Londonska **podzemna železnica** porabi pri največji obremenitvi 4,4 kWh na 100 pkm, kar je 18-krat bolje od osebnega avtomobila. Energijsko so veliko učinkovitejši celo **hitri vlaki**, ki z dvakrat hitrejšo vožnjo v primerjavi z avtomobilom in veliko maso kršijo dve naši načeli varčevanja z energijo. Če je električni hitri vlak polno zaseden, je njegova poraba energije 3 kWh na 100 pkm, kar je 27-krat manj kot pri avtomobilu!

A pri načrtovanju moramo ohraniti trezno glavo. Niso vsi vlaki, medkrajevni avtobusi in mestni avtobusi polni (slika 20.6), zato je *povprečna* poraba energije javnega prometa višja od najboljših pravkar navedenih števil. Kolikšna je *povprečna* poraba energije v sistemu javnega prometa in kakšna je realna ocena njihovega najboljšega možnega rezultata?

V obdobju 2006–2007 je bila skupna poraba energije vseh londonskih podzemnih vlakov, vključno z razsvetljavo, dvigali, remizami in delavnicami, **15 kWh na 100 pkm**, kar je petkrat bolje od našega izbranega avtomobila. V istem obdobju je bila poraba energije vseh londonskih mestnih avtobusov **32 kWh na 100 pkm**. Seveda poraba energije ni edino, kar šteje. Potnike zanima hitrost in podzemni vlaki so dosegali večjo hitrost (v povprečju 33 km/h) kot avtobusi (18 km/h). Direktorje zanimajo finančni stroški: stroški osebja na potniški km so pri podzemni železnici nižji kot pri mestnih avtobusih.



32 kWh na 100 pkm



9 kWh na 100 pkm

Skupna poraba energije sistema Tramlink v londonskem predmestju Croydon (slika 20.7) je bila v obdobju 2006–2007 (vključno s tramvajsko remizo in zmogljivostmi na postajališčih) **9 kWh na 100 pkm** pri povprečni hitrosti 25 km/h.

Kakšen rezultat lahko doseže javni promet? Morda nam lahko do okvirne številke pomagajo podatki z Japonske v tabeli 20.8. Tako avtobus z **19 kWh na 100 pkm** kot železnica s **6 kWh na 100 pkm** sta videti obetavna. Železnica ima to lepo prednost, da izpolni oba naša cilja – zmanjšanje porabe energije in neodvisnost od fosilnih goriv. Mestni in medkrajevni avtobusi imajo to očitno prednost, da so preprosti in fleksibilni, a če jim odvzamemo fosilna goriva, bi ohranjanje fleksibilnosti utegnilo biti izziv.

Če povzamemo, se zdi javni promet (predvsem električni vlaki, tramvaji in avtobusi) obetavna oblika prevažanja potnikov – z vidika porabe energije na potniški km je kakšnih pet- ali desetkrat boljša od avtomobila. A katere so še druge možnosti, če ljudje zahtevajo fleksibilnost, ki jo nudi osebno prevozno sredstvo?

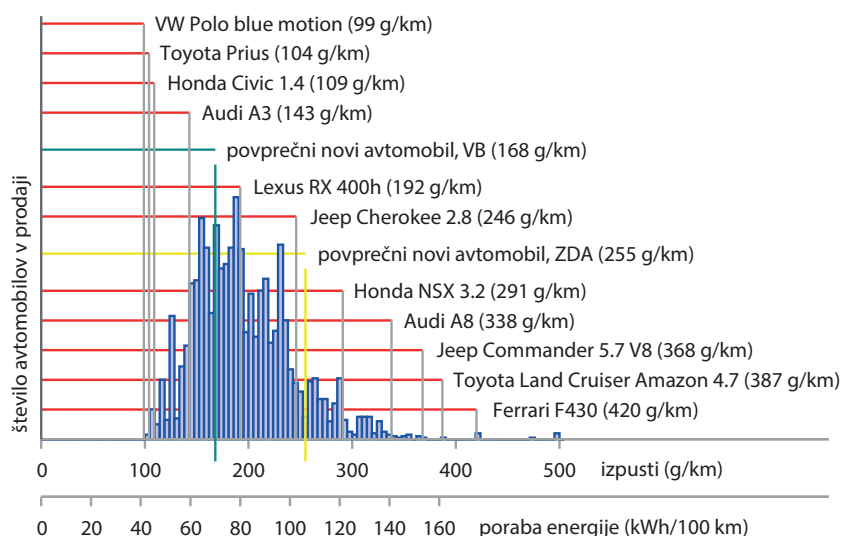


Slika 20.6 Vsi vlaki niso polno zasedeni. Trije možje in čelo so edini potniki v tem vagonu hitrega vlaka, ki ob 10.30 odpelje iz Edinburga proti Kings Crossu.

Slika 20.7 Nekaj javnih prevoznih sredstev in njihova *povprečna* poraba energije. Levo: rdeči avtobusi. Desno: Croydonski Tramlink. Foto: Stephen Parascandolo.

Poraba energije (kWh na 100 pkm)	
avtomobilska	68
avtobusna	19
železniška	6
zračna	51
morska	57

Tabela 20.8 Skupna transportna učinkovitost različnih oblik prometa na Japonskem (1999).



Osebna prevozna sredstva: tehnologija, zakonodaja in pobude

Pri osebem avtomobilu porabo energije *lahko* zmanjšamo. To dokazuje razpon različnih vrednosti energijske učinkovitosti pri avtomobilih na trgu. Leta 2006 si v enem razstavnem salonu lahko dobil Hondo Civic 1.4, ki porabi približno **44 kWh na 100 km**, ali Hondo NSX 3.2, ki porabi **116 kWh na 100 km** (slika 20.9). Ljudje veselo kupujejo avtomobile z vseh koncev tega razpona, kar dokazuje, da potrebujemo dodatne spodbude in zakone, ki bodo brezskrbnega potrošnika napeljali k *izbiri* energijsko učinkovitejšega avtomobila. Potrošniku lahko k odločitvi za Hondo Civic in ne požrešno Hondo NSX 3.2 pomagamo na različne načine: dvignemo ceno goriva, navijemo davek na nova vozila premo sorazmerno s predvideno porabo v njegovi življenjski dobi, s parkirnimi ugodnostmi za gospodarna vozila (slika 20.10) ali z omejevanjem prodaje goriva. Vsi ti ukrepi so vsaj pri delu volivcev nepriljubljeni. Morda bi bila boljša zakonodajna taktika *zakonsko določiti* razumno energijsko učinkovitost, namesto da še naprej dovoljujemo prosto izbiro. Lahko bi na primer po nekem datumu preprosto *prepovedali* prodajo *vseh* vozil, ki porabijo več kot 80 kWh na 100 km, čez čas prag znižali na 60 kWh na 100 km, potem na 40 kWh na 100 km in tako naprej. Če potrošnikom pustimo več izbire, pa bi lahko z uredbami prisilili proizvajalce v zmanjšanje *povprečne* porabe energije pri njihovih avtomobilih. Hkrati bi z dodatnimi zakoni, ki bi omejevali maso in prednjo površino vozil, zmanjšali porabo goriva in povečali varnost za druge uporabnike cest (slika 20.11). Za ljudi je avto sedaj modna izbira. Z odločno zakonodajo na področju učinkovitosti bi bila modna izbira še vedno velika, le da bi bila vsaka odločitev po naključju še energijsko učinkovita. Lahko bi izbrali katerokoli barvo, samo da bi bila zelena.

Slika 20.9 Onesnaževanje z ogljikom v gramih CO₂ na km za izbrane avtomobile, ki jih prodajajo v Veliki Britaniji. Na abscisni osi vidimo raven izpustov, višina modrega histograma pa pomeni število modelov z določeno ravniyo izpustov, ki so bili naprodaj leta 2006. Vir: www.newcarnet.co.uk. Druga abscisna skala prikaže približno porabo energije ob predpostavki, da 240 g CO₂ pomeni 1 kWh kemične energije.



Slika 20.10 Posebne parkirne ugodnosti za električne avtomobile v mestu Ann Arbor v Michiganu.



Slika 20.11 Avtomobilске zverine so ravno dovolj visoke, da popolnoma zakrijejo pogled in ovirajo vidljivost pešcev.

Medtem ko čakamo, da se volivci in politiki zedinijo o novih zakonih o učinkovitih avtomobilih, pogledjmo, katere druge možnosti so še na voljo.



Slika 20.12 Krožišče v mestu Enschede na Nizozemskem.

Kolo

Moj najljubši predlog je zagotavljanje odlične kolesarske infrastrukture, vključno z ustrezno zakonodajo (na primer strožjimi omejitvami hitrosti in cestnoprometnimi predpisi, ki dajejo prednost kolesarjem). Na sliki 20.12 vidimo krožišče v Enschedeju na Nizozemskem. Ima dva kroga: avtomobilski je znotraj kolesarskega, med obema pa je za udobno dolžino avtomobila prostora. Veljajo enaka pravila prednosti kot v britanskih krožiščih, le da morajo avtomobili ob izhodu iz notranjega kroga dati prednost kolesarjem v zunanem krogu (tako kot v Veliki Britaniji pustijo prednost pešcem na prehodu). Če obstaja odlična kolesarska infrastruktura, jo ljudje uporabljajo. To dokazuje neskončna množica koles pred železniško postajo v Enschedeju (slika 20.13).

Britanske razmere za kolesarje (slika 20.14) nekako ne dosegajo nizozemskega standarda.



Slika 20.13 Nekaj nizozemskih koles.



Slika 20.14 V Veliki Britaniji pa takole ...
Desna fotografija: Mike Armstrong.

V francoskem mestu Lyon so leta 2005 pod zasebnim vodstvom ustanovili javno kolesarsko mrežo Vélo'V (v Ljubljani BicikeLj; op. ur.), ki je postala zelo priljubljena. 470.000 prebivalcev Lyona ima na voljo 2000 koles na 175 postajališčih, ki se razprostirajo na površini 50 km² (slika 20.15). V središču mesta skoraj nikoli niste več kot 400 m od postajališča. Uporabniki za vključitev v sistem plačajo 10 evrov letne članarine, potem pa lahko brezplačno uporabljajo kolesa do 30 min na vožnjo. Za daljše vožnje plačajo do 1 evra na uro. Tisti, ki Lyon obiščejo za krajši čas, lahko za evro pridobijo tedensko članarino.

Druge zakonodajne priložnosti

Hitrostne omejitve so preprost gumb, ki ga lahko vrtimo sem in tja. Avtomobili, ki vozijo počasneje, običajno porabijo manj energije (glejte poglavje A). Vozniki se z nekaj prakse lahko naučijo voziti bolj ekonomično: z manj pospeševanja in zaviranja ter z vožnjo v najvišji možni prestavi lahko porabo goriva zmanjšamo za 20 %.

Porabo goriva lahko zmanjšamo tudi tako, da zmanjšamo gnečo. Ustavljanje in speljevanje, povečevanje in zmanjševanje hitrosti so precej manj učinkoviti načini prevažanja kot tekoča vožnja. Posebej klavrn rezultat porabe dobimo s prostim tekom v prometu, ki obstane na mestu!

Do gneče pride, kadar je na cesti preveč vozil. Na preprost način jo zmanjšamo tako, da potnike združimo v manj vozil. Ko razmišljamo o prehodu od avtomobilov k avtobusom, pridemo do osupljivih podatkov, če izračunamo, koliko cestne površine potrebujeta ti dve obliki prevoza. Vzemimo štiripasovnico z zgoščenim prometom, kjer je želena hitrost 60 mph (97 km/h). Pri takšni hitrosti je varnostna razdalja med dvema avtomobiloma 77 m. Predpostavimo, da je vsakih 80 m en avtomobil in da je v vsakem 1,6 človeka; če torej 40 ljudi posesamo v en avtobus, sprostimo *dva kilometra* ceste!

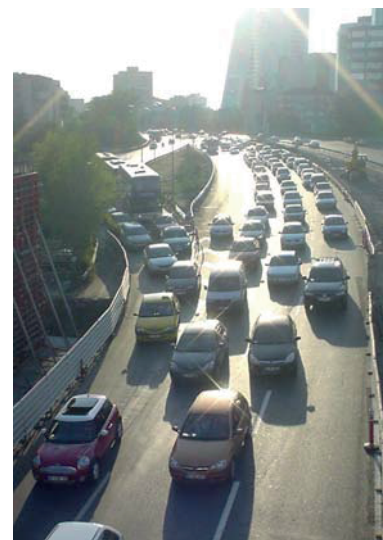
Gnečo lahko zmanjšamo, če zagotovimo dobre alternative (kolesarske steze, javni promet) in če uporabnikom cest dodatno zaračunavamo njihov prispevek h gneči. V opombah k temu poglavju opišem pravičen in preprost način cestninjenja vstopa v mesto.

Avtomobilske izboljšave

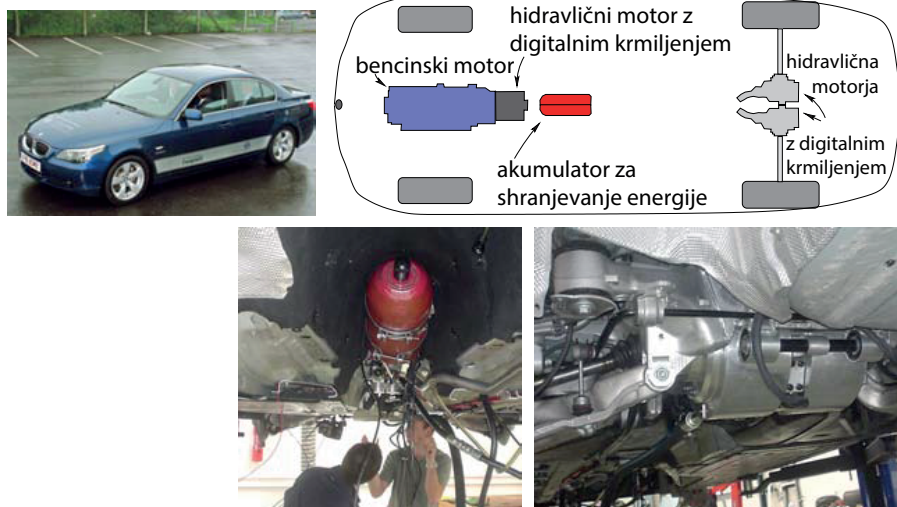
S katerimi tehnologijami bi lahko dosegli bistvene prihranke energije, če razviti svet ne bo prekinil svojega ljubezenskega razmerja z avtomobilom? Porabe ni težko zmanjšati za 10 ali 20 %, o nekaterih možnostih, na primer manjših in lažjih avtomobilih, smo že govorili. Ena od njih je tudi menjava bencina za dizelsko gorivo. Izdelava dizelskega motorja je sicer dražja, porabi pa običajno manj goriva. Toda ali obstajajo tehnologije, ki bi radikalno povečale izkoristek v verigi pretvorbe energije? (Če se spomnite, se pri standardnem avtomobilu na bencin 75 % energije spremeni v toploto, ki izpuhti skozi hladilnik!) Poleg tega je naš cilj prekiniti rabo fosilnih goriv.



Slika 20.15 Postajališče za Vélo'V v Lyonu.



Slika 20.16 Ob takšni gneči si hitreje peš.



Slika 20.17 BMW 530i, ki so ga pri Artemis Intelligent Power modificirali tako, da uporablja hidravliko z digitalnim krmiljenjem. Spodaj levo: 6-litrski akumulator (rdeča posoda), ki lahko shrani približno 0,05 kWh energije v stisnjem dušiku. Spodaj desno: 200-kilovatna hidravlična motorja, po eden za vsako zadnje kolo, ki skrbita za pospeševanje in zaviranje avtomobila. Tega še vedno poganja običajni 190-kilovatni bencinski motor, a po zaslugi hidravličnega prenosa in regenerativnega zaviranja porabi 30 % manj goriva.

V tem delu bomo obravnavali pet tehnologij: regenerativno zaviranje, hibridne avtomobile, električne avtomobile, avtomobile na vodikov pogon in avtomobile s pogonom na stisnjen zrak.

Regenerativno zaviranje

Ko vozilo zavira, lahko energijo zajamemo na štiri načine.

1. S kolesi povezan električni generator polni baterijo ali superkondenzator.
2. Hidravlični motor gnan s kolesi vozila stiska zrak, ki se shranjuje v majhnem rezervoarju.
3. Energija se shranjuje v vztrajniku.
4. Kadar želimo upočasniti, zapeljemo po klančini navzgor in energija zaviranja se shrani kot gravitacijska potencialna energija. Ta možnost shranjevanja je precej nefleksibilna, saj mora biti klančina na pravem mestu. Še najbolj je uporabna za vlake, kot dokazuje primer londonske proge podzemne železnice Victoria, ki ima postaje na vrhu klančin – pri vseh postajah se namreč proga dvigne v obliki grbe. Naklon vlake ob prihodu samodejno zaustavi, na drugi strani pa ob odhodu navzdol pospeši. S tako zasnovanimi postajami dosežemo 5-odstotni prihranek energije in 9-odstotno povečanje hitrosti pri vlakih.

Z električnim regenerativnim zaviranjem (shranjevanjem energije s pomočjo baterije) ob zaviranju rešimo približno 50 % kinetične energije in tako porabo energije mestne vožnje zmanjšamo za kakšnih 20 %.

Regenerativni sistemi z vztrajniki in s hidravliko so nekoliko učinkovitejši od teh z baterijo, saj z njimi rešimo vsaj 70 % energije zaviranja. Na sliki 20.17 je shema hibridnega avtomobila z bencinskim motorjem, ki poganja hidravliko z digitalnim krmiljenjem. V standardnem voznem ciklu ta avtomobil porabi 30 % manj goriva kot izvirni avtomobil na bencinski pogon. Pri mestni vožnji se poraba energije prepolovi s **131 kWh na 100 km na 62 kWh na 100 km** (s 14,1 l/100 km na 6,6 l/100 km). (Zasluge za to izboljšavo si delita regenerativno zaviranje in uporaba hibridne tehnologije.) Tako hidravlika kot vztrajnik sta obetavna načina izvedbe regenerativnega zaviranja, saj lahko z majhnimi sistemi obvladujemo veliko moč. Vztrajniški sistem, ki tehta samo 24 kg (slika 20.18) in je namenjen shranjevanju energije v dirkalnikih, lahko shrani 400 kJ (0,1 kWh) energije, kar je dovolj za pospešitev običajnega avtomobila do 60 milj na uro (97 km/h), poleg tega pa lahko sprejme ali zagotovi 60 kW moči. Električne baterije, ki bi zagotavljale takšno moč, bi tehtale približno 200 kg. Glede na to, da najbrž s sabo ne želite prevažati takšne teže, je najbolje, da v električnem sistemu regenerativnega zaviranja za shranjevanje energije uporabljate kondenzatorje. Super kondenzatorji imajo podobne karakteristike shranjevanja energije in zagotavljanja moči kot vztrajniki.

Hibridni avtomobili

Hibridni avtomobili, kot je Toyota Prius (slika 20.19), imajo učinkovitejše motorje in električni sistem regenerativnega zaviranja, vendar pa obstoječi modeli – iskreno rečeno – po ničemer ne izstopajo (slika 20.9).

Vodoravne proge na sliki 20.9 predstavljajo nekaj avtomobilov, med drugim dva hibrida. Izpusti povprečnega novega avtomobila v Veliki Britaniji so 168 g, hibridnega Priusa pa približno 100 g CO₂ na km, a tako je tudi z nekaj drugimi nehibridnimi vozili – izpusti VW Pola blue motion so 99 g/km, nekega modela Smarta pa 88 g/km.

Drugi hibrid je Lexus RX 400h, ki ga oglašujejo s sloganom »MANJ ONESNAŽENJA. NIČ KRIVDE«. Toda njegovi izpusti CO₂ so 192 g/km, kar je slabše od povprečnega britanskega avtomobila! Britansko oglaševalsko razsodišče je odločilo, da oglas krši oglaševalski kodeks v točkah resnicoljubnosti, primerjav in okoljskih navedb. »Ocenili smo, da /.../ so bralci z veliko verjetnostjo razumeli, da ima avtomobil zelo malo ali sploh nima škodljivega vpliva na okolje, kar ne drži, in da ima v primerjavi z vsemi drugimi avtomobili nizke izpuste, kar prav tako ne drži.«

S hibridnimi tehnologijami v praksi dosežemo 20- ali 30-odstotni prihranek goriva. Kot torej kaže, niti ti hibridi med bencinskim in električnim pogonom niti hibridi med bencinskim in hidravličnim pogonom, kakršnega vidimo na sliki 20.17, ne bodo zares strli transportnega oreha. 30-odstotno zmanjšanje porabe fosilnih goriv ni kar tako, a po merilih te knjige ne bo dovolj. Naša začetna predpostavka je bila, da hočemo prekiniti rabo fosilnih goriv ali jo vsaj zmanjšati za 90 %. Lahko ta cilj dosežemo, ne da bi se vrnili nazaj na kolesa?



Slika 20.18 Sistem regenerativnega zaviranja z vztrajnikom. Fotografije objavljene z dovoljenjem Flybrid Systems.



Slika 20.19 Toyota Prius – po besedah Jeremija Clarksona »zelo drag, zelo zapleten, ne preveč okolju prijazen, počasen, poceni narejen in nesmiseln način premikanja«.



Slika 20.20 Električna vozila. Od leve proti desni: G-Wiz, rjaveči okvir Sinclaira C5, Citroën Berlingo in Elettrica.

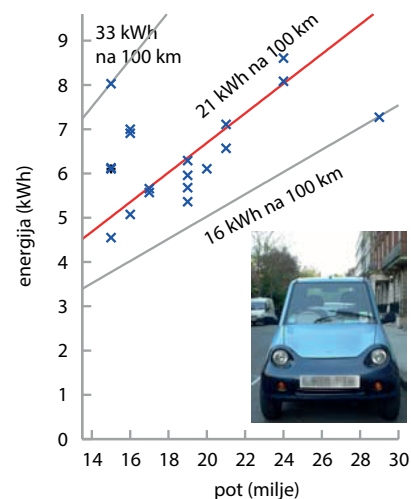
Električna vozila

Električni avtomobil REVA so na tržišču predstavili leta 2001 v Bangaloru in ga v Veliki Britaniji uvažajo pod imenom G-Wiz. Maksimalna moč G-Wizovega elektromotorja je 13 kW, zagotavlja pa stalno moč 4,8 kW. Motor omogoča regenerativno zaviranje. Napaja ga osem 6-voltnih svinčeno-kislinskih baterij, s katerimi ob polni napolnjenosti prevozimo »do 77 km«. Za polno polnjenje porabimo 9,7 kWh elektrike, kar pomeni, da je transportni strošek 13 kWh na 100 km.

Proizvajalci za učinkovitost svojih proizvodov vedno navajajo najboljši možni rezultat. Kako pa je v praksi? Rezultate G-Wiza iz Londona si lahko ogledate na sliki 20.21. Povprečna poraba energije tega G-Wiza je bila v 19 polnjenjih **21 kWh na 100 km**, kar je približno štirikrat bolje od povprečnega avtomobila na fosilna goriva. Najboljši rezultat je bil 16 kWh na 100 km, najslabši pa 33 kWh na 100 km. Če vas zanimajo ogljikovi izpusti: 21 kWh na 100 km ustreza 105 g CO₂ na km ob predpostavki, da ima električna energija odtis 500 g CO₂ na kWh.

G-Wiz je po voznih zmogljivostih na enem koncu lestvice. In če hočemo še več – večji pospešek, večjo hitrost, večji doseg? Na drugem koncu lestvice je Tesla Roadster. Doseg letnika 2008 je 220 milj (354 km), njegove litij-ionske baterije pa shranijo 53 kWh in tehtajo 450 kg (120 Wh/kg). Vozilo tehta 1220 kg, maksimalna moč njegovega motorja je 185 kW. Koliko energije porabi ta mrcina? Neverjetno, toda odreže se bolje od G-Wiza: **15 kWh na 100 km**. 354-kilometrski doseg bi moral večini ljudi v večini primerov zadostovati, saj samo 8,3 % vozačev potuje na delo več kot 30 km daleč.

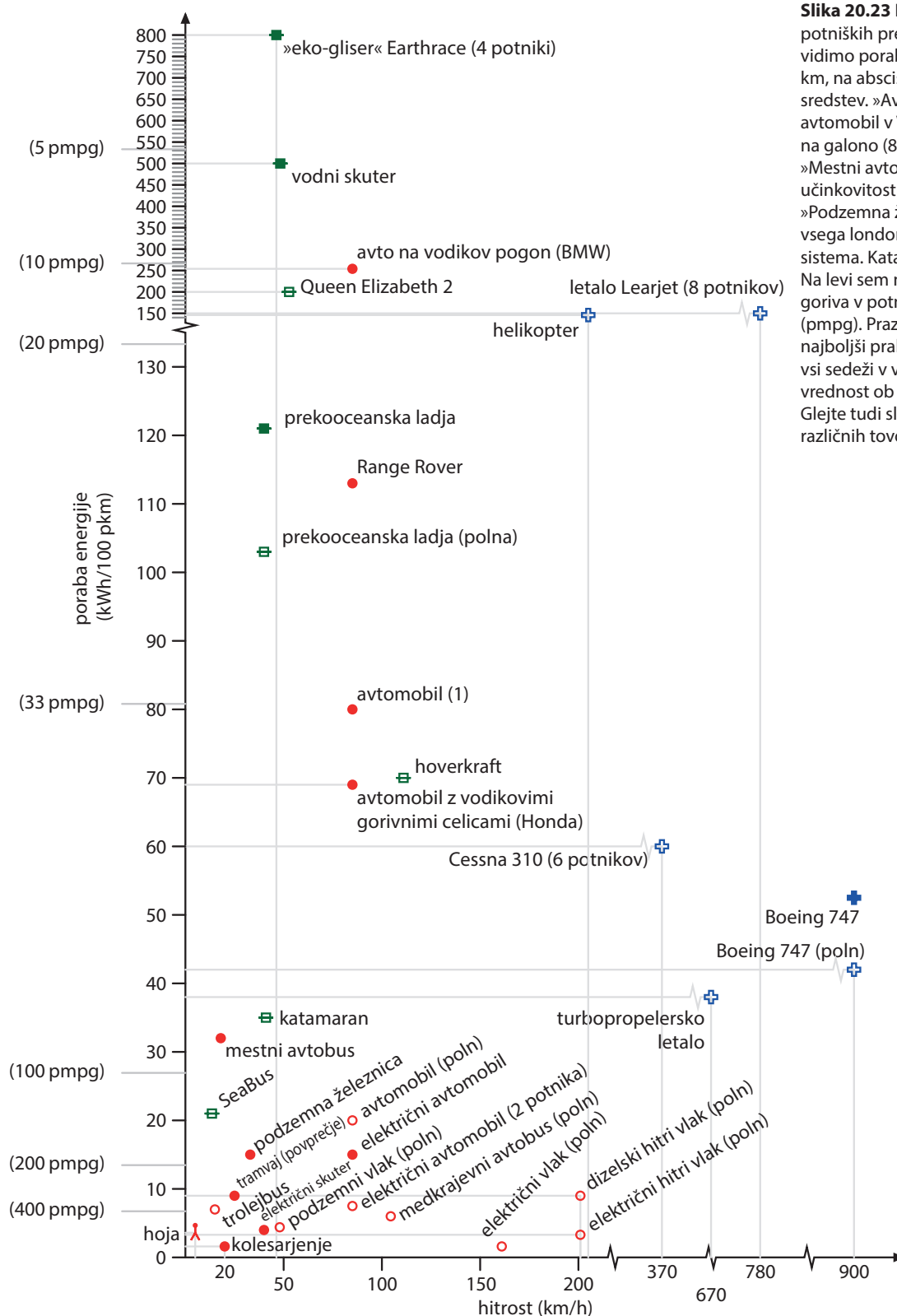
Ogledal sem si še podatke o učinkovitosti za veliko drugih električnih vozil – navedeni so v opombah k temu poglavju – in vsi se ujemajo z naslednjim sklepom: poraba energije prevoza z električnimi avtomobili je približno **15 kWh na 100 km**. To je petkrat bolje od izbranega avtomobila na fosilna goriva, ki služi za primerjavo, in bistveno bolje od katerega koli hibridnega vozila. Juhej! Za gospodarnejši promet se nam ni treba stiskati v javnih prevoznih sredstvih – po zaslugi električnih vozil bomo še lahko drveli ter uživali vse lepote in svobodo samostojne vožnje.



Slika 20.21 Električna energija, ki jo potrebujemo za polnjenje G-Wiza, glede na prevoženo pot. Meritve so bile izvedene na vtičnici.



Slika 20.22 Tesla Roadster: 15 kWh na 100 km.
www.teslamotors.com.



Slika 20.23 Energijske potrebe različnih potniških prevoznih sredstev. Na ordinatni osi vidimo porabo energije v kWh na 100 potniških km, na abscisni osi pa hitrost prevoznih sredstev. »Avtomobil (1)« je povprečni avtomobil v Veliki Britaniji s porabo 33 milj na galono (8,6 l/100 km) in enim potnikom. »Mestni avtobus« predstavlja povprečno učinkovitost vseh londonskih avtobusov. »Podzemna železnica« pomeni učinkovitost vsega londonskega podzemnega železniškega sistema. Katamaran je plovilo na dizelski pogon. Na levi sem navedel ekvivalentno porabo goriva v potniških miljah na imperialno galono (pmpg). Prazni simboli pomenijo vrednost ob najboljši praksi ob predpostavki, da so zasedeni vsi sedeži v vozilu, polni simboli pa dejansko vrednost ob tipični rabi. Glejte tudi sliko 15.8 (energijske potrebe različnih tovornih prevoznih sredstev).

Naj izkoristim ta trenutek zmagoslavja za razkritje velikega povzetka tega poglavja v diagramu na sliki 20.23, ki prikazuje potrebe po energiji vseh oblik potniškega prometa, ki smo jih že omenili ali jih še bomo.

Dirke je konec in razglasil sem dva zmagovalca: javni promet in električna vozila. Je ciljno črto prečkala še katera možnost? Pred nami je še predstavitev avtomobila s pogonom na stisnjen zrak in avtomobila na vodikov pogon. Tudi če se kateri koli od njiju pokaže kot boljša možnost od električnega avtomobila, na dolgoročno perspektivo ne bo veliko vplival. Katerokoli od teh treh tehnologij bi namreč izbrali, bi vozila polnili z energijo, ki bi jo proizvajali iz »okolju prijaznega« vira.

Avtomobili s pogonom na stisnjen zrak

Zamisel o vozilu na zračni pogon ni nova. Med letoma 1879 in 1911 je po ulicah Nantesa in Pariza vozilo na stotine tramvajev s pogonom na stisnjen zrak in toplo vodo. Na sliki 20.24 vidimo nemško lokomotivo na pnevmatski pogon iz leta 1958. Mislim, da je po energijski učinkovitosti tehnika stisnjenega zraka za shranjevanje energije slabša od električnih baterij. Težava je v tem, da pri stiskanju zraka nastaja *toplota*, ki jo težko učinkovito porabimo; pri ekspanziji pa *hlad*, še en stranski produkt, ki ga težko učinkovito porabimo. Vendar pa tehnologija stisnjenega zraka baterije prekosi v drugih pogledih. Zrak lahko denimo stisnemo tisočkrat in se ne izrabi! Zanimivo pa je, da je podjetje Aircar kot svoj prvi izdelek na tržišču ponudilo *električni* skuter. [www.theaircar.com/acf]

Govori se, da naj bi v Indiji avtomobile na zračni pogon izdelovali pri Tata Motors, težko pa je z gotovostjo reči, ali bodo ta vozila doživela renesanso, saj doslej nihče ni objavil specifikacij katerega koli sodobnega prototipa. Osnovna omejitev je energijska gostota hrambe stisnjenega zraka, ki je samo 11–28 Wh na kg, to pa je podobno kot pri svinčeno-kislinskih baterijah in približno petkrat manj kot pri litij-ionskih. (Podrobnosti o drugih tehnologijah shranjevanja na sliki 26.13 na str. 199.) Doseg avtomobilov na stisnjen zrak bo torej največ tolikšen, kot je bil pri prvih električnih avtomobilih. Sistemi shranjevanja stisnjenega zraka so od baterij boljši v treh pogledih: imajo daljšo življenjsko dobo, izdelava je cenejša in manj je škodljivih kemikalij.

Vozila na vodikov pogon – »napumpaj« svoj avto

Če vprašate mene, je vodik napihnen modni krik. Z veseljem se bom pustil prepričati v nasprotno, toda ne razumem, kako naj bi nam vodik pomagal rešiti težave z energijo. To namreč ni čudežni *vir* energije, temveč samo *nosilec* energije, tako kot polnilna baterija. Poleg tega je precej neučinkovit nosilec energije s celo vrsto praktičnih pomanjkljivosti.

V reviji *Nature* so v neki kolumni podprli »vodikovo gospodarstvo« z občudujočim pisanjem o kalifornijskem guvernerju Arnoldu Schwarzeneggerju, ki da je napolnil Hummerja na vodikov pogon (slika 20.25).



Slika 20.24 Zgoraj: Tramvaj na stisnjen zrak se v Nantesu polni z zrakom in paro. Za delovanje tramvajev so tam porabili 4,4 kg premoga (36 kWh) na km vozila oz. 115 kWh na 100 pkm, če so bili tramvaji polni. [5qhvcb] Spodaj: Lokomotiva na stisnjen zrak: masa 9,2 t, tlak 175 barov, moč 26 kW. Fotografije objavljene z dovoljenjem Rüdigerja Facha, Rolfa-Dieterja Reicherta in frankfurtskega Muzeja poljske železnice.



Slika 20.25 Hummer H2H: pridruživatelj zeleni revoluciji po ameriško. Fotografije objavljene z dovoljenjem General Motors.

V članku so peli hvalo njegovi viziji nadomeščanja »onesnaževalcev« z avtomobili na vodikov pogon z besedami: »Guverner je v resničnem življenju podnebni junak.« A ko imamo opravka s takšnim vodikovim junaštvom, si moramo zastaviti temeljno vprašanje: Od kod bomo pridobili *energijo* za *proizvodnjo* vodika? Še več, energijo lahko v vodik in iz njega pretvorimo samo neučinkovito – vsaj z obstoječo tehnologijo.

Poglejmo nekaj števil.

- V projektu CUTE (Čisti mestni promet za Evropo), ki naj bi v praksi pokazal izvedljivost in zanesljivost avtobusov z gorivnimi celicami in vodikove tehnologije, so za delovanje avtobusov na vodik porabili med 80 in 200 % *več* energije kot za avtobus na dizelsko gorivo, ki je bil za primerjavo.
- Za delovanje avtomobila na vodikov pogon *Hydrogen 7*, ki so ga izdelali pri BMW-ju, potrebujemo **254 kWh na 100 km** – 220 % več energije kot za povprečni evropski avto.

Če bi se naša naloga glasila »prenehajte uporabljati fosilna goriva v prometu in predpostavite, da je brezplačno na voljo *neskončna* količina okolju prijazne električne energije«, potem bi bila energijsko potratna prometna rešitev, kakršna je vodik, seveda v konkurenci za zmago (čeprav so z njim povezane še druge težave). Toda *okolju prijazna električna energija ni za-stonj*. Pridobivanje okolju prijazne elektrike v obsegu sedanje porabe bo v resnici velik izziv. Izziv fosilnih goriv je energijski izziv. Problem podnebnih sprememb je energijski problem. Pozornost moramo usmeriti v rešitve, s katerimi bi porabili manj energije, ne v »rešitve«, s katerimi bi porabili več! *Ne poznam kopenskega prevoznega sredstva, ki bi bilo po porabi energije hujše od avtomobila na vodikov pogon.* (Edini slabši prevozniki, ki ju poznam, sta vodni skuter, ki porabi približno **500 kWh na 100 km**, in drsni gliser *Earthrace* na biodizel, ki je znan pod absurdnim imenom eko-gliser in porabi **800 kWh na 100 pkm**.)

Zagovorniki vodika bodo rekli, da je »BMW Hydrogen 7 samo začetni prototip in da gre za luksuzni avto, ki od sebe dá res veliko, tehnologija pa se bo že še izboljšala«. Hja, upam, da res, kajti nadoknaditi mora precej zaostanka. Tudi Tesla Roadster (slika 20.22) je začetni prototip in je prav tako luksuzni avtomobil, ki od sebe dá res veliko. Energijsko pa je več kot desetkrat učinkovitejši od Hidrogena 7! Izvolite, stavite na vodikovega konja in če bo zmagal, tudi prav. Ampak zveni trapasto navijati za konja, ki ima v dirki takšen zaostanek. Poglejte sliko 20.23 – če ne bi ordinatne osi pri vrhu stisnil, bi avto na vodikov pogon segel prek roba strani!

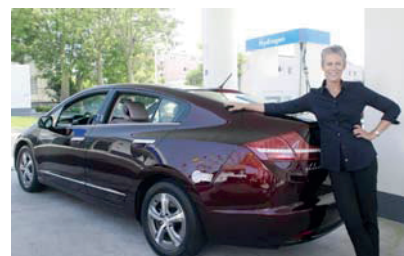
Res je, Hondin avtomobil z gorivnimi celicami FCX Clarity se odreže bolje – zapelje vas z 69 kWh na 100 km –, a ko bo vsega tega trobljenja o »ničelnih izpustih« konec, bomo po mojih napovedih ugotovili, da avtomobili na vodikov pogon porabijo prav toliko energije kot sedaj povprečni avto na fosilna goriva.



Slika 20.26 BMW Hydrogen 7. Poraba energije: **254 kWh na 100 km**. Foto: BMW.



Slika 20.27 »Eko-gliser« Earthrace. Foto: David Castor.



Slika 20.28 Honda FCX Clarity, limuzina z vodikovimi gorivnimi celicami, z Jamie Lee Curtis za merilo. Fotografije objavljene z dovoljenjem automobiles.honda.com.

Z vodikom je povezanih še nekaj drugih težav. V primerjavi z večino tekočih goriv je zaradi svojega obsega manj primeren medij za shranjevanje energije, naj ga shranjujemo kot visokotlačni plin ali kot tekočino (ki zahteva temperaturo $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$). Celo pri tlaku 700 barov (ki zahteva zajetno tlačno posodo) njegova energijska gostota (energija na enoto prostornine) znaša 22 % energijske gostote bencina. Kriogenski rezervoar BMW Hidrogena 7 tehta 120 kg in shrani 8 kg vodika. Poleg tega vodik iz kriogenkega rezervoarja počasi izpareva, da preostala vsebina v njem ostaja hladna. Če pustite avtomobil na vodikov pogon s polnim kriogenkim rezervoarjem na železniški postaji in se vrnete dva ali tri tedne pozneje, ne pričakujte, da bo ostalo kaj dosti vodika.

Nekaj vprašanj o električnih vozilih

Pokazali ste, da so električni avtomobili energijsko učinkovitejši od tistih na fosilna goriva. Toda ali so kaj boljši, če je naš cilj zmanjšati izpuste CO₂, elektriko pa še naprej proizvajamo v termoelektrarnah?

Izračun je precej preprost. Predpostavimo, da je poraba energije električnega vozila 20 kWh(e) na 100 km. (Mislim, da je 15 kWh(e) popolnoma izvedljivo, ampak bodimo pri tem izračunu nekoliko skeptični.) Če je ogljični odtis elektrike iz omrežja 500 g na kWh(e), so efektivni izpusti tega vozila **100 g CO₂ na km**, kar je enako dobro kot najboljši avtomobili na fosilna goriva (slika 20.9). Moj zaključek je, da je prehod k električnim avtomobilom že sam po sebi dobra ideja, še preden naša oskrba z električno energijo postane okolju prijaznejša.

Stroški proizvodnje in rabe so povezani tako z avtomobili na fosilna goriva kot z električnimi. Pri slednjih je raba mogoče cenejša, toda če baterije ne zdržijo dolgo, bi morda morali upoštevati tudi stroške proizvodnje.

Dobra ugotovitev. Na diagramu prometa prikažem samo stroške rabe. Če za električni avtomobil vsakih nekaj let potrebujemo nove baterije, moje številke morda niso dovolj visoke. V Priusu naj bi baterije zdržale samo 10 let, nove pa stanejo 3500 funtov. Kdo bi plačal takšen strošek za 10 let starega Priusa? Sklepamo lahko, da bo večina Priusov po 10 letih pristala na odpadu, kar vsekakor vzbuja skrb tudi pri drugih električnih vozilih z baterijami. Ostajam pa optimist, da se bo tehnologija baterij ob prehodu na električna vozila izboljšala.

Živim v vročih krajih. Kako naj uporabljam električni avtomobil? Hočem energijsko požrešno klimo!

Za to zahtevo obstaja elegantna rešitev: na navzgor obrnjene površine avtomobila namestite 4 m² fotonapetostnih modulov. Glede na to, da potrebujete klimo, prav gotovo sije sonce. Moduli z 20-odstotnim izkoristkom bodo zagotovili do 800 W, kar je dovolj za napajanje klimatske naprave avtomobila. Moduli bi morda koristili celo pri polnjenju parkiranega

avtomobila. Hlajenje s pomočjo energije sonca so leta 1993 vključili v neki model Mazde, pri čemer so bile sončne celice vgrajene v stekleno streho.

Živim v mrzlih krajih. Kako naj uporabljam električni avtomobil? Hočem energijsko požrešno gretje!

Motor električnega vozila ob delovanju potrebuje v povprečju kakšnih 10 kW, njegov izkoristek pa je 90–95 %. Nekaj izgubljene energije, preostalih 5–10 %, se porazgubi v motorju v obliki toplote. Morda bi lahko električne avtomobile za rabo v mrzlih krajih skrbno zasnovali tako, da bi to toploto, kakšnih 250 ali 500 W, iz motorja dovajali v avtomobil. S takšno količino bi lahko kar konkretno odrosili stekla ali se ogreli.

So litij-ionske baterije varne v primeru nesreče?

Nekatere litij-ionske baterije so nevarne, kadar pride do kratkega stika ali pregrevanja, vendar pa zdaj proizvajajo varnejše oblike, na primer litij-fosfatne. Na www.valence.com je na ogled zabaven filmček o varnosti.

Imamo dovolj litija za velikanski park električnih avtomobilov, ki bodo potrebovali baterije?

Svetovne zaloge litija ocenjujejo na 9,5 milijona ton rudnine (str. 175). Litij-ionska baterija vsebuje 3 % litija. Če predpostavimo, da ima vsako vozilo 200-kilogramsko baterijo, potrebujemo 6 kg litija na vozilo. Iz ocenjene zaloge torej lahko proizvedemo baterije za 1,6 milijarde vozil. To je več, kot je sedaj na svetu avtomobilov (približno 1 milijarda) – ne pa veliko več, zato bi količina litija utegnila biti problem, sploh če upoštevamo konkurenčne ambicije jedrskih fuzijskih fantov (24. poglavje), ki hočejo litij za svoje reaktorje. Nekaj tisočkrat več litija je še v morski vodi, zato bi bili lahko oceani koristna rezerva. Kljub vsemu pa strokovnjak za litij R. Keith Evans pravi, da »pomisleki o razpoložljivosti litija za baterije hibridnih ali električnih vozil ali druge predvidene načine uporabe nimajo osnove«. Poleg tega pa že razvijajo baterije brez litija, na primer cink-zračne polnilne baterije [www.revolvtechnology.com]. Če vprašate mene, ima električni avto prihodnost!

Prihodnost letenja?

Superjumbo A 380 je po besedah Airbusa »letalo z izjemno nizko porabo goriva«. V resnici pokuri samo 12 % manj goriva na potnika kot Boeing 747.

Pri Boeingu so oznanili podobno prelomnico, a je poraba goriva njihovega novega 747-8 Intercontinental, ki mu pojejo hvalo zaradi za planet rešilnih lastnosti (po podatkih iz Boeingovih oglasov), samo 15 % učinkovitejša kot pri 747-400.

Ta skromni napredek (v primerjavi z avtomobili, kjer spremembe tehnologije prinesejo dvakratne ali celo desetkratne izboljšave učinkovitosti) pojasnimo v tehničnem poglavju C. Letala se soočajo s temeljno omejitvijo,



Slika 20.29 Airbus A380.

ki jo določajo zakoni fizike. Vsako letalo mora ne glede na velikost potrošiti približno 0,4 kWh energije na tonski km, da ostane v zraku in v gibanju. Letala so že doslej izjemno optimizirali, zato si večjih izboljšav v njihovi učinkovitosti ne moremo obetati.

Včasih sem mislil, da bi uganko prometa na dolge razdalje lahko rešili z vrnitvijo k načinu, ki je bil v uporabi pred letali: k prekooceanskim linijskim ladjam. Potem sem pogledal številke. Žalostno, a resnično je, da prekooceanske ladje porabijo več energije na potniški km kot reaktivna letala. Ladja Queen Elizabeth 2 porabi štirikrat več energije na potniški km kot letalo. Dobro, to je luksuzno plovilo, se počasnejše ladje turističnega razreda odrežejo kaj bolje? Med letoma 1952 in 1968 je bilo Atlantik najgospodarneje prečkati z eno od dveh na Nizozemskem zgrajenih ladij, z Maasdamo ali Rijndamo, ki so jima pravili »ekonomski dvojčici«. Potovali sta s hitrostjo 16,5 vozlov (30,5 km/h), zato je pot od Velike Britanije do New Yorka trajala osem dni. Poraba energije je bila pri polni zasedenosti, 893 potnikov, 103 kWh na 100 pkm, pri običajni 85-odstotni zasedenosti pa 121 kW na 100 pkm, kar je več kot dvakrat več od letala. Če smo poštene do ladij, ne zagotavljajo samo prevoza, temveč potnike in posadko več dni oskrbujejo tudi s toploto, toplo vodo, svetlobo in razvedrilom. A energija, ki jo doma prihranimo, medtem ko se tiščimo na ladji, ni nič v primerjavi z energijo, ki jo porabi ladja – pri Queen Elizabeth 2 je ta 3000 kWh na dan na potnika.

Pri učinkoviti rabi energije ladje letal žal očitno ne bodo prekosile. Če želimo najti način potovanja na dolge razdalje brez fosilnih goriv, bi utegnile biti zanimiva možnost ladje na jedrski pogon (sliki 20.31 in 20.32).

Kaj pa tovor?

Mednarodni tovarni ladijski promet je presenetljivo učinkovit porabnik fosilnih goriv, zato je nujneje prekiniti rabo fosilnih goriv v cestnem prometu kot v ladijskem. So pa fosilna goriva končni vir in nekoč bo ladje morale poganjati nekaj drugega. Morda bi se izšlo z biogorivi. Druga možnost je jedrska energija. Prva ladja na jedrski pogon za prevoz tovora in potnikov je bila NS Savannah, ki so jo splavili leta 1962 v sklopu pobude ameriškega predsednika Dwighta D. Eisenhowerja, imenovane *Atomi za mir* (slika 20.31). Vozna hitrost te ladje s 74-megavatnim jedrskim reaktorjem, ki je poganjal 15-megavatni motor, je bila 21 vozlov (39 km/h), na njej je bil prostor za 60 potnikov in 14.000 ton tovora. Transportni strošek je tako 0,14 kWh na tonski km. Ladja je z enim polnjenjem prevozila 500.000 km. Danes je že veliko ladij na jedrski pogon, tako vojaških kot civilnih. Rusija ima deset ledolomilcev na jedrski pogon, od katerih jih je sedem še v uporabi. Na sliki 20.32 vidimo jedrski ledolomilec Jamal, ki ima dva 171-megavatna reaktorja in motorje, ki lahko zagotovijo moč 55 MW.



Slika 20.30 Ladja TSS Rijndam.



Slika 20.31 Ladja NS Savannah, prvo gospodarsko tovorno plovilo na jedrski pogon, na poti pod mostom Golden Gate leta 1962.



Slika 20.32 Jedrski ledolomilec Jamal leta 2001 med prevozom 100 turistov na severni tečaj. Foto: Wofratz.

»Trenutek! Magnetnega lebdenja pa niste omenili.«

V nemškem podjetju Transrapid, kjer so izdelali vlak na magnetni blazini za kitajski Šanghaj (slika 20.33), pravijo: »Visokohitrostnemu sistemu magnetnega lebdenja Transrapid na področjih stopnje hrupa, porabe energije in rabe prostora ni para. Inovativni brezstični prevozni sistem nudi mobilnost, ne da bi pri tem pozabil na okolje.«

Magnetno lebdenje je ena od mnogih tehnologij, ki jih ljudje v razpravah o energijskih vprašanjih radi napihnejo. V resnici primerjava z drugimi hitrimi vlaki z vidika porabe energije ni tako ugodna, kot bi sklepali po vsem tem viku in kriku. Na Transrapidovi strani ta vlak primerjajo z električnim hitrim vlakom InterCityExpress (ICE).

Primerjava hitrih vlakov pri 200 km/h (125 mph)	
Transrapid	2,2 kWh na 100 km sedeža*
ICE	2,9 kWh na 100 km sedeža

*kilometer sedeža: 1 sedež (poln ali prazen), ki prevozi 1 km.
Kadar so vsi sedeži zasedeni, je 1 sedež km enak 1 pkm. (op. prev.)

Glavni razlogi, da se vlak z magnetnim lebdenjem odreže nekoliko bolje kot ICE, so: motor na magnetni pogon ima večji izkoristek, vlak ima majhno maso, saj je večina pogonskega sistema v tirih in ne v vlaku, v vlaku pa je več potnikov, saj prostora ne zasedajo motorji. No, morda pa tudi zato, ker so podatki s spletne strani podjetja, ki izdeluje vlak z magnetnim lebdenjem in ga morajo prikazati v boljši luči!

Mimogrede, tisti, ki so vlak Transrapid v Šanghaju videli na lastne oči, pravijo, da je pri največji hitrosti »približno tako tih kot reaktivno letalo«.

Opombe in dodatno branje

stran

119 Pogosto citirani statistični podatek gre nekako takole: »En sam odstotek energije, ki jo avto porabi, gre za premikanje voznika.« V resnici se odstotek v tem mitu na svoji poti med ljudmi spreminja. Nekateri pravijo: »5 % energije se porabi za premikanje voznika.« Drugi spet: »Komaj tri desetinke odstotka energije goriva se porabi za premikanje voznika.« [4qgg8q] Mimogrede, sam menim, da noben od teh podatkov ni niti točen niti koristen.

- *Učinkovitost kolesa je približno enaka kot pri eko-avtomobilu.* Vožnja s kolesom pri hitrosti 20 km/h predstavlja približno 1,6 kWh na 100 km. Več podrobnosti in literature najdete v poglavju A na str. 262.
- *Osemvagonski lokalni potniški vlak Cambridge–London* (slika 20.4) tehta 275 ton in ima 584 sedežev. Njegova največja hitrost je 100 mph (161 km/h), izhodna moč pa 1,5 MW. Če so zasedeni vsi sedeži, vlak pri največji hitrosti porabi največ 1,6 kWh na 100 potniških km.

120 *Londonska podzemna železnica.* Vlak na progi Victoria sestavljajo štirje 30,5-tonski in štirje 20,5-tonski vagoni (prvi prevažajo motorje). Povprečen



Slika 20.33 Vlak z magnetnim lebdenjem na mednarodnem letališču Pudong v Šanghaju.

»vožnja brez koles;
letenje brez kril.«

Foto: Alex Needham.



Slika 20.34 Le vsako deseto vozilo v Londonu ni G-Wiz. (In 95 % statističnih podatkov je izmišljenih.)

vlak tehta 228 ton, ko je natovorjen. Največja hitrost je 45 mph (72,5 km/h), povprečna pa 31 mph (50 km/h). Na vlaku, kjer je večina sedežev zasedenih, je približno 350 potnikov, na nabito polnem pa približno 620. Ob konici je poraba energije približno 4,4 kWh na 100 potniških km (Catling 1966).

121 Hitri vlak.

Vlak Intercity 125 na dizelski pogon (na sliki 20.5 na desni) tehta 410 ton. Če vozi s hitrostjo 125 mph (200 km/h), je izhodna moč »na tirih« 2,6 MW. Ob polni zasedenosti je na vlaku okoli 500 potnikov. Povprečna poraba goriva je približno 0,84 litrov dizelskega goriva na 100 pkm [505x5m], kar pomeni, da je poraba energije pri transportu približno 9 kWh na 100 pkm. Električni vlak Class 91 (na sliki 20.5 na levi) vozi s hitrostjo 140 mph (225 km/h) in potrebuje 4,5 MW. Po podatkih Rogerja Kempa je njegova povprečna poraba energije 3 kWh na 100 pkm [505x5m]. Vlada v svojem dokumentu [5fbeg9] navaja, da tako glavni vlak na vzhodnoobalni progi kot tisti na zahodnoobalni progi porabita približno 15 kWh na km (ves vlak). Prvi ima 526 sedežev, drugi pa 470, torej to pomeni 2,9–3,2 kWh na 100 pkm.

- *Skupna poraba energije vseh londonskih podzemnih vlakov /.../ je bila 15 kWh na 100 pkm /.../. V istem obdobju je bila poraba energije vseh londonskih mestnih avtobusov 32 kWh na 100 pkm.* Vir: [679rpc]. Vir podatkov o hitrosti vlakov in avtobusov: Ridley in Catling (1982).

– Croydonski 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.

- #### 123 /.../ zagotavljanje odlične kolesarske infrastrukture /.../ Britanski pravilnik o projektiranju cest [www.manualforstreets.org.uk] priporoča, naj bo običajna dovoljena hitrost v naseljih 20 milj na uro (32 km/h). Glejte tudi Franklin (2007).

- #### 124 /.../ pravičen in preprost način cestninjenja vstopa v mesto.
- Stephen Salter mi je predstavil imeniten način avtomatiziranega cestninjenja vstopa v mesto. Preprosta dnevna tarifa, kot jo zaračunavajo v Londonu, za voznike ni drugega kot nerodno sporočilo. Ko se lastnik avtomobila namreč odloči, da bo plačal dnevno tarifo in zapeljal v plačljivo cono, ga nič ne spodbuja k temu, da bi se po coni vozil čim manj. Prav tako ni nagrajen z nobenim popustom, če pazljivo izbira poti, kjer ni gneče.

Namesto centraliziranega organa, ki vnaprej odloča, kdaj in kje so plačljive cone, ter dragega in vpadljivega spremljanja in snemanja vozil pri prihodu v cone in odhodu iz njih, se je Salter domislil preprostejšega, decentraliziranega, anonimnega načina zaračunavanja voznikom, ki zapeljejo v zgoščen, upočasnen promet, kjerkoli in kadarkoli se ta pač pojavi. Sistem bi deloval po vsej državi, in sicer takole. Potrebujemo napravo, ki bo odgovorila na vprašanje, kako zgoščen je promet okrog mene. Gnečo lahko merimo tako, da se vprašamo, koliko drugih aktivnih vozil je v bližini mojih. V tekočem prometu je razdalja med vozili večja kot v upočasnjem prometu. Najgostejše so razporejena vozila, ki se valijo v dolgih kolonah. Število bližnjih aktivnih vozil lahko anonimno merimo tako, da v vsako vozilo namestimo radijski

avtomobil
(100 km):
80 kWh

vlak: 3 kWh

Slika 20.35 100 km v avtomobilu z enim potnikom v primerjavi s 100 km na polnem električnem hitrem vlaku.



Slika 20.36 Tramvaji dobro delujejo tudi v Carigradu in Pragi.

oddajnik/sprejemnik (kot zelo poceni mobilni telefon), ki enakomerno oddaja kratke radijske signale in šteje število signalov, ki jih prejme od drugih vozil, in to vedno, ko motor teče. Cestnina bi bila sorazmerna s številom prejetih signalov, lahko pa bi jo poravnali na bencinskih postajah, ko bi polnili avto. V Veliki Britaniji bi radijski oddajnik/sprejemnik nadomestil sedanje nalepke, ki potrjujejo plačilo cestnine.

126 Z vztrajniki in s hidravliko rešimo vsaj 70 % energije zaviranja. Stisnjen zrak za regenerativno zaviranje uporabljajo v tovornjaki; na eaton.com pravijo, da »sistem Hydraulic Launch Assist« zajame 70 % kinetične energije. [5cp27j] 70 % kinetične energije zajame tudi vztrajniški sistem Flybrid. www.flybridsystems.com/F1System.html

Z električnim regenerativnim zaviranjem rešimo približno 50 %. Vir: E4tech (2007).

- **Električne baterije, ki bi zagotavljale moč 60 kW, bi tehtale približno 200 kg.** Gostota moči dobrih litij-ionskih baterij je 300 W/kg (Horie in sod. 1997, Mindl 2003).
- **Izpusti povprečnega novega avtomobila v Veliki Britaniji so 168 g CO₂ na km.** Gre za podatek za leto 2006 (King 2008). Povprečni izpusti novega potniškega vozila v ZDA so bili 255 g na km (King 2008).
- **Toyota Prius ima učinkovitejši motor.** Bencinski motor Priusa namesto običajnega Ottovega cikla uporablja Atkinsonovega. Po zaslugi spretnega kombiniranja električne moči in moči goriva ob voznikovih ukazih se Prius izmaže z manjšim motorjem, kot jih običajno najdemo v avtomobilih z enako maso, in bencin pretvori učinkoviteje kot običajen bencinski motor.
- **S hibridnimi tehnologijami v praksi dosežemo 20- ali 30-odstotni prihranek goriva.** Poglejmo na primer Hitachijevo poročilo o raziskavi, kjer opisujejo hibridne vlake (Kaneko in sod. 2004): visoko učinkovita proizvodnja električne energije in regenerativno zaviranje naj bi »po pričakovanjih prinesla približno 20-odstotni prihranek goriva v primerjavi z običajnimi dizelskimi vlaki«.

127 Samo 8,3 % vozačev potuje na delo več kot 30 km daleč. Vir: Eddington (2006). O odvisnosti dosega električnega avtomobila od velikosti baterije govorimo v poglavju A (str. 261).

- **Veliko drugih električnih vozil.** Navedena so na naslednjih straneh v naključnem vrstnem redu. Podatki o zmogljivostih večinoma izvirajo od proizvajalcev. Kot smo videli na str. 127, te v praksi ne dosežejo vedno oglaševane vrednosti.

Th!nk Norveški električni avtomobili. Doseg petratnega Th!nk Ox je 200 km. Baterije tehtajo 350 kg, avto pa skupaj 1500 kg. Poraba energije je približno 20 kWh na 100 km. www.think.no

Električni Smart »Električno različico poganja 30-kilovatni motor, njen doseg je 70 milj (112,5 km), največja hitrost pa 70 mph (112,5 km/h). Napolnimo ga prek standardne električne vtičnice, kar stane približno 1,20 funta, kar ustreza 60 g/km izpustov ogljikovega dioksida v elektrarni. [prim. ekvivalent bencinskega Smarta: 116 g/km.] Popolno polnjenje traja približno osem ur, lahko pa baterijo v približno treh urah in pol napolnimo od 80-odstotno izpraznjenega do 80-odstotno napolnjenega.«

[www.whatcar.com/news-article.aspx?NA=226488]



Slika 20.37 Th!nk Ox. Foto: www.think.no.

Berlingo Electric 500E, mestno gospodarsko vozilo (slika 20.20) ima 27 nikelj-kadmijevih baterij in 28-kilovatni motor. Največja obremenitev je 500 g, največja hitrost 100 km/h, doseg 100 km. **25 kWh na 100 km.** (Oceno je prijazno prispeval neki lastnik Berlinga). [4wm2w4]

i MiEV Ta električni avto naj bi imel doseg 160 km in baterije z zmogljivostjo 16 kWh. To pomeni **10 kWh na 100 km**, kar je bolje od G-Wiza. In v primerjavi z G-Wizom, kamor je dva odrasla Evropejca težko namestiti, ima Mitsubishijev prototip štiri vrata in štiri običajno velike sedeže (slika 20.38). [658ode]

EV1 Dvosed podjetja General Motors je imel doseg med 120 in 240 km na polnjenje ter nikelj-kovinske hibridne baterije s 26,4 kWh. Poraba energije je torej med **11 in 22 kWh na 100 km.**

Lightning (slika 20.39) ima štiri 120-kilovatne brezkrtačne motorje, po enega za vsako kolo, regenerativno zaviranje in hitro polnilne litij-titanijeve baterije Nanosafe. 36 kWh zmogljivosti omogoča doseg 200 milj (320 km). To pomeni **11 kWh na 100 km.**

Aptera Ta krasna spolzka riba je dvosed, njegova poraba energije naj bi bila **6 kWh na 100 km.** Koeficient zračnega upora je 0,11 (slika 20.40). Razvijajo električni in hibridni model.

Loremo Kot Aptera ima tudi Loremo (slika 20.41) majhno prednjo površino in majhen koeficient zračnega upora (0,2), na voljo pa bo tako v različici na fosilna goriva kot v električni. Ima dva odrasla sedeža in dva vzvratno obrnjena otroška sedeža. Električni Loremo bo imel litij-ionske baterije, njegova poraba energije naj bi bila po napovedih **6 kWh na 100 km**, največja hitrost 170 km/h, doseg pa 153 km. Tehta 600 kg.

eBox eBox ima litij-ionsko baterijo z zmogljivostjo 35 kWh in maso 280 kg. Doseg je med 140 in 180 miljami (225 do 290 km). Maksimalna moč motorja je 120 kW, zagotavlja lahko stalno moč 50 kW. Poraba energije: **12 kWh na 100 km.**

Ze-0 Avto s petimi sedeži in petimi vrati. Največja hitrost: 50 mph (80 km/h). Doseg: 50 milj (80 km). Masa vključno z baterijami: 1350 kg. Svinčeno-kislinske baterije z zmogljivostjo 18 kWh. Motor: 15 kW. **22,4 kWh na 100 km.**

e500 Italijanski avto v Fiatovem slogu, ki ima dvoje vrat in 4 sedeže. Največja hitrost: 60 mph (97 km/h). Doseg z mestno vožnjo: 75 milj (121 km). Baterija: litij-ionski polimer.

MyCar MyCar je italijanski dvosed. Največja hitrost: 40 mph (64 km/h). Največji doseg: 60 milj (97 km). Svinčeno-kislinska baterija.

Mega City Dvosed z maksimalno stalno močjo 4 kW in največjo hitrostjo 40 mph (64 km/h): **11,5 kWh na 100 km.** Masa praznega vozila (vključno z baterijami): 725 kg. Zmogljivost svinčenih baterij je 10 kWh.

Xebra Zmogljivost 4,75 kWh naj bi ji dala 40-kilometrski doseg. **12 kWh na 100 km.** Največja hitrost je 65 km/h. Svinčeno-kislinske baterije.

TREV Dvosedežno vozilo na obnovljivo energijo oz. TREV je prototip, ki so ga razvili na univerzi v Južni Avstraliji (slika 20.42). Doseg tega trikolesnika je 150 km, največja hitrost 120 km/h, masa 300 kg, litij-ionske polimer baterije



Slika 20.38 i MiEV proizvajalca Mitsubishi Motors Corporation. Ima 47-kilovatni motor, tehta 1080 kg in doseže hitrost do 130 km/h.



Slika 20.39 Lightning: **11 kWh na 100 km.**
Foto: www.lightningcarcompany.co.uk.



Slika 20.40 Aptera. **6 kWh na 100 km.**
Foto: www.aptera.com.



Slika 20.41 Loremo. **6 kWh na 100 km.**
Foto: www.loremo.com.

pa tehtajo 45 kg. V praksi je bila poraba energije na 3000-kilometrskem potovanju 6,2 kWh na 100 km.

Venturi Fetish Ima baterijo z 28 kWh, ki tehta 248 kg. Avtomobil tehta 1000 kg, doseg je 160–250 km. To pomeni 11–17 kWh na 100 km. www.venturifetish.fr/fetish.html.

Toyota RAV4 EV To Toyotino električno kompaktno terensko vozilo je bilo v prodaji med letoma 1997 in 2003 (slika 20.43). Ima 24 12-voltnih baterij 95 Ah NiMH, ki lahko shranijo 27,4 kWh energije, doseg je med 130 in 190 km. To pomeni porabo energije med 14 in 21 kWh na 100 km. RAV4 EV je bil priljubljeno vozilo policijske enote v Jerseyju.

Phoenix SUT Petsedežno športno poltovorno vozilo, narejeno v Kaliforniji, ima doseg »do 130 milj« (209 km) in litij-ionske baterije s 35 kWh. (To pomeni 17 kWh na 100 km.) Baterije napolnimo v 10 minutah s priklopom na posebno vtičnico. www.gizmag.com/go/7446/

Gospodarsko vozilo Modec Modec prepelje dve toni 100 milj (161 km) daleč. Masa praznega vozila je 3000 kg. www.modec.co.uk

Smith Ampere Manjše gospodarsko vozilo, litij-ionske baterije s 24 kWh. Doseg »več kot 100 milj« (161 km). www.smithelectricvehicles.com

Električni minibus Podatki s strani www.smithelectricvehicles.com: litij-ionske baterije s 40 kWh. 90-kilovatni motor z regenerativnimi zavornimi. Doseg »do 100 milj« (161 km). 15 sedežev. Masa praznega vozila 3026 kg. Največja obremenitev 1224 kg. To pomeni, da vozilo doseže največ 25 kWh na 100 km. Ob polni zasedenosti je poraba energije pri transportu občudovanja vredni 2 kWh na 100 pkm.

Električni avtobus Doseg avtobusa Thunder Sky je 180 milj (290 km), polni se tri ure. www.thunder-sky.com

Električni skuterji Vectrix je kar konkreten skuter (slika 20.44). Zmogljivost njegove baterije (nikelj-kovinski hibrid) je 3,7 kWh. Po dveurnem polnjenju pri standardni električni vtičnici prevozi 68 milj (109 km) s hitrostjo 25 milj/h (40 km/h). To pomeni 110 km za 3 kWh oz. 2,75 kWh na 100 km. Največja hitrost je 62 mph (100 km/h). Tehta 210 kg, njegova maksimalna moč pa je 20 kW. www.vectrix.com

Skuter »Oxygen Cargo« je manjši. Tehta 121 kg, ima doseg 38 milj (61 km), polni pa se 2–3 ure. Maksimalna moč: 3,5 kW, največja hitrost 28 mph (45 km/h). Ima dve litij-ionski bateriji in regenerativne zavore. Doseg lahko povečamo z dodajanjem baterij, ki shranijo približno 1,2 kWh in tehtajo po 15 kg. Poraba energije: 4 kWh na 100 km.

129 /.../ *energijska gostota hrambe stisnjenega zraka je samo 11–28 Wh na kg.* Teoretična meja ob popolni izotermni kompresiji: če 1 m³ zunanega zraka počasi stisnemo v 5-litrsko posodo pri tlaku 200 barov, je v 1,2 kg zraka shranjene 0,16 kWh potencialne energije. V praksi 5-litrška posoda, ki bi vzdržala takšen tlak, tehta kakšnih 7,5 kg, če je iz jekla, ali 2 kg, če je iz vlaken kevlar ali karbonskih vlaken. Skupna energijska gostota bi bila 11–28 Wh na kg. Teoretična energijska gostota je enaka ne glede na prostornino posode.



Slika 20.42 TREV. 6 kWh na 100 km.
Foto: www.unisa.edu.au.



Slika 20.43 Toyota RAV4 EV. Foto: Kenneth Adelman, www.solarwarrior.com.



Slika 20.44 Vectrix: 2,75 kWh na 100 km.
Foto: www.vectrix.com.

130 /.../ *Arnoldu Schwarzeneggerju, ki da je napolnil Hummerja na vodikov pogon*. *Nature* 438, 24. november 2005. Nočem reči, da vodik v prometu nikoli ne bo uporaben; bi pa pričakoval, da se ugledna revija, kot je *Nature*, vodikovega mognega krika ne bo lotila z golo evforijo, temveč z nekaj kritičnega premisleka.

Vodik in gorivne celice niso prava smer. Odločitev Busheve administracije in zvezne države Kalifornije, da se podata po poti vodika, je najslabša odločitev v zadnjih nekaj letih.

James Woolsey, predsednik svetovalnega odbora pri Ameriški fundaciji za čista goriva, 27. november 2007.

Septembra 2008 so v *Economistu* zapisali: »Skoraj nihče ne dvomi, da /.../ bodo sčasoma večino avtomobilov napajale izključno baterije.«

Za več informacij zagovornikov uporabe vodika v prometu pa si oglejte stran Inštituta Rocky Mountain o vozilu »HyperCar« www.rmi.org/hypercar/.

- *V projektu CUTE (Čisti mestni promet za Evropo) so za delovanje avtobusov na vodik porabili med 80 in 200 % več energije kot za avtobus na dizelsko gorivo, ki je služil za primerjavo*. Vira: CUTE (2006), Binder in sod. (2006).
- *Za delovanje avtomobila na vodikov pogon, ki so ga izdelali pri BMW-ju, potrebujemo trikrat več energije kot za povprečni avto*. Polovico prtljažnika BMW-jevega avtomobila »Hydrogen 7« zasede 170-litrski rezervoar za vodik, v katerem je 8 kg vodika, s katerim avto prevozi 200 km [news.bbc.co.uk/1/hi/business/6154212.stm]. Energijska vrednost vodika je 39 kWh na kg, poraba energije pri proizvodnji vodika pa je ob najboljši praksi 63 kWh na kg (sestavlja ga 52 kWh zemeljskega plina in 11 kWh elektrike) (CUTE 2006). Poraba energije polnjenja 8-kilogramskega rezervoarja je tako najmanj 508 kWh in če s polnim rezervoarjem zares prevozimo 200 km, potem je poraba energije 254 kWh na 100 km.

Hydrogen 7 in njegovi sorodniki z vodikovimi gorivnimi celicami so v mnogih pogledih samo bleščavo preusmerjanje pozornosti.

David Talbot, revija MIT Technology Review
www.technologyreview.com/Energy/18301/

Hondin avtomobil z gorivnimi celicami FCX Clarity tehta 1625 kg, shrani 4,1 kg vodika pod tlakom 345 barov, njegov doseg pa naj bi bil 280 milj (451 km), pri čemer v standardnih vozni razmerah prevozi 57 milj na kg vodika (91 km na kg) [czjj0], [5a3ryx]. Če uporabimo prej navedeni podatek o porabi energije pri proizvodnji vodika in predpostavimo, da za glavni energent uporabimo zemeljski plin, je poraba energije pri transportu avtomobila 69 kWh na 100 km.

Honda s trditvami, da avtomobili na vodik »ne povzročajo izpustov«, mogoče lahko preslepi novinarje, žal pa ne more potegniti za nos podnebja.

Merrick Godhaven

132 *Litij-ionska baterija vsebuje 3 % litija*. Vir: Fisher in sod. (2006).

- *Strokovnjak za litij R. Keith Evans pravi, da »pomisleki o razpoložljivosti litija /.../ nimajo osnove«*. Vir: Evans (2008).

133 *Na Nizozemskem zgrajeni ladji, ki so jima pravili »ekonomski dvojčici«*. www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm
Queen Elizabeth 2: www.qe2.org.uk

134 *Vlak na magnetni blazini Transrapid*. www.transrapid.de.

21 Pametnejše ogrevanje

V prejšnjem poglavju smo ugotovili, da bi lahko z elektrifikacijo skrčili porabo energije v prometu na petino sedanje vrednosti in da sta lahko javni promet in kolesarjenje energijsko približno 40-krat učinkovitejša od vožnje z avtomobilom. Kaj pa ogrevanje? Kolikšne prihranke energije lahko ponudi tehnologija, kolikšnega pa sprememba načina življenja?

Moč, ki jo potrebujemo za ogrevanje stavbe, izračunamo s pomočjo treh količin:

$$\text{potrebna moč} = \frac{\text{povprečna temperaturna razlika} \times \text{koeficient toplotnih izgub stavbe}}{\text{učinkovitost ogrevalnega sistema}}$$

Naj pojasnim formulo (o kateri podrobneje govorim v poglavju E) s primerom. Živim v trosobnem dvojčku, ki je bil zgrajen približno leta 1940 (slika 21.1). Povprečna temperaturna razlika med notranjostjo in zunanostjo hiše je odvisna od nastavitve termostata in od vremena. Če je termostat stalno nastavljen na 20 °C, je povprečna temperaturna razlika kakšnih 9 °C. Koeficient toplotnih izgub stavbe pomeni, kako hitro toplota zaradi temperaturne razlike uhaja skozi stene, okna in razpoke. Merimo ga v kWh na dan na stopinjo temperaturne razlike. V poglavju E izračunam, da je bila leta 2006 prepustnost moje hiše 7,7 kWh/d/°C. Zmnožek

$$\text{povprečna temperaturna razlika} \times \text{koeficient toplotnih izgub}$$

pomeni, kako hitro toplota odteka iz stavbe zaradi prehoda toplote ter ventilacije in zračenja. Če je na primer povprečna temperaturna razlika 9 °C, so toplotne izgube

$$9\text{ °C} \times 7,7\text{ kWh/d/°C} \simeq 70\text{ kWh/d.}$$

Zdaj pa za izračun potrebne moči toplotne izgube delimo še z učinkovitostjo ogrevalnega sistema. Pri meni doma ima plinski kondenzacijski kotel 90-odstotni izkoristek, zato dobimo:

$$\text{potrebna moč} = \frac{9\text{ °C} \times 7,7\text{ kWh/d/°C}}{0,9} = 77\text{ kWh/d.}$$

Ta je večja od potrebne moči za ogrevanje, kot smo jo ocenili v 7. poglavju. Številka je večja zaradi dveh razlogov. Prvič, v tej formuli predpostavimo, da vso toploto zagotavlja kotel, v resnici pa nekaj toplotnih dobitkov prispevajo stanovalci, naprave in sonce. Drugič, v 7. poglavju smo predpostavili, da človek temperaturo 20 °C ves čas vzdržuje samo v dveh prostorih, za vso hišo pa potrebujemo več.



Slika 21.1 Moja hiša.

1. Zmanjšajmo **povprečno temperaturno razliko**. To lahko dosežemo z nastavitvijo termostata na nižjo temperaturo (če imate prijatelje visoko nad vami, pa tudi s spremembo vremena).
2. Zmanjšajmo **koeficient toplotnih izgub stavbe**. To lahko naredimo z boljšo izolacijo stavbe – razmislite o trojni zasteklitvi, zaščiti pred preprihom in toploto izolacijo na podstrešju –, radikalnejšo potezo, kot je rušenje stavbe in gradnja nove, bolje izolirane, ali z bivanjem v stavbi z manjšo površino na osebo. (Večja kot je površina stavbe, večji je običajno koeficient toplotnih izgub, saj to običajno pomeni tudi večje površine zunanjih sten, oken in strehe.)
3. Povečajmo **učinkovitost ogrevalnega sistema**. Morda boste rekli, da bo 90 % težko preseči, ampak v resnici je rezultat lahko precej boljši.

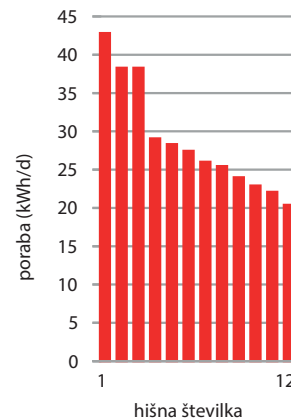
Termostat – vroča tehnologija

Ko govorimo o tehnologijah, pri katerih za njihovo ceno dobimo največ, je termostat (v družbi volnenih puloverjev) težko prekositi. Obrnete gumb in vaša hiša porabi manj energije. Čarovnija! V Veliki Britaniji se toplotne izgube za vsako stopinjo znižanja termostata zmanjšajo za približno 10 %. Z znižanjem termostata z 20 °C na 15 °C bi jih skoraj prepolovili. Po zaslugi toplotnih dobitkov je prihranek moči, potrebne za ogrevanje, celo večji od tega zmanjšanja toplotnih izgub.

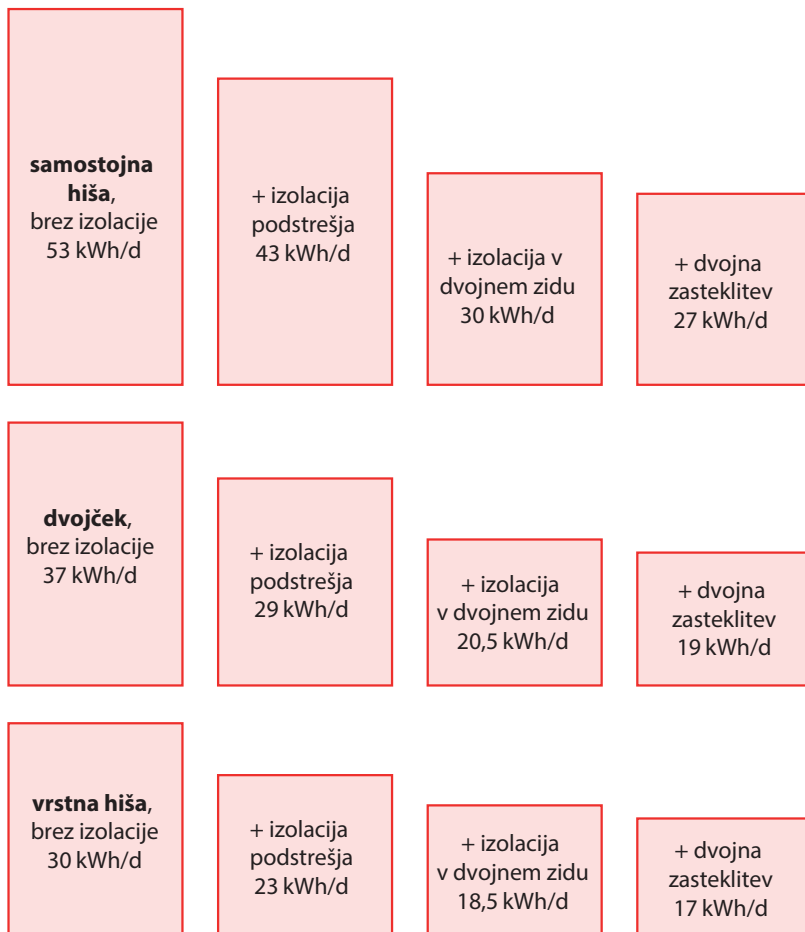
Žal pa ima ta izjemna tehnologija varčevanja z energijo stranske učinke. Nekateri znižanju temperature na termostatu pravijo sprememba načina življenja in z njim niso najbolj zadovoljni. Nekoliko pozneje bom predlagal nekaj možnosti, kako se tem življenjskim spremembam lahko izognete. Zdaj pa kot dokaz, da je »najpomembnejši pametni element stavbe s pametnim ogrevanjem stanovalec«, pogledajmo sliko 21.2 s podatki iz raziskave podjetja Carbon Trust, v kateri so spremljali porabo toplote v dvanajstih enakih sodobnih hišah. Ob družini na številki 1 se nam povesi čeljust, saj je njihova poraba dvakrat večja od porabe g. in ge. Zima na številki 12. Ampak pogledajmo še številke: družina na številki 1 porabi 43 kWh na dan. Počakajte, to naj bi bilo nezaslišano? Nisem pravkar ocenil, da *moja* hiša najbrž porabi še več? Moja povprečna poraba plina je bila med letoma 1993 in 2003 v resnici nekaj več kot 43 kWh na dan (slika 7.10, str. 53), jaz pa sem mislil, kako varčen sem! Problem je v *hiši*. Koeficient toplotnih izgub vseh sodobnih hiš v raziskavi je 2,7 kWh/d/°C, moje pa 7,7 kWh/d/°C! Vsak naj pometa pred svojim pragom ...

Izkoreninimo toplotne izgube

Kaj lahko ukrenemo s toplotnimi izgubami starih hiš, če nočemo klicati na pomoč buldožerjev? Na sliki 21.3 so ocene energije, potrebne za ogrevanje stare samostojne hiše, dvojčka in vrstne hiše ob čedalje večjem prizadevanju, da jih zakrpano. Izolacija podstrešja in izolacija v dvojnem zidu



Slika 21.2 Dejanska poraba toplote v 12 identičnih hišah z identičnimi ogrevalnimi sistemi. Površina vseh hiš meri 86 m² in vse so bile zasnovane tako, da je njihov koeficient toplotnih izgub 2,7 kWh/d/°C. Vir: Carbon Trust (2007).



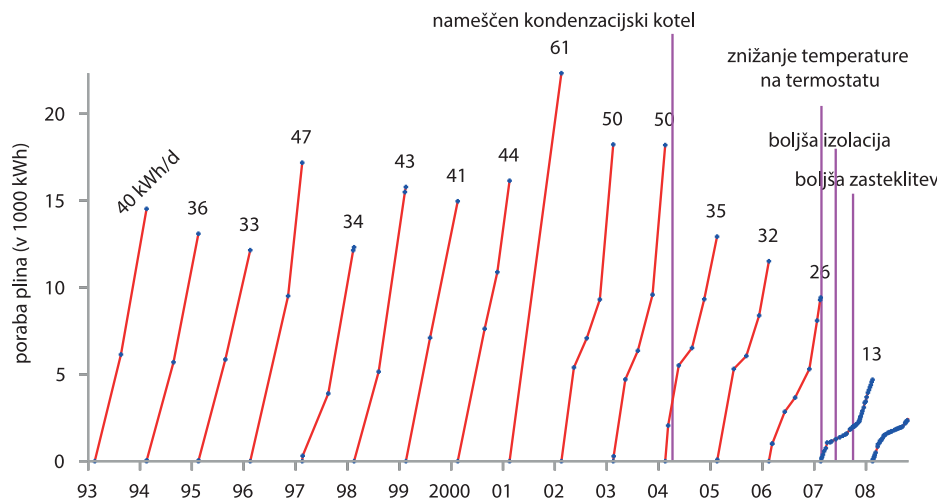
Slika 21.3 Ocenjena potrebna toplota za ogrevanje različnih britanskih hiš. Vir: Eden in Bending (1985).

toplotne izgube tipične stare hiše zmanjšata za približno 25 %. Po zaslugi toplotnih dobitkov se to 25-odstotno zmanjšanje prevede v približno 40-odstotno zmanjšanje porabe.

Preverimo te ideje »v praksi«.

Primer

Na strani 53 sem vam predstavil svojo hišo. Nadaljujmo, kjer smo ostali. Leta 2004 sem stari plinski kotel zamenjal s plinskim kondenzacijskim kotlom. (Kondenzacijski kotli s pomočjo prenosnika toplote prenašajo toploto izpušnih plinov v vhodni zrak.) Obenem sem iz hiše odstranil akumulacijski grelnik vode (zato se zdaj greje samo toliko vode, kot se je porabi) in na radiatorje v vseh sobah namestil termostate. Novi kondenzacijski kotel ima tudi nov krmilnik, s katerim lahko za posamezne dele dneva nastavim različno ciljno temperaturo. S temi spremembami se je moja poraba zmanjšala s povprečnih 50 kWh/d na približno 32 kWh/d.



Slika 21.4 Moja letna domača poraba plina med letoma 1993 in 2007. Vsaka črta pomeni kumulativno porabo v enem letu v kWh. Številka na koncu vsakega leta je povprečna vrednost za porabo v tem letu v kWh na dan. Modre pike pomenijo odčitavanje števca. Očitno lahko s pogostejšim odčitavanjem števca zelo zmanjšam porabo plina!

To zmanjšanje s 50 na 32 kWh/d je kar navdušujoče, a če je cilj zmanjšati posameznikov odtis fosilnih goriv pod tono CO₂ na leto, ni zadostno. 32 kWh/d plina ustreza več kot 2 tonama CO₂ na leto.

Leta 2007 sem se začel skrbneje posvečati svojim števcem porabe. Dodal sem izolacijo v dvojne zidove (slika 21.5) in izboljšal izolacijo podstrešja. Zadnja vrata z enojno zasteklitvijo sem zamenjal s takšnimi z dvojno zasteklitvijo in pred vhodna vrata dodal še ena z dvojno zasteklitvijo (slika 21.6). In kar je najpomembnejše, pozornejši sem bil na nastavitve termostata. Ta pozornost je prinesla dodatno prepolovitev porabe plina. Zadnje leto je bila poraba 13 kWh/d!

Ta primer je velika mineštra gradbenih prilagoditev in sprememb vedenjskih vzorcev, zato je težko z gotovostjo reči, katere spremembe so bile odločilne. Po mojih izračunih (v poglavju E) se je z izboljšavami izolacije koeficient toplotnih izgub zmanjšal za 25 %, s **7,7 kWh/d/°C** na **5,8 kWh/d/°C**. To je še vedno veliko slabše od katere koli sodobne hiše. Prav mučno težko je zmanjšati toplotne izgube že zgrajene hiše!

Moj prvi nasvet je spretno upravljanje termostata. Na kakšno nastavitev termostata meriti, da bo razumna? Veliko ljudi bi danes reklo, da je 17 °C neznosen mraz. A leta 1970 je bila povprečna zimska temperatura v britanskih hišah 13 °C! Človekov občutek za toploto je odvisen od tega, kaj počne in kaj je počel zadnjo uro. Moj predlog je: *ne razmišljajte o neki specifični nastavitvi termostata*. Namesto, da je ves čas nastavljen na isto vrednost, naj bo večino časa na zelo nizki vrednosti (recimo 13 ali 15 °C), ko vam bo hladno, pa temperaturo občasno zvišajte. Stvar je podobna kot luči v knjižnici. Če si zastavite vprašanje »Kakšna je prava osvetlitev knjižnih polic?«, boste brez dvoma odgovorili: »Dovolj velika, da lahko prebereš naslove.« In ves čas bodo gorele močne luči. A vprašanje predpostavlja, da moramo jakost osvetlitve spremeniti, pa v resnici ni treba. Lahko namestimo stikala, da bralec prižge luč, ki se po nekem ustreznem času spet ugasne. Tako tudi termostata ni treba ves čas puščati pri 20 °C.



Slika 21.5 Nameščanje izolacije v praznine med dvojnimi zidom.



Slika 21.6 Nova prednja vrata.

Preden končamo z nastavitvami termostata, naj omenim še klimaticizacijo. Tudi vas spravlja ob pamet, da poleti vstopite v stavbo, kjer je klimatska naprava nastavljena na 18 °C? Prismojeni upravniki nas vse skupaj obsodijo na temperaturo, ob kateri bi pozimi sami jokali in stokali, češ da je prenizka! Na Japonskem vlada v svojih smernicah kampanje »Cool-Biz« priporoča, naj bodo klimatske naprave nastavljene na 28 °C (82 F).

Boljše stavbe

Če imate možnost sezidati novo stavbo, lahko na različne načine zagotovite, da bo poraba za njeno ogrevanje veliko manjša kot pri stari stavbi. Slika 21.2 dokazuje, da sodobne hiše dosegajo veliko višje izolacijske standarde kot tiste iz 40. let 20. stoletja. A kot ugotavljamo v poglavju E, bi bili lahko standardi gradnje v Veliki Britaniji še boljši. Glavni trije ukrepi za kar najboljši rezultat so: (1) naj bo izolacija tal, sten in strehe čim debelejša, (2) naj bo stavba nepredušno zaprta, z aktivno ventilacijo in zračenjem zamenjajte postan in vlažen zrak za svežega, toplotni izmenjevalnik pa naj pasivno obnovi večino toplote odstranjenega zraka, (3) naj bo stavba zasnovana tako, da čim bolje izkoristi sončno sevanje.

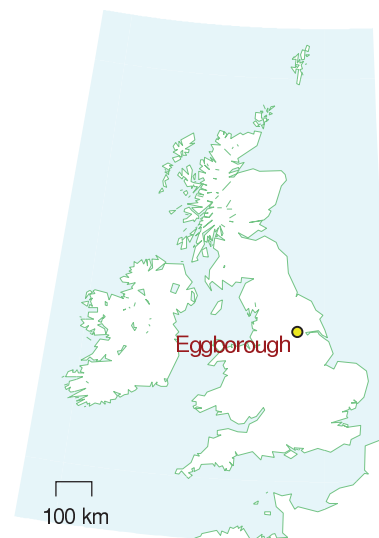
Poraba toplote

Doslej smo se v tem poglavju posvečali **uravnavanju temperature** in **toplotnim izgubam**. Pojdimo zdaj k tretji spremenljivki v enačbi:

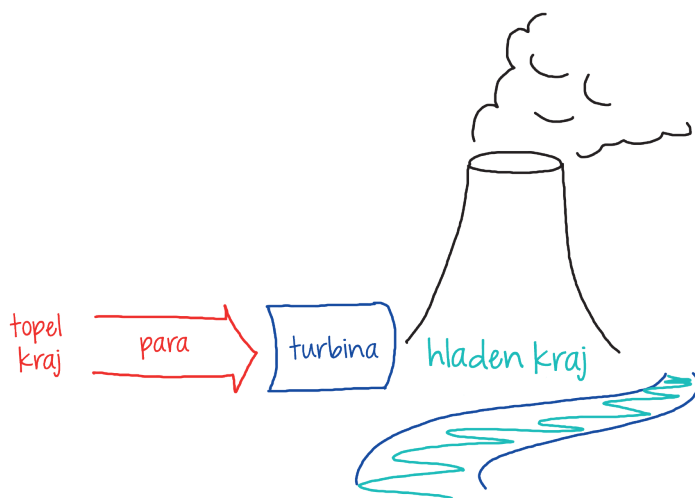
$$\text{potrebna moč} = \frac{\text{povprečna temperaturna razlika} \times \text{koeficient toplotnih izgub stavbe}}{\text{učinkovitost ogrevalnega sistema}}$$

Kako učinkovito lahko proizvajamo toploto? Lahko do nje pridemo poceni? Toploto za ogrevanje stavb v Veliki Britaniji proizvajamo večinoma s kurjenjem nekega fosilnega goriva – zemeljskega plina – v kotlih z izkoristkom od 78 do 90 %. Lahko prekinemo rabo fosilnih goriv in hkrati povečamo učinkovitost ogrevanja?

Tehnologija, ki velja za odgovor na britanski problem ogrevanja, se imenuje »soproizvodnja toplote in električne energije« (SPTe), njena sestrška oblika pa »mikrosoproizvodnja«. Takoj bom pojasnil, za kaj gre, sem pa prišel do sklepa, da je ideja slaba, saj za ogrevanje obstaja boljša tehnologija, in sicer toplotne črpalke. Njim bom namenil nekaj strani v nadaljevanju.



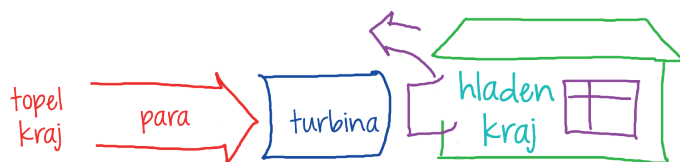
Slika 21.7 Eggborough. Ta elektrarna ne sodeluje pri pametnem ogrevanju.



Slika 21.8 Delovanje elektrarne. Obstajati mora hladen kraj, kjer para, ki poganja turbino, kondenzira. Ta hladni kraj je običajno hladilni stolp ali reka.

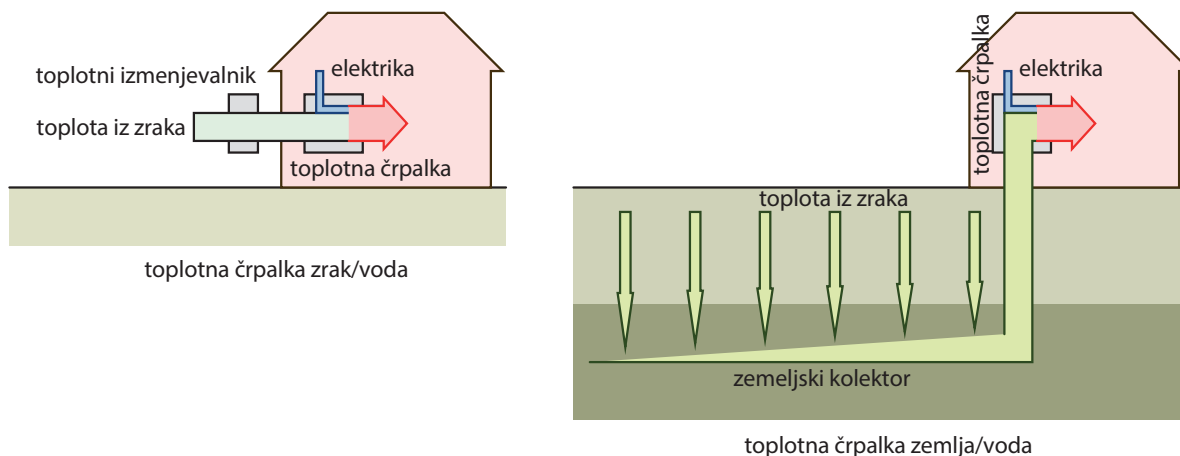
Soproizvodnja toplote in električne energije

Običajno mnenje o konvencionalnih velikih centraliziranih elektrarnah je, da so strašansko neučinkovite in toploto hočeš nočeš razmetavajo skozi dimnike in hladilne stolpe. Bolj sofisticirano mnenje priznava, da moramo za pretvorbo toplote v elektriko toploto neizbežno pošiljati na hladen kraj (slika 21.8). Tako delujejo toplotni stroji. Hladen prostor preprosto mora biti. Ampak, rečejo potem, saj bi menda lahko kot odlagališče te »odpadne« toplote namesto hladilnih stolpov ali morske vode uporabljali stavbe? Tej ideji pravimo »soproizvodnja toplote in električne energije« (SPTE) in jo v celinski Evropi uporabljajo že desetletja – v številnih mestih je velika elektrarna združena s sistemom daljinskega ogrevanja. Zagovorniki mikrosoproizvodnje, sodobnega utelešenja soproizvodnje toplote in električne energije, predlagajo, da bi v posameznih stavbah ali manjših sklopih stavb uredili majcene elektrarne, ki bi te stavbe oskrbovale s toploto in elektriko, nekaj elektrike pa izvažale v omrežje.



Slika 21.9 Soproizvodnja toplote in električne energije. Sistem daljinskega ogrevanja uporabi toploto, ki bi jo drugače pognali po hladilnem stolpu.

Zagotovo je zrno resnice v trditvi, da je Velika Britanija na področju daljinskega ogrevanja ter soproizvodnje toplote in električne energije precej zaostala, razpravo pa še otežujejo splošno pomanjkanje števil in dve konkretni napaki. Prvič, ko primerjamo različne načine rabe goriva, se uporablja napačno merilo »učinkovitosti«, ki elektriko meče v isti vrednostni koš s toploto. V resnici ima elektrika večjo vrednost. Drugič, običajno se domneva, da bi lahko »odpadno« toploto iz običajne elektrarne



Slika 21.10 Toplotni črpalke.

zajeli in jo koristno uporabili, *ne da bi s tem poslabšali proizvodnjo elektrike*. Kot bodo pokazale številke, to žal ne drži. Zagotavljanje uporabne toplote uporabniku vedno do neke mere zmanjša količino proizvedene elektrike. Resnični neto pribitek soproizvodnje je pogosto veliko manjši, kot bi sklepali po javnomnenjski evforiji.

Razumno razpravo o soproizvodnji ne nazadnje otežuje tudi nedavno rojeni mit, da tehnologija z decentralizacijo nekako postane okolju prijaznejša. Torej, če so velike centralizirane termoelektrarne »nekaj slabega«, je čreda lokalnih mikroelektrarn sama dobrota. A če bi bila decentralizacija zares dobra ideja, bi se moralo načelo »majhno je lepo« izražati v številkah. Metoda bi se morala obnesti sama zase. V resnici pa podatki kažejo, da ima *centralizirana* proizvodnja elektrike številne tako ekonomske kot energijske prednosti. Prednosti lokalne proizvodnje se pokažejo samo v velikih stavbah, in še tam so kvečjemu 10- ali 20-odstotne.

Britanska vlada si je zastavila cilj, da bo soproizvodnjo toplote in električne energije do leta 2010 povečala na 10 GW električne zmogljivosti, mislim pa, da bi bilo povečanje tovrstnih zmogljivosti na plin napaka. Takšna soproizvodnja ni okolju prijazna: zanjo potrebujemo fosilno gorivo in se ujamemo v njegovo nadaljnjo rabo. Glede na to, da so toplotne črpalke boljše tehnologija, raje preskočimo soproizvodnjo toplote in električne energije na plin in pojdemo naravnost k njim.

Toplotne črpalke

Kot daljinsko ogrevanje ter soproizvodnjo toplote in električne energije tudi toplotne črpalke že množično uporabljajo v celinski Evropi, v Veliki Britaniji pa za čuda ne veliko. Toplotne črpalke so kot vzratni hladilniki. Potipajte zadnjo steno hladilnika: *topla* je. Hladilnik prestavlja toploto z enega kraja (svoje notranjosti) na drugega (zadnjo steno). Stavbo torej

lahko ogrejemo tako, da obrnemo hladilnik od znotraj navzven – *notranjost* hladilnika postavimo na vrt in ga tako ohladimo, zadnjo steno pa pustimo v kuhinji in tako ogrejemo hišo. Čeprav to ni očitno, pa je ta prisluhnjena ideja v resnici zelo učinkovit način ogrevanja. Za vsak kilovat moči, ki jo zagotovi električno omrežje, lahko vzvratni hladilnik načrpa tri kilovate toplote z vrta, zato v vašo hišo pride skupaj za štiri kilovate toplote. Toplotne črpalke so približno štirikrat učinkovitejše od standardnih električnih grelnikov. Učinkovitost toplotne črpalke navadno izrazimo z grelnim številom COP – Coefficient of Performance. Če je grelno število (razmerje med grelno toploto in vloženo elektriko) standardnega grelnika 1, je grelno število toplotne črpalke 4.

Toplotne črpalke lahko sestavimo na različne načine (slika 21.10). S pomočjo prenosnika toplote (ki je običajno meter visoka bela škatla, slika 21.11) vam lahko na vrtu hladijo *zrak* in v tem primeru gre za toplotne črpalke *zrak/voda*. Lahko pa s pomočjo velikih pod zemljo napeljanih obročev (dolgi nekaj deset metrov) hladijo tudi *tla* in v tem primeru gre za toplotne črpalke *zemlja/voda*. Toploto lahko črpajo tudi iz rek in jezer.

Z nekaterimi toplotnimi črpalkami lahko toploto črpamo v obe smeri. Ko toplotna črpalka *zrak/voda* deluje vzvratno, porablja elektriko za ogrevanje *zunanjega* zraka in hlajenje zraka v *notranjosti* hiše. Temu pravimo hlajenje, če pa *zrak* ustrezno dodatno filtriramo in vlažimo (razvlažimo), potem temu pravimo klimatizacija. Številne klimatske naprave so v resnici sestavljene iz toplotne črpalke, in delujejo na prav tak način. Kot del klimatskih naprav lahko delujejo tudi toplotne črpalke *zemlja/voda*, torej lahko z enim kosom opreme poskrbimo tako za zimsko ogrevanje kot za poletno hlajenje.

Ljudje včasih rečejo, da toplotne črpalke *zemlja/voda* uporabljajo »geotermalno energijo«, vendar to ni pravi izraz. Kot smo videli v 16. poglavju, je geotermalna energija na večini koncev sveta kilav vir moči na enoto površine (približno 50 mW/m^2). Toplotne črpalke s tem curkljanjem nimajo nič in lahko jih uporabljamo tako za ogrevanje kot za hlajenje. Tla preprosto uporabijo kot kraj, od koder črpajo toploto ali kamor jo odlagajo. Kadar to počnejo stalno, toploto v resnici obnavlja sonce.

V tem poglavju nas čaka še dvoje. Napraviti moramo primerjavo toplotnih črpalk ter soproizvodnje toplote in električne energije. Potem pa moramo ugotoviti še, kakšne so omejitve toplotnih črpalk *zemlja/voda*.

Toplotne črpalke v primerjavi s soproizvodnjo toplote in električne energije

Včasih sem mislil, da s soproizvodnjo ne moremo ustreliti mimo. »Absolutno, uporabimo odvečno toploto iz elektrarn in z njo ogrevajmo stavbe, namesto da jo poženemo po hladilnem stolpu!« A ko sem se zatopil v podatke o zmogljivosti konkretnih sistemov SPTE, sem prišel do sklepa, da obstajajo boljši načini zagotavljanja električne energije in ogrevanja.

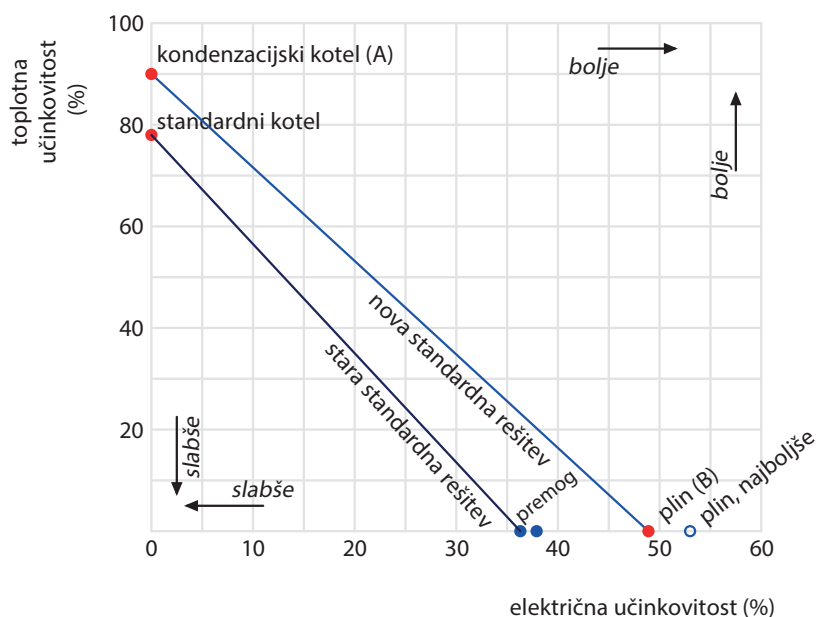


Slika 21.11 Notranji in zunanji del toplotne črpalke *zrak/zrak* z grelnim številom 4. Za merilo je ob notranjem delu kemični svinčnik. Takšen Fujitsujev sistem zagotavlja 3,6 kW grelni moči, potrebuje pa samo 0,845 kW električne moči. Deluje lahko tudi obratno, pri čemer zagotavlja 2,6 kW hladilne moči in potrebuje 0,655 kW električne.

Narisal bom diagram s tremi koraki, ki bo pokazal, koliko električne energije ali toplote lahko zagotovi kemična energija. Abscisna os pomeni električno učinkovitost, ordinatna pa toplotno.

Standardna rešitev brez SPTE

V prvem koraku imamo preproste elektrarne in ogrevalne sisteme, ki zagotavljajo izključno elektriko ali izključno toploto.

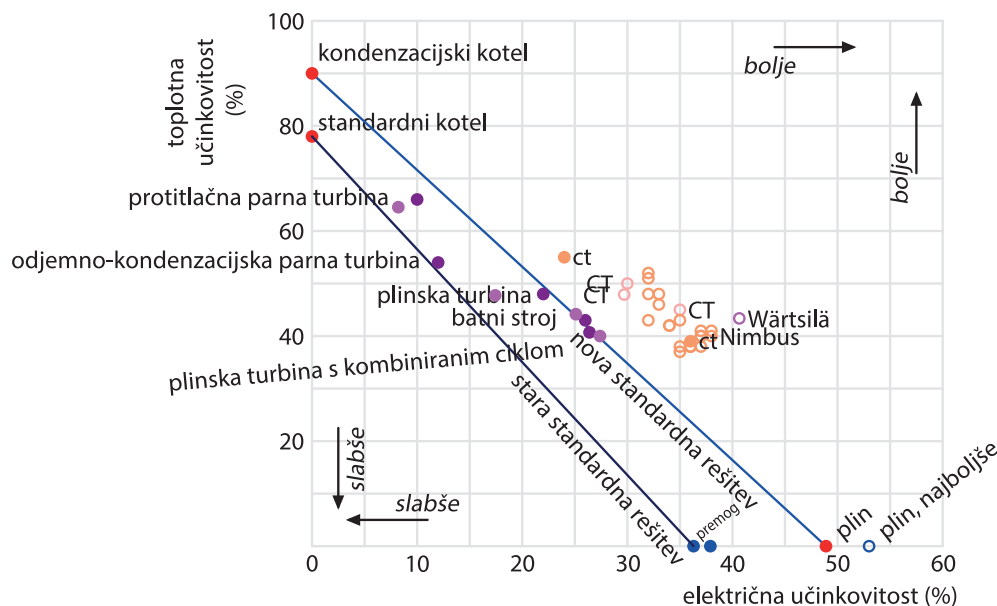


Kondenzacijski kotli (točka A zgoraj levo) imajo 90-odstotni toplotni izkoristek, saj se 10 % toplote izgubi v dimniku. Sedanje britanske plinske elektrarne (točka B spodaj desno) imajo pri spreminjanju kemične energije plina v elektriko 49-odstotni izkoristek. Kakršnokoli mešanico elektrike in toplote želite pridobiti iz zemeljskega plina, ga morate v ustreznem razmerju pokuriti v elektrarni in kotlu. Z novo standardno rešitvijo tako lahko s proizvodnjo elektrike in toplote s pomočjo dveh različnih kosov opreme pridemo do katerekoli vrednosti električne in toplotne učinkovitosti na daljici od A do B.

Za zgodovinsko primerjavo sta na diagramu tudi stara standardna rešitev za ogrevanje (običajni nekondenzacijski kotel z 79-odstotnim toplotnim izkoristkom) in standardni način proizvodnje elektrike izpred nekaj desetletij (termoelektrarna na premog s približno 37-odstotno električno učinkovitostjo).

Soproizvodnja toplote in električne energije

V naslednjem koraku na diagram dodamo sisteme za soproizvodnjo toplote in električne energije. Ti s pomočjo kemične energije sočasno zagotavljajo tako elektriko kot toploto.



Vse polne točke pomenijo dejanski povprečni rezultat delovanja sistemov SPTE v Veliki Britaniji, združenih v skupine glede na tip. Prazne točke, označene s »CT«, pomenijo zmogljivost idealnih sistemov SPTE, kot jo navaja Carbon Trust, prazne točke, označene z »Nimbus«, pomenijo specifikacije proizvoda, kot jih navaja proizvajalec. Točke, označene s »ct«, pomenijo dva konkretna sistema (v bolnišnici Freeman Hospital in Elizabeth House), ki ju navaja Carbon Trust.

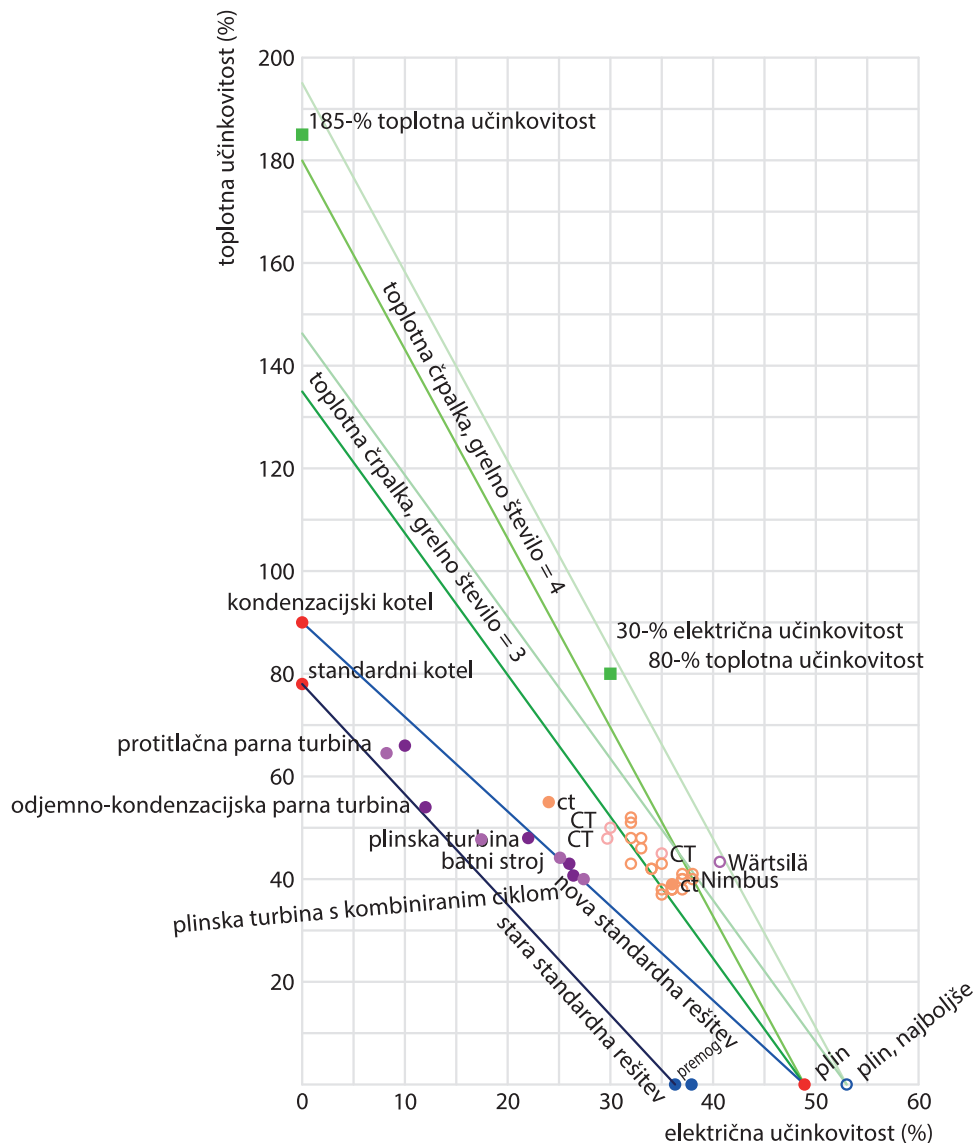
V diagramu najprej opazimo, da je električna učinkovitost sistemov SPTE bistveno manjša od 49-odstotnega izkoristka »enolinijske« plinske elektrarne, ki proizvaja samo elektriko. Toplota torej ni »brezplačen stranski produkt«. Povečevanje proizvodnje toplote škodi proizvodnji elektrike.

V praksi številki (učinkovitost proizvodnje elektrike in učinkovitost proizvodnje toplote) pogosto združijo v eno samo »skupno učinkovitost« – za SPTE s protitlačno parno turbino, ki zagotavlja 10 % elektrike in 66 % toplote, bi na primer rekli, da je »76-odstotno učinkovita«, ampak po mojem mnenju je takšno povzemanje zavajajoče. Konec koncev je po tej logiki 90-odstotno učinkovit kondenzacijski kotel »učinkovitejši« od katerega koli sistema SPTE! Dejstvo je, da ima električna energija večjo vrednost kot toplota.

Veliko sistemov SPTE na diagramu je boljših od »starega standardnega načina« (proizvodnje elektrike s pomočjo premoga in toplote v standardnih kotlih). Idealni sistemi so malenkost boljši od »novega standardnega načina« (proizvodnje elektrike s pomočjo plina in toplote v kondenzacijskih kotlih). Zavedati pa se moramo, da ta rahla premoč prinaša tudi pomanjkljivosti – sistem SPTE zagotavlja toploto samo za prostore, s katerimi je povezan, kondenzacijske kotle pa lahko namestimo kamorkoli, kjer je

plinski priključek. Poleg tega v primerjavi s standardnim načinom sistemi SPTE niso enako fleksibilni pri določanju mešanice elektrike in toplote, ki jo zagotavljajo. Najbolje delujejo pri nekem konkretnem razmerju, ta nefleksibilnost pa povzroča neučinkovitost takrat, ko se na primer proizvaja presežna toplota. V tipični hiši pride do večine potreb po elektriki v relativno kratkih konicah, ki nimajo veliko zveze s potrebo po toploti. Zadnja težava z nekaterimi sistemi mikrosoprodukcije pa je, da se utegnejo slabo odrezati pri oddajanju elektrike v omrežje, kadar se ustvari presežek.

Nazadnje dodajmo še toplotne črpalke, ki porabljajo elektriko iz omrežja za črpanje toplote zunanjega zraka v stavbo.



Strme zelene črte pomenijo kombinacije elektrike in toplote, ki jih lahko dobite ob predpostavki, da je grelna število toplotne črpalke 3 ali 4, da dodatno elektriko zanj proizvedemo v povprečni ali najboljši plinski

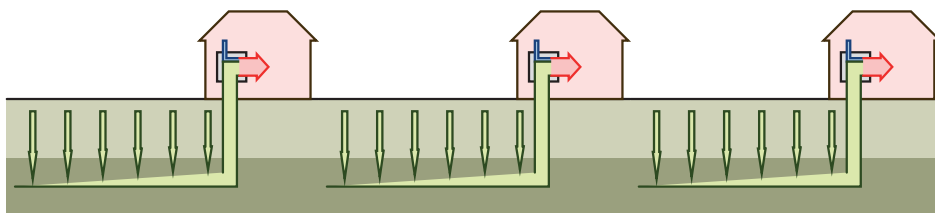
elektrarni in da dopustimo 8-odstotno izgubo v državnem elektroenergetskem omrežju med elektrarno in stavbo, kjer toplotna črpalka črpa toploto. Izkoristek najboljše plinske elektrarne je ob optimalnem delovanju 53 %. (Predstavljam si, da so Carbon Trust in Nimbus pri svojih podatkih za sisteme SPTE, ki jih navajamo v diagramu, uporabili podobne predpostavke.) Toplotne črpalke se bodo v primerjavi s temi podatki najverjetneje še izboljšale. Na Japonskem so po zaslugi odločne zakonodaje, ki daje prednost izboljšavam učinkovitosti, na voljo toplotne črpalke z grelnim številom 4,9.

Ste opazili, da toplotne črpalke lahko ponudijo sistem, ki je »več kot 100-odstotno učinkovit«? Najboljša plinska elektrarna, ki dovaja elektriko toplotni črpalki, lahko na primer zagotovi kombinacijo 30-odstotno učinkovite elektrike in 80-odstotno učinkovite toplote, kar pomeni 110-odstotno »skupno učinkovitost«. S tem se ne more kosati noben preprosti sistem SPTE.

Naj povem jasno in glasno. Toplotne črpalke so učinkovitejše od kondenzacijskih kotlov, tudi če jih napaja elektrika iz elektrarne na zemeljski plin. Če želite z zemeljskim plinom ogrevati več stavb, lahko namestite kondenzacijske kotle, ki so »90-odstotno učinkoviti«, ali isti plin pošljete v novo plinsko elektrarno in v vse stavbe namestite toplotne črpalke, ki jih napaja elektrika. Učinkovitost druge rešitve je med 140 in 185 %. Da nam toplotna črpalka prinaša koristi, nam po vrtu ni treba kopati velikih lukenj in nameščati talnega ogrevanja. Najboljše črpalke zrak/voda (za katere potrebujemo samo majhno zunanjo škatlo, podobno klimatski napravi) lahko dobavljajo toplo vodo v običajne radiatorje z grelnim številom več kot 3. Črpalka zrak/voda oziroma zrak/zrak na sliki 21.11 (str. 147) dovaja topel zrak neposredno v pisarno.

Zato sklepam, da soproizvodnja toplote in električne energije, kakorkoli obetavno zveni, najbrž ni najboljši način ogrevanja stavb in proizvodnje elektrike s pomočjo zemeljskega plina, kadar lahko v stavbe namestimo toplotne črpalke zrak/voda, zrak/zrak ali zemlja/voda. Treba pa je poudariti še druge prednosti rešitve s toplotnimi črpalkami: lahko jih namestimo v kakršno koli stavbo, v kateri je elektrika; lahko jih poganja kateri koli vir elektrike, zato delujejo naprej, tudi če zmanjka plina ali cena plina skokovito naraste; so pa tudi fleksibilne – lahko jih vklopljamo in izklopljamo glede na potrebe stanovalcev.

Poudarjam, da ta kritična primerjava ne pomeni, da je SPTE vedno slaba ideja. V resnici primerjam metode ogrevanja običajnih stavb, ki potrebujejo samo toploto zelo majhne vrednosti. S soproizvodnjo lahko industrijskim porabnikom zagotovimo tudi toploto večje vrednosti (na primer pri 200 °C). V takšnih industrijskih okoljih se toplotne črpalke najbrž ne bi tako dobro odrezale, saj bi imele bistveno manjše grelni število.



Slika 21.12 Kako gosto lahko namestimo toplotne črpalke zemlja/voda?

Omejitve rabe (toplotnih črpalk)

Ker se temperatura nekaj metrov pod zemljo lenobno vrti okrog 11 °C, naj bo poletje ali zima, toplotna črpalka teoretično lažje črpa toploto iz zemlje kot iz zraka, ki je pozimi lahko tudi za 10 ali 15 °C hladnejši od zemlje. Zato strokovnjaki, kadar je mogoče, priporočajo toplotno črpalke zemlja/voda. (Pri veliki temperaturni razliki med notranjostjo in zunanostjo so toplotne črpalke manj učinkovite.)

Toda zemlja ni neskončen vir toplote. Toplota mora od nekod priti in zemlja ni zelo dober toplotni prevodnik. Če toploto iz tal črpamo prehitro, se zemlja ohladi na temperaturo ledišča in prednost toplotne črpalke zemlja/zrak skopni.

V Veliki Britaniji bi bil glavni namen toplotnih črpalk spraviti toploto v stavbe pozimi. Odločilni vir te toplote je sonce, ki obnavlja toploto v zemlji z neposrednim sevanjem in prehodom toplote prek zraka. Pri hitrosti, s katero toploto črpamo iz zemlje, moramo upoštevati dve omejitvi: ne smemo povzročiti prevelikega padca temperature zemlje pozimi, toploto, ki jo pozimi načrpamo, pa je poleti treba nekako obnoviti. Če obstaja nevarnost, da *naravno* curljanje toplote poleti ne bo nadomestilo toplote, ki smo jo odvedli pozimi, je treba obnavljanje zagnati *aktivno* – na primer z vzvratnim delovanjem sistema poleti, pri čemer toploto odložimo v zemljo (in tako na drugem koncu hladimo).

Dodajmo v to razmišljanje nekaj števil. Koliko zemlje potrebuje toplotna črpalke zemlja/zrak? Vzemimo sosesko s precej veliko gostoto prebivalstva – recimo 6200 ljudi na km² (160 m² na osebo), kakršna je gostota tipičnega britanskega predmestja. Bi lahko *vsi* uporabljali toplotne črpalke zemlja/zrak, ne da bi potrebovali aktivno poletno obnavljanje toplote? Izračun v poglavju E (str. 303) odgovarja z neodločnim *ne*: če bi vsi v soseski iz zemlje črpali za 48 kWh/d toplote na prebivalca (moja ocena tipične porabe toplote pozimi), bi pozimi zamrznili zemljo. Če bi se hoteli izogniti nerazumno močnemu hlajenju zemlje, bi morali črpanje omejiti na največ 12 kWh/d na prebivalca. Če torej izvedemo prehod na toplotne črpalke zemlja/zrak, moramo k načrtu dodati precej obsežno odlaganje toplote poleti, da bomo zemljo napolnili s toploto za zimo. Pri tem bi lahko uporabili toploto, ki nastane kot kondezacijska toplota pri klimatizaciji ali v SSE za toplo vodo. (Poletno toploto sonca za uporabo

površina na prebivalca (m ²)	
Bangalore	37
Manhattan	39
Pariz	40
Chelsea	66
Tokio	72
Moskva	97
Tajpej	104
Haag	152
San Francisco	156
Singapur	156
Cambridge M	164
Sydney	174
Portsmouth	213

Tabela 21.13 Nekaj vrednosti mestnih površin na prebivalca.

pozimi v zemljo shranjujejo v solarni soseski Drake Landing v Kanadi [www.dlsc.ca].) V nasprotnem primeru bomo morali uporabiti tudi toplotne črpalke zrak/voda, tako pa bomo dobili vso potrebno toploto – če bomo le imeli elektriko za črpanje. V Veliki Britaniji temperatura ne pade daleč pod ledišče, zato so pomisleki o slabem zimskem delovanju toplotnih črpalk zrak/voda, ki bi morda veljali za Severno Ameriko in Skandinavijo, tu najverjetneje odveč.

Sklep: lahko zmanjšamo količino energije, ki jo porabimo za ogrevanje? Ja. Lahko hkrati prekinemo rabo fosilnih goriv? Ja. Najprej ne smemo pozabiti na najočitnejši rešitvi – na izolacijo stavbe in termostatske mahinacije –, potem pa moramo vse grelnike na fosilna goriva zamenjati z električnimi toplotnimi črpalkami. Tako bi potrebno količino energije zmanjšali na 25 % sedanje vrednosti. Jasno, s tem načrtom elektrifikacije bi potrebovali več elektrike. A tudi če bi dodatna elektrika prišla iz plinskih elektrarn, bi bil to še vedno veliko boljši način ogrevanja, kot ga imamo sedaj, ko plin preprosto sežgemo. Toplotne črpalke so pripravljene na prihodnost in omogočajo učinkovito ogrevanje stavb s pomočjo elektrike, ki prihaja iz katerega koli vira.

Nasprotniki ugovarjajo, da imajo toplotne črpalke zrak/voda kilavo grelni število – samo 2 ali 3. A njihovi podatki so zastareli. Če smo pazljivi in kupimo najboljšo toplotno črpalko, je rezultat veliko boljši. Japonska vlada je zasnovala desetletni program zakonskega spodbujanja učinkovitosti, s katerim se je močno povečala učinkovitost klimatskih naprav. Po zaslugi tega programa zdaj obstajajo toplotne črpalke zrak/voda z grelnim številom 4,9, in te lahko poleg ogrevanja zagotavljajo tudi toplo vodo.

Drugi očitke toplotnim črpalkam je: »Na to, da ljudje nameščajo učinkovite grelnike zrak/voda, pač ne moremo pristati, saj bi jih lahko poleti uporabili za klimatizacijo.« Lepo vas prosim – neupravičeno klimatizacijo sovražim toliko kot vsi, a te toplotne črpalke so štirikrat učinkovitejše od katerega koli načina zimskega ogrevanja! Pokažite mi boljši način. Lesni peleti? Hja, nekaj lesnih mrhovinarjev že lahko kuri les. Ampak tega ni dovolj, da bi to lahko počeli vsi. Les je za prebivalce gozda. Za vse druge so toplotne črpalke.



Opombe in dodatno branje

stran

142 *Izolacija podstrešja in izolacija v dvojnem zidu toplotne izgube tipične stare hiše zmanjšata za približno 25 %.* Eden in Bending (1985).

143 *Leta 1970 je bila povprečna zimska temperatura v britanskih hišah 13 °C!* Vir: Britansko ministrstvo za trgovino in industrijo (2002a, odstavek 3.11).

145 *Velika Britanija je na področju daljinskega ogrevanja ter sproizvodnje toplote in električne energije precej zaostala.* Z odpadno toploto iz britanskih elektrarn bi lahko izpolnili potrebe po ogrevanju vse države (Wood 1985). Na Danskem so leta 1985 s sistemom daljinskega ogrevanja zagotovili 42 % toplote za ogrevanje, ki so jo v topli vodi pod tlakom dobavljali 20 ali več km

daleč. V Zahodni Nemčiji je leta 1985 iz sistema daljinskega ogrevanja 4 milijone bivališč prejelo po 7 kW na enoto. Dve tretjini te toplote so zagotovile elektrarne. V Vasterasu na Švedskem so leta 1985 kar 98 % toplote proizvajale elektrarne.

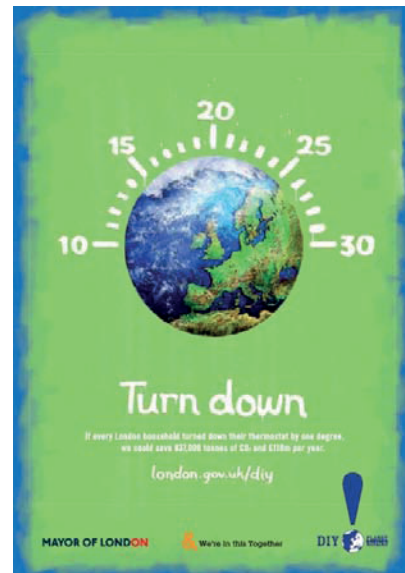
- 147 *Toplotne črpalke so približno štirikrat učinkovitejše od standardnih električnih grelnikov.* Glejte. www.gshp.org.uk.

V Veliki Britaniji že prodajajo toplotne črpalke, pri katerih je grelna število večje od 4,0 [yok2nw]. Vlada pravzaprav subvencionira toplotne črpalke voda/voda, a le takšne, pri katerih je grelna število večje od 4,4 [2dtx8z]. Na trgu so takšne črpalke zemlja/voda, pri katerih je hladilno število 5,4 za hlajenje in grelna število 4,9 [2fd8ar].

- 153 *Toplotne črpalke zrak/voda z grelnim številom 4,9.* Po podatkih HPTCJ (2007) so toplotne črpalke z grelnim številom 6,6 na Japonskem na voljo od leta 2006. Grelna število je tam po zaslugi vladnih uredb v desetih letih zraslo s 3 na 6. Pri HPTCH (2007) opisujejo grelnik za vodo s toplotno črpalko zrak/voda, ki se imenuje Eco Cute in ima grelna število 4,9. Na trgu so ga predstavili leta 2001. www.ecosystem-japan.com

Dodatna literatura o toplotnih črpalkah: European Heat Pump Network

ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/,
www.kensaengineering.com,
www.heatking.co.uk,
www.iceenergy.co.uk.



Slika 21.14 Oglas iz kampanje londonskega župana »DIY planet repairs« (Sam svoj mojster za planet, op. p.) iz leta 2007. Besedilo se glasi: »**Zmanjšaj.** Če bi v vseh londonskih gospodinjstvih vrednost na termostatu zmanjšali za eno stopinjo, bi prihranili 837.000 ton CO₂ in 110 milijonov funtov na leto.« [london.gov.uk/diy/] V prihrankih na prebivalca to pomeni 0,12 t CO₂ na leto na prebivalca. To je približno odstotek skupne vrednosti za enega človeka (11 t), zato je to dober nasvet. Bravo, Ken!

22 Učinkovita raba elektrike

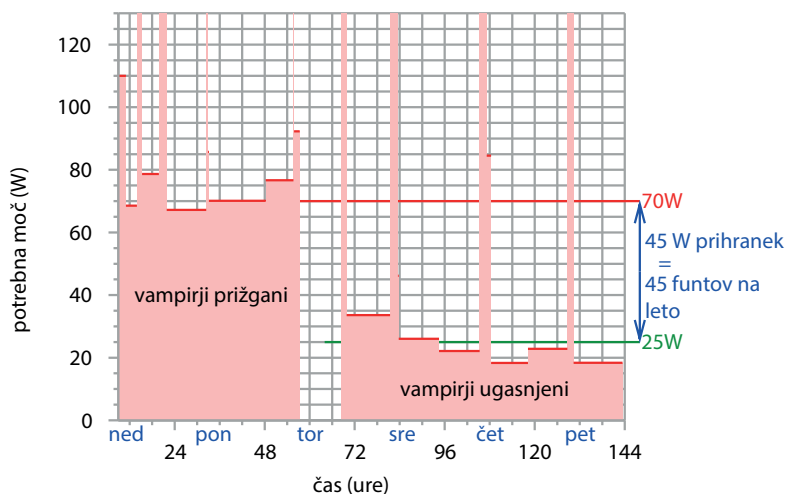
Lahko zmanjšamo porabo elektrike? Ja, preprost način, da kaj spremeni-mo, je ugašanje naprav, kadar jih ne uporabljamo. Elektriko bomo prihra-nili tudi z varčnimi sijalkami.

Zabavno elektroniko smo preučili že v 11. poglavju. Nekatere naprave so zanemarljive, spet druge pa kar neverjetno požrešne. Laserski tiskalnik, ki brezdelno ždi v moji pisarni, žre 17 W, kar je skoraj 0,5 kWh na dan! Neki prijatelj je v Ikei kupil svetilko. Njen obupni napajalnik (slika 22.1) rabi 10 W (0,25 kWh na dan) ne glede na to, ali svetilka gori. Če dodate še nekaj glasbenih stolpov, DVD-predvajalnikov, kabelskih modemov in brezžičnih naprav, se utegne izkazati, da lahko zmanjšate svojo domačo porabo elektrike za polovico.

Po podatkih Mednarodne agencije za energijo potrebna moč za na-prave v stanju pripravljenosti predstavlja približno 8 % osebnih potreb po elektriki. V Veliki Britaniji in Franciji je povprečna moč za stanje pripravljenosti približno 0,75 kWh/d na gospodinjstvo. Težava ni v stanju pripravljenosti kot takem, pač pa v njegovi kilavi izvedbi. Povsem mogoče je izdelati sisteme, ki v stanju pripravljenosti potrebujejo manj kot 0,01 W, a proizvajalci raje prihranijo nekaj fičnikov pri proizvodnih stroških in po-trošniku nakopljejo pošten letni strošek.



Slika 22.1 Obupni Ikein napajalnik za svetilko. Potrebuje skoraj 10 W, tudi ko je svetilka ugasnjena!



Slika 22.2 Učinkovitost na obzorju. Meril sem, koliko elektrike prihranim z ugašanjem vampirjev med tednom, ko sem večino dneva v službi in tako z izjemo hladilnika ne podnevi ne ponoči skoraj ni bilo koristnega delovanja. Kratke skokce potrebne moči povzročajo mikrovalovna pečica, opekač, pralni stroj ali sesalnik. V torek sem ugasnil večino vampirjev: dva glasbena stolpa, DVD-predvajalnik, kabelski modem, brezžični usmerjevalnik in telefonski odzivnik. Rdeča črta predstavlja trend porabe »v prazni hiši« pred spremembo, zelena pa po spremembi. Poraba se je zmanjšala za 45 W oz. 1,1 kWh na dan.

Poskus z zatiranjem vampirjev

Slika 22.2 ponazarja moj domači poskus. Najprej sem dva dni meril porabo, ko me ni bilo doma ali sem spal. Potem sem ugasnil vse naprave, ki sem jih običajno pušчал prižgane, in spet tri dni meril. Ugotovil sem, da sem na razliki moči prihranil 45 W, kar je vredno 45 funtov na leto, če elektrika stane 11 penijev na enoto.

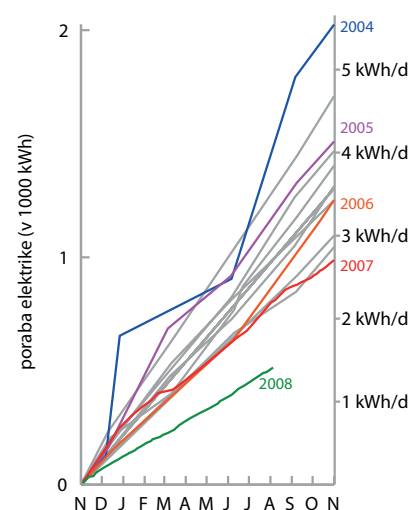
Odkar sem začel spremljati števec, se je moja skupna poraba elektrike prepolovila (slika 22.3). Varčevanje je postalo dokončna stalnica, ko sem se privadil odčitavati števec vsak teden, da preverim, ali sem res zatrl vampirje, ki pijejo elektriko. Če bi ta čarobni trik ponovili v vseh domovih in na vseh delovnih mestih, bi seveda prišli do precejšnjih prihrankov. V Cambridgeu zdaj tako pripravljamo spletno stran ReadYourMeter.org, s katero želimo doseči, da bo redno odčitavanje števcov zabavno in poučno. Ljudem hočemo pomagati, da izvedejo podoben poskus kot jaz, da razumejo številke, do katerih bodo prišli, in da jih prijetno zaščemi ob tem, ko bodo porabili manj.

Upam, da bo navada odčitavanja števcov prispevala k spremembam. Sem pa v karikirani Britaniji leta 2050 predvidel, da bo vse tovrstne prihranke elektrike izničil čudež rasti. Rast je eno od načel naše družbe: ljudje bodo bogatejši in se bodo tako lahko igrali z več napravami. Povpraševanje po računalniških igricalah čedalje večjih presežnikov povečuje porabo računalnikov. Če so računalniki zadnjega desetletja včasih veljali za precej spodobne, danes štejejo za neuporabne in jih je treba zamenjati s hitrejšimi, novejšimi stroji.

Opombe in dodatno branje

stran

155 *Potrebna moč za naprave v stanju pripravljenosti predstavlja približno 8 % osebnih potreb po elektriki.* Vir: International Energy Agency (2001). Dodatna literatura o strategijah na področju moči v stanju pripravljenosti: www.iea.org/textbase/subjectqueries/standby.asp.



Slika 22. 3 Moja letna kumulativna domača poraba elektrike v kWh med letoma 1993 in 2008. Sive črte pomenijo leta od 1993 do 2003. (Za boljšo preglednost teh nisem označil z ustreznimi letnicami.) Obarvane črte pomenijo leta od 2004 dalje. Skala na desni prikazuje povprečno rabo energije na dan (v kWh na dan). Vampirski poskus sem izvedel 2. oktobra 2007. S kombinacijo zatiranja vampirjev in namestitve varčnih sijalk sem porabo zmanjšal s 4 kWh/d na 2 kWh/d.

23 Trajnostna fosilna goriva?

Neizbežno dejstvo je, da bodo fosilna goriva še desetletja predstavljala pomemben del mešanice energentov.

Tiskovni predstavnik britanske vlade, april 2008

Naši sedanji pogoji veselega napredka imajo omejen rok trajanja.

William Stanley Jevons, 1865

V prejšnjih treh poglavjih smo preučevali glavne tehnologije in spremembe načina življenja, s katerimi bi zmanjšali porabo. Ugotovili smo, da bi lahko s preходом na električna vozila prepolovili porabo v prometu (in ga defosilizirali). Ugotovili smo tudi, da bi lahko z boljšo izolacijo vseh stavb in rabo električnih toplotnih črpalk namesto fosilnih goriv še dodatno zmanjšali porabo pri ogrevanju (in ga defosilizirali). Ja, porabo potemtakem lahko zmanjšamo. Kljub vsemu pa se zdi precejšen izziv, kako tej sicer zmanjšani porabi zadostiti z lastnimi britanskimi obnovljivimi viri (slika 18.7, str. 109). Čas je, da se pogovorimo o neobnovljivih načinih proizvodnje.

Vzemimo znane zaloge fosilnih goriv, pri čemer gre večinoma za premog: 1600 Gt premoga. Porazdelimo jih med šest milijard ljudi in jih »trajnostno« pokurimo. O čem govorimo, kadar govorimo o »trajnostni« rabi končnega vira? Uporabil bom poljubno definicijo: hitrost kurjenja je »trajnostna«, če bi viri zadostovali za **1000 let**. S tono premoga proizvedemo 8000 kWh kemične energije, zato bi s 1600 Gt premoga, porazdeljenega med 6 milijard ljudi in 1000 let, dobili **6 kWh na dan na prebivalca**. Standardna elektrarna na premog bi to kemično energijo spremenila v elektriko s približno 37-odstotnim izkoristkom, kar pomeni približno **2,2 kWh(e) na dan na prebivalca**. A če nam je mar za podnebje, najbrž ne bi uporabili standardne elektrarne. Odločili bi se za »čisti premog«, ki mu pravimo tudi »premog z zajemanjem in shranjevanjem ogljika« –, v praksi še skoraj nepriznana tehnologija, s katero iz izpušnih plinov v dimniku posrkamo večino ogljikovega dioksida in ga strpamo v luknjo v tleh. Tovrstno čiščenje izpustov elektrarne je povezano s precejšnjim energijskim stroškom – količino pridobljene električne energije bi namreč zmanjšalo za približno 25 %. S »trajnostno« rabo znanih zalog premoga bi tako zagotovili samo kakšnih **1,6 kWh(e) na dan na prebivalca**.

Primerjajmo »trajnostno« kurjenje premoga – 1,6 Gt na leto – s sedanjo globalno ravno porabo premoga: 6,3 Gt na leto, pri čemer količina narašča.

Kaj pa samo Velika Britanija? Imeli naj bi še 7 Gt premoga. Dobro, če jih porazdelimo med 60 milijonov ljudi, dobimo 100 ton na prebivalca. Pri 1000-letni rešitvi to pomeni **2,5 kWh na dan na prebivalca**. V elektrarni, ki zajema in shranjuje ogljik, bi s tem trajnostnim pristopom k britanskemu premogu dobili **0,7 kWh(e) na dan na prebivalca**.



Slika 23.1 Dostava premoga v elektrarno Kingsnorth (zmogljivost 1940 MW) leta 2005.
Foto: Ian Boyle, www.simplonpc.co.uk.

Premog: 6 kWh/d

Slika 23.2 »Trajnostna fosilna goriva«.

Naš sklep je jasen:

Čisti premog je samo začasna rešitev.

Če v resnici razvijemo tehnologijo »čistega premoga«, da bi s tem zmanjšali izpuste toplogrednih plinov, moramo med trepljanjem po ramenih paziti, da bomo pri bilancah pošteni. V procesu kurjenja premoga se toplogredni plini ne sproščajo samo v elektrarni, temveč tudi v premogovniku. Pri pridobivanju premoga se običajno sproščajo metan, ogljikov monoksid in ogljikov dioksid, in sicer tako neposredno iz izpostavljenih premogovnih plasti kot tudi pozneje iz odpadlih skrilavcev in muljevca. Ti premogovski izpusti odtis toplogrednih plinov običajne elektrarne na premog napihnejo za približno 2 %, zato bi utegnili vplivati tudi na bilanco elektrarne na »čisti« premog. Podoben bilančni problem je z zemeljskim plinom: če ga na poti iz luknje v tleh do elektrarne uide 5 %, je to naključno onesnaževanje z metanom ekvivalentno (v učinku tople grede) 40-odstotnemu povečanju izpustov ogljikovega dioksida v elektrarni.

Nove tehnologije premoga

Podjetje directcarbon.com iz Stanforda razvija tehnologijo gorivne celice na ogljik *Direct Carbon Fuel Cell*, ki gorivo in zrak spreminja neposredno v elektriko in CO₂, ne da bi pri tem potrebovali vodo ali parne turbine. Trdijo, da je tak način proizvodnje elektrike s pomočjo premoga dvakrat učinkovitejši od standardne elektrarne.

Kdaj bo konec običajne prakse?

Ekonomist Jevons je leta 1865 napravil preprost izračun. Potekala je razprava o tem, kdaj bo zmanjkalo britanskega premoga. Običajno so ljudje odgovorili tako, da so ocenjene zaloge delili s hitrostjo porabe, in rezultat je bil na primer »1000 let«. Toda poraba ni konstantna, je rekel Jevons. Na 20 let se podvoji in ob »napredku« se bo še naprej. Z »deljenjem zalog s hitrostjo rabe« tako pridemo do napačnega odgovora.

Jevons je zato ekstrapoliral eksponentno rastočo porabo in izračunal, v kolikšnem času bi skupna porabljena količina premoga presegla ocenjene zaloge. Dobil je precej manjšo vrednost. Jevons ni predpostavil, da bo poraba v resnici naraščala z enako hitrostjo, temveč je hotel povedati, da rast ni trajnostna. Z izračunom je za svoje britanske bralce ocenil neizbežne meje njihove rasti in kratko obdobje, ki jim je še na voljo, preden meje postanejo očitne. Jevons je drzno napovedal, da se bo konec britanskega »napredka« začel v 100 letih od leta 1865. Imel je prav. Britanska proizvodnja premoga je dosegla vrh leta 1910, leta 1965 pa Velika Britanija že ni bila več svetovna velesila.



Slika 23.3 Gosenica med pašo na starem listju.
Foto: Peter Gunn.

Ponovimo njegov izračun za ves svet. Leta 2006 smo porabili 6,3 Gt premoga na leto. Če vrednost postavimo ob bok 1600 Gt premogovnih zalog, ljudje pogosto rečejo, da imamo še »za 250 let premoga«. A če predpostavimo, da »običajna praksa« pomeni rast porabe, dobimo drugačen rezultat. Če bi se poraba premoga še naprej povečevala za 2 % na leto (kar se približno ujema s podatki za obdobje 1930–2000), bi premoga zmanjkalo leta 2096. Če bi se povečevala za 3,4 % na leto (rast v zadnjem desetletju), bi bil konec običajne prakse pred letom 2072. To ne pomeni 250 let, temveč 60!

Če bi Jevons še živel, bi prav gotovo odločno napovedal, da bo do leta 2050 ali 2060 konec naših razmer veselega napredka, če se ne preusmerimo na pot, ki bo drugačna od običajne prakse.



Opombe in dodatno branje

stran

- 157 *1000 let – poljubna definicija »trajnosti«*. Precedens za takšno izbiro so ustvarili Hansen in sod. (2007), ki »več kot 500 let« enačijo z »večno«.
- *Ekvivalent 1 tone premoga = 29,3 GJ = 8000 kWh* kemične energije. Številka ne vključuje rabe energije pri pridobivanju premoga, transporta in shranjevanja ogljika.
 - *Zajem in shranjevanje ogljika*. Obstaja več različnih tehnologij zajema in shranjevanja ogljika. Ena od njih je črpanje CO₂ iz izpušnih plinov, pri drugih uplinimo premog in CO₂ ločimo pred izgorevanjem. Glejte Metz in sod. (2005). Prvi prototip elektrarne na premog s to tehnologijo je 9. septembra 2008 zagnalo švedsko podjetje Vattenfall [5kpjk8].
 - *Britanski premog*. Decembra 2005 so zaloge in vire v obstoječih premogovnikih ocenili na 350 milijonov ton. Novembra 2005 so potencialne zaloge površinskega premoga ocenili na 620 milijonov ton, potencial podzemnega uplinjanja premoga pa na najmanj 7 milijard ton [yebuk8].
- 158 *Pri pridobivanju premoga se običajno sproščajo toplogredni plini*. Več podatkov o sproščanju metana pri pridobivanju premoga: www.epa.gov/cmop/, Jackson in Kershaw (1996), Thakur in sod. (1996). Svetovni izpusti metana pri pridobivanju premoga so približno 400 MtCO₂e na leto, kar ustreza približno 2 odstotkoma izpustov toplogrednih plinov, ki nastanejo pri kurjenju premoga.

Povprečna vsebnost metana v britanskih premogovnih plasteh je $4,7 \text{ m}^3$ na tono premoga (Jackson in Kershaw 1996), globalni potencialni učinek segrevanja tega metana pa je ob sprostitvi v ozračje enak 5 % potenciala CO_2 , ki nastane pri kurjenju premoga.

158 Če uide 5 % zemeljskega plina, je to ekvivalentno 40-odstotnemu povečanju izpustov ogljikovega dioksida. Učinek segrevanja naključnega onesnaževanja z metanom je skoraj osemkrat večji od učinka onesnaževanja s CO_2 , do katerega bi prišlo s kurjenjem tega metana. Osemkrat, ne standardnih »23-krat« – 23 je namreč segrevalno razmerje pri enakih *masah* metana in CO_2 . Vsaka tona CH_4 se spremeni v 2,75 tone CO_2 če jo pokurimo; če uide, pa je ekvivalentna 23 tonam CO_2 . $23/2,75$ pa je 8,4.

Dodatna literatura: World Energy Council [yhxf8b]

Dodatna literatura o podzemnem uplinjanju premoga: [e2m9n]

24 Jedrska energija?

Jedrsko energijo po krivici mečemo v isti koš z atomskim orožjem, kot da bi bilo vse, kar je jedrskega, zlo. Mislim, da je to enako velika krivica, kot če bi v isti koš z atomskim orožjem metali nuklearno medicino.

Patrick Moore,
nekdanji direktor Greenpeace International

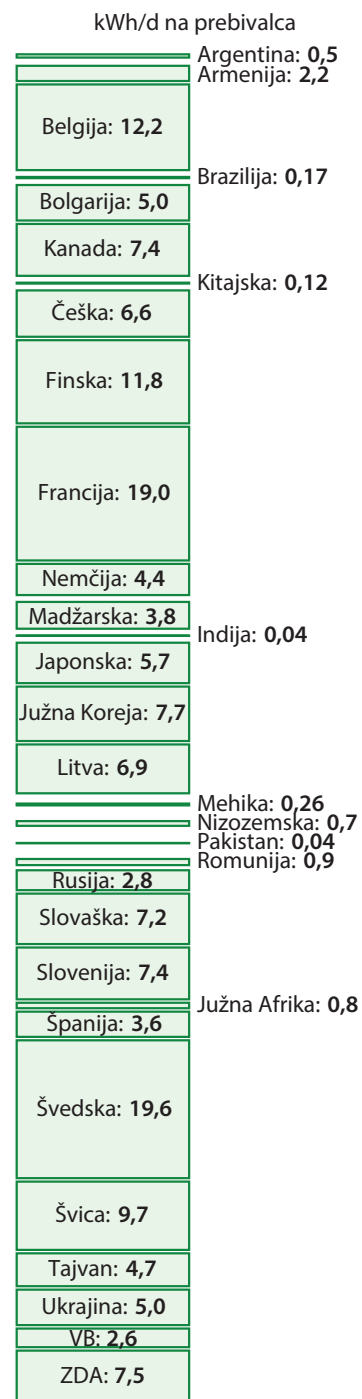
Jedrska energija je na voljo v dveh okusih. Jedrska *cepitev* ali fisija je okus, ki ga v elektrarnah že znamo uporabljati, pri čemer se kot gorivo uporablja uran, ki je izjemno težka kovina. Jedrsko *zlitje* ali fuzija pa je okus, ki ga v elektrarnah še ne znamo uporabiti, kot gorivo pa bi uporabljali lahke elemente, predvsem vodik. Pri fisijskih reakcijah se težka jedra cepijo na srednje težka jedra in pri tem se sprošča energija. Pri fuzijskih pa se lahka jedra zlivajo v srednje težka jedra in pri tem se sprošča energija.

Obe obliki proizvodnje električne energije, cepitev in zlitje, imata pomembno lastnost: potencialne jedrske energije na atom je približno milijonkrat več, kot je pri tipičnih gorivih kemične energije na atom. To pomeni, da je količina goriva in odpadkov, s katerimi moramo imeti opravka v jedrskem reaktorju, lahko do milijonkrat manjša od količine goriva in odpadkov v ekvivalentni elektrarni na fosilna goriva.

Prevedimo te misli na razumljivo raven. »Povprečni Britanec« porabi približno 16 kg fosilnih goriv na dan (4 kg premoga, 4 kg nafte in 8 kg plina). To pomeni, da za vas vsak ljubi dan iz luknje v tleh načrpajo, prepeljejo, predelajo in nekje pokurijo približno toliko fosilnih goriv, kot tehta 16 tetrapakov mleka. Povprečni Britanec s svojo rabo fosilnih goriv ustvari 11 ton odpadnega ogljikovega dioksida na leto ali 30 kg na dan. V prejšnjem poglavju smo omenili idejo, da bi odpadni ogljikov dioksid zajemali, ga stisnili v trdno ali tekoče stanje in ga odpeljali na neko odlagališče. Zamislite si, da bi človek sam moral zajeti svoj ogljični odpadki in poskrbeti zanj. Za 30 kg ogljikovega dioksida na dan potrebuješ konkreten nahrbtnik – zamislite si 30 tetrapakov mleka!

Za isto količino energije, kot je ima 16 kg fosilnih goriv, v standardnem fisijskem reaktorju potrebujemo 2 grama naravnega urana, odpadek pri tem pa tehta četrtno grama. (Mimogrede, 2 g urana je več kot milijoninka mase 16 kg na dan, saj obstoječi reaktorji pokurijo manj kot 1 % urana.) Za 2 grama urana na dan bi morali rudarji v rudniku urana izkopati vsak dan kakšnih 200 g rude.

Tokovi materiala v jedrske reaktorje in iz njih so torej majhni, če jih primerjamo s tokovi fosilnih goriv. »Majhno je lepo«, a to, da je tok jedrskih odpadkov majhen, še ne pomeni, da ne povzroča težav, je pa lepo, kako majhne so.



Slika 24.1 Proizvodnja električne energije s pomočjo jedrske cepitve v kWh na dan na prebivalca v državah z jedrsko energijo leta 2007.

»Trajnostna« energija jedrske cepitve

Na sliki 24.1. vidimo, koliko električne energije so proizvedle jedrske elektrarne v različnih državah leta 2007.

Je jedrska energija lahko »trajnostna«? Če za hip pustimo standardna vprašanja o varnosti in odpadkih ob strani, je ključno vprašanje to, ali bi lahko človeštvo dolgo živelo na račun jedrske cepitve. Kako velike so svetovne zaloge urana in drugih cepljivih goriv? Nam je urana ostalo samo še za nekaj desetletij ali ga imamo dovolj za več tisočletij?

Da bi ocenil, koliko »trajnostne moči« zagotavlja uran, sem vzel podatke o skupnih dostopnih zalogah urana v zemlji in morski vodi, jih pravično porazdelil med 6 milijard ljudi in se vprašal, kako hitro jih lahko porabljamo, če morajo zadostovati za 1000 let.

Skoraj ves dostopen uran je v oceanih, ne v zemlji: morska voda vsebuje 3,3 mg urana na m³ vode, kar v svetovnem merilu pomeni 4,5 milijarde ton. Uran v oceanih sem razglasil za »dostopnega«, čeprav je to nekoliko nenatančno – večina oceanskih voda je precej nedostopnih in pri svojem kroženju za en krog potrebujejo kakšnih 1000 let, poleg tega pa še nihče ni izvedel masovnega pridobivanja urana iz morske vode. Zato bomo napravili ločeni oceni za dva različna primera: v prvem bomo uporabili samo rudniški uran, v drugem pa tudi oceanskega.

Uranove rude v zemlji, ki jo lahko izkopljemo po ceni, ki je manjša od 130 USD na kg urana, je približno za tisočinko vseh zalog. Če bi cena narasla nad 130 USD za kg, bi se izplačalo kopati tudi fosfatne rude, v katerih je uran v majhnih koncentracijah. Uran je povsem mogoče pridobivati iz fosfatnih rud; v Ameriki in Belgiji so to počeli do leta 1998. Za oceno urana v zemlji bom seštel konvencionalno uranovo rudo in fosfate, s čimer dobim skupne zaloge v višini 27 milijonov ton urana (tabela 24.2).

Obravnavali bomo dva načina uporabe urana v reaktorju: (a) pri zelo pogosti *metodi odprtega gorivnega cikla* energijo pridobivajo večinoma iz ²³⁵U (ki predstavlja samo 0,7 % urana), preostali ²³⁸U pa zavržejo; (b) v *hitrih oplodnih reaktorjih*, katerih izgradnja je dražja, pa ²³⁸U spreminjajo v cepljivi plutonij-239, pri čemer iz urana dobijo približno 60-krat več energije.

Reaktorji z odprtim gorivnim ciklom in uran iz zemlje

Ena gigavatna jedrska elektrarna z odprtim gorivnim ciklom porabi **162 ton urana na leto**. Znale dostopne zaloge urana v zemlji, porazdeljene med 6 milijard ljudi, bi zadostovale za 1000 let, če bi jedrske elektrarne zagotavljale **0,55 kWh na dan na prebivalca**. Za takšno trajnostno hitrost proizvodnje bi lahko imeli samo 136 jedrskih elektrarn, količina pa predstavlja polovico današnje jedrske proizvodnje. Zelo verjetno je potencial urana podcenjen, saj ga še ne primanjkuje, zato tudi ni spodbud za raziskovanje in jih je bilo od 80. let prejšnjega stoletja v resnici zelo

	v milijonih ton urana
Avstralija	1,14
Kazahstan	0,82
Kanada	0,44
ZDA	0,34
Južna Afrika	0,34
Namibija	0,28
Brazilijska	0,28
Ruska federacija	0,17
Uzbekistan	0,12
svet skupaj (konvencionalne zaloge v zemlji)	4,7
fosfatna nahajališča	22
morska voda	4 500

Tabela 24.2 Znale dostopne zaloge urana. Zgornji del tabele zajema »z razumno verjetnostjo zagotovljene zaloge« in »privzete zaloge«, pri katerih je strošek manjši od 130 USD na kg urana po 1. januarju 2005. Gre za ocenjene zaloge na območjih, kjer so potekale raziskave. Ob tem je še 1,3 milijona ton osiromašenega urana, ki je stranski produkt preteklih z uranom povezanih aktivnosti.



Slika 24.3 Delavca potiskata gorivo v grafitni reaktor X-10.

malo. Torej bodo morda v zemlji odkrili nove zaloge urana. V nekem članku, objavljenem leta 1980, so ocenili, da je zalog uranove rude z nizko koncentracijo urana več kot 1000-krat več od naše predpostavke 27 milijonov ton.

Bi bila lahko naša sedanja raba izkopanega urana v odprtem gorivnem ciklu trajnostna? Ob takšni nejasnosti glede potencialnih novih virov v prihodnosti je težko reči. Ob sedANJI hitrosti rabe bi tovrstni reaktorji lahko obratovali še nekaj sto let. Če bi hoteli jedrsko proizvodnjo v svetovnem merilu povečati 40-krat, da bi lahko prekinili rabo fosilnih goriv in omogočili dvig življenjskega standarda, pa nas že lahko zaskrbi, da ti reaktorji niso trajnostna tehnologija.

Hitri oplodni reaktorji in uran iz zemlje

Uran lahko 60-krat učinkoviteje uporabljamo v hitrih oplodnih reaktorjih, ki pokurijo vsega – tako ^{238}U kot ^{235}U (v primerjavi z reaktorji z odprtim gorivnim ciklom, ki večinoma pokurijo ^{235}U). Rabljenega goriva, ki ga izpljunejo reaktorji z odprtim gorivnim ciklom, ni treba zavreči, pač pa lahko uporabimo tudi osiromašeni uran, ki tako ne gre v nič. Če bi ves uran v zemlji (in še zaloge osiromašenega urana) uporabili v 60-krat učinkovitejših hitrih oplodnih reaktorjih, bi zagotovili moč **33 kWh na dan na prebivalca**. Mnenja o tovrstnih reaktorjih segajo od »to je nevarna in propadla eksperimentalna tehnologija, o kateri se ne bi smelo govoriti,« do »oplodne reaktorje bi lahko nemudoma začeli graditi in bi jih tudi morali«. Nisem dovolj poučen, da bi komentiral nevarnost oplodne tehnologije, in nočem mešati etičnih in faktičnih izjav. Rad bi samo pomagal razumeti številke. Edina etična pozicija, ki jo želim podpreti, je: naredimo načrt, ki se izide.

Reaktorji z odprtim gorivnim ciklom in uran iz oceanov

Če bi izčrpali ves uran iz oceanov in ga uporabili v reaktorjih z odprtim gorivnim ciklom, bi bila njegova skupna energija naslednja

$$\frac{4,5 \text{ milijarde ton na planet}}{162 \text{ ton urana na GW-leto}} = 28 \text{ milijonov GW-let na planet.}$$

Kako hitro bi lahko pridobivali uran iz oceanov? Oceani krožijo počasi: polovica vode je v Pacifiškem oceanu in oceansko kroženje prinese globoke pacifiške vode na površje le vsakih 1600 let. Zamislimo si, da v enem 1600-letnem obdobju načrpamo 10 % urana. Hitrost pridobivanja je tako 280.000 ton na leto. V reaktorjih z odprtim gorivnim ciklom bi to pomenilo pridobljeno moč

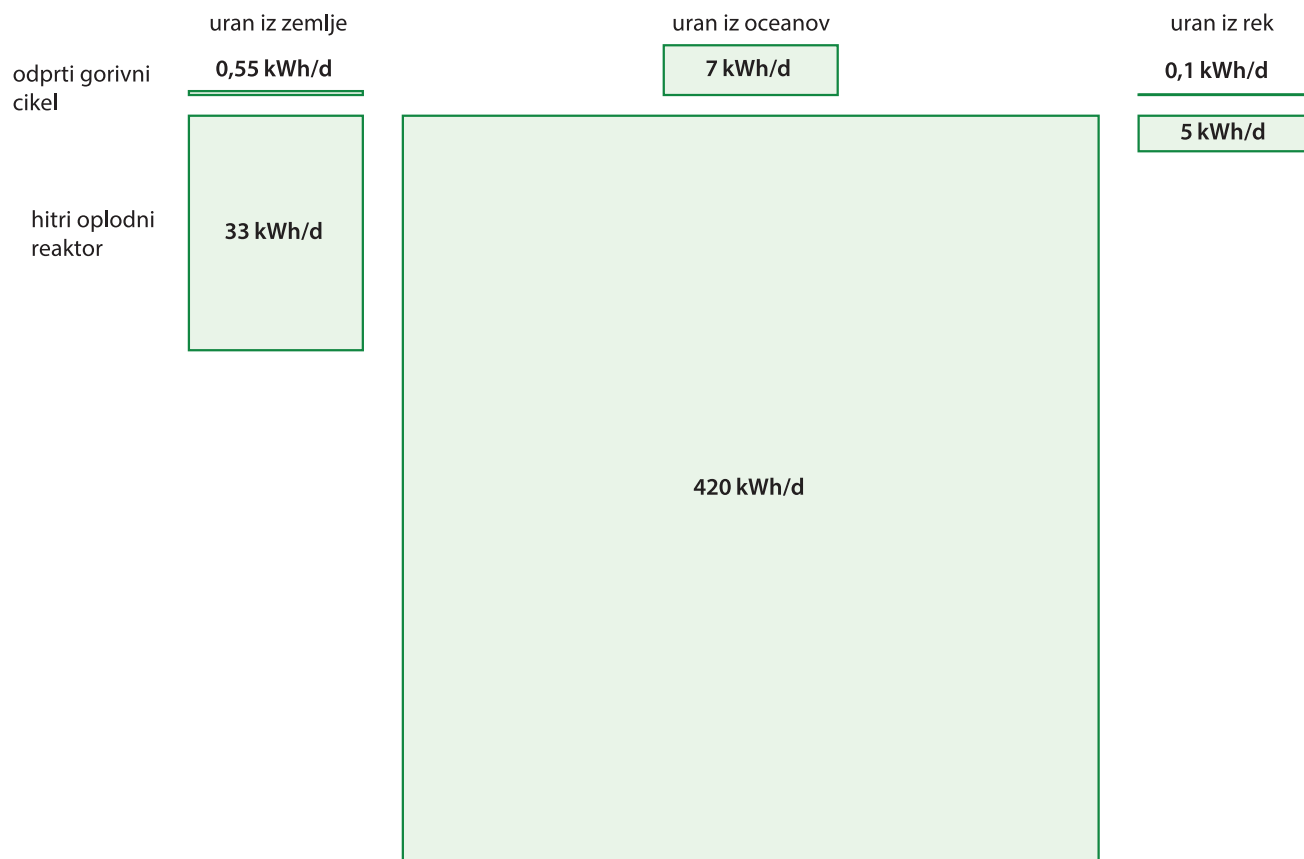
$$2,8 \text{ milijona GW-let} / 1600 \text{ let} = 1750 \text{ GW,}$$



Slika 24.4 Jedrska elektrarna Three Mile Island.



Slika 24.5 Ustanova za razvoj jedrske energije Dounreay, katere glavni namen je bil razvoj tehnologije hitrega oplodnega reaktorja. Foto: John Mullen.



če jo porazdelimo med 6 milijard ljudi, pa dobimo **7 kWh na dan na prebivalca**. (Skupna zmogljivost obstoječih reaktorjev je 369 GW, zato bi to pomenilo štirikratno povečanje jedrskih zmogljivosti glede na sedanjo raven.) Moj sklep je, da bi pridobivanje urana iz oceanov obstoječe reaktorje z odprtim gorivnim ciklom spremenilo v »trajnostno« možnost – ob predpostavki, da z njimi lahko poravnamo tudi rabo energije pri procesu pridobivanja.

Hitri oplodni reaktorji in uran iz oceanov

Če so hitri reaktorji 60-krat učinkovitejši, bi ob enakem pridobivanju urana iz oceanov zagotovili **420 kWh na dan na prebivalca**. Končno trajnostna številka, ki preseže sedanjo porabo! A samo če pri tem združita moči tehnologiji, od katerih je prva slabo razvita, druga pa nepriljubljena: pridobivanje urana iz oceanov in hitri oplodni reaktorji.

Slika 24.6 »Trajnostna« energija, ki jo zagotavlja uran. Za primerjavo: svetovna jedrska proizvodnja je zdaj 1,2 kWh/d na prebivalca, v Veliki Britaniji pa je bila včasih 4 kWh/d na prebivalca, a zdaj upada.

Uporaba urana iz rek

Urana ne najdemo samo v oceanih, temveč tudi v rekah; te zagotavljajo 32.000 ton urana na leto. Če bi zajeli 10 % tega priliva, bi dobili dovolj goriva za reaktorje z odprtim gorivnim ciklom s skupno zmogljivostjo 20 GW ali hitre oplodne reaktorje s skupno zmogljivostjo 1200 GW. S hitrimi oplodnimi reaktorji bi zagotovili **5 kWh na dan na prebivalca**.

Vse te številke povzema slika 24.6.

Kaj pa stroški?

Kot drugod v knjigi se pri glavnih izračunih nisem kaj dosti menil za ekonomska vprašanja. A ker je potencialni prispevek urana iz oceanov med največjimi na našem seznamu »trajnostne« proizvodnje, bi se najbrž morali pomeniti o tem, ali je ta številka sploh ekonomsko izvedljiva.

Japonski raziskovalci so odkrili metodo pridobivanja urana iz morske vode, strošek katere se giblje med 100 in 300 USD na kilogram urana, medtem ko je sedanji strošek urana iz uranove rude približno 20 USD/kg. Ker uran v primerjavi s tradicionalnimi gorivi vsebuje toliko več energije na tono, to 5- ali 15-kratno povečanje stroška urana ne bi veliko vplivalo na strošek jedrske energije: glavna postavka pri njeni ceni ni strošek goriva, temveč strošek gradnje in razgradnje elektrarne. Celo pri 300 USD /kg bi se cena jedrske energije povečala samo za kakšnih 0,3 penija na kWh. Strošek pridobivanja urana iz vode bi lahko zmanjšali tako, da bi morsko vodo hkrati uporabili še za kakšen drug namen – na primer za hlajenje elektrarne.

Nismo še na cilju: lahko japonsko metodo uporabimo v večjem obsegu? Kakšna poraba energije je potrebna za predelavo vse morske vode? V japonskem poskusu so v treh kletkah s 350 kg adsorpcijske snovi, ki privlači uran, zbrali »več kot 1 kg rumene pogače v 240 dneh«, kar ustreza približno 1,6 kg na leto. Ploščina preseka kletke je bila 48 m². Za delovanje 1-gigavattne jedrske elektrarne z odprtim gorivnim ciklom potrebujemo 160.000 kg na leto, kar pomeni 100.000-krat večjo proizvodnjo kot v japonskem poskusu. Če bi metodo, ki pasivno akumulira uran iz morja, za večjo razsežnost preprosto pomnožili, bi za moč 1 GW potrebovali kletke s prispevno površino 4,8 km² in 350.000 tonami adsorpcijske snovi – to je več od mase vsega jekla v samem reaktorju. Spravimo te velike številke v človeku razumljive okvire: če bi z uranom zagotavljali 22 kWh na dan na prebivalca, bi si vsak 1-gigavattni reaktor delil milijon ljudi, vsak od njih pa bi potreboval 0,16 kg urana na leto. Vsakdo bi tako potreboval desetino japonske poskusne naprave, ta desetina pa bi imela maso 35 kg na osebo in površino **5 m²** na osebo. Predlog, da bi ustvarili takšne zmogljivosti pridobivanja urana iz oceanov, ima torej podobne razsežnosti kot predlogi v stilu: »vsakdo bi potreboval **10 m²** sončne elektrarne« in »vsakdo bi potreboval enotonski avtomobil in poseben parkirni prostor«. Res je, velika naložba,

a nikakor ne absurdno prevelika. In to je bil izračun za reaktorje z odprtim gorivnim ciklom. Za hitre oplodne reaktorje potrebujemo 60-krat manj urana, zato bi bila masa zbiralnika urana 0,5 kg na osebo.

Torij

Torij je uranu podoben radioaktivni element. Včasih so ga uporabljali za proizvodnjo žarilnih mrežic in v Zemljini skorji ga je kakšnih trikrat več kot urana. Zemlja običajno vsebuje približno 6 delcev torija na milijon, nekateri minerali pa 12 % torijevega oksida. V morski vodi ga ni veliko, saj se torijev oksid v vodi ne topi. Že v preprostih reaktorjih ga lahko pokurimo v celoti (v primerjavi s standardnimi reaktorji na uran, ki porabijo samo približno odstotek naravnega urana). Torij uporabljajo v jedrskih reaktorjih v Indiji. Če bo uranove rude začelo primanjkovati, bo najverjetneje postal prevladujoče jedrsko gorivo.

Torijevi reaktorji proizvedejo 3,6 milijarde kWh toplote na tono torija, kar bi pomenilo, da 1-gigavatni reaktor potrebuje približno 6 ton torija na leto ob predpostavki, da imajo njegovi generatorji 40-odstotni izkoristek. Skupne svetovne zaloge torija ocenjujejo na 6 milijonov ton, kar je štirikrat več od znanih zalog, ki jih zajema tabela 24.7. Kot smo dejali za zaloge urana, je tudi pri zalogah torija povsem verjetno, da je količina podcenjena, saj iskanje novih zalog danes nima velike vrednosti. Če tako kot pri uranu predpostavimo, da zaloge porabimo v 1000 letih in jih enakomerno porazdelimo med 6 milijard ljudi, proizvedemo 4 kWh »trajnostne« energije na dan na prebivalca.

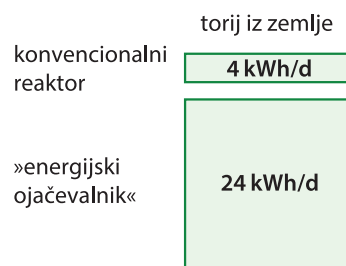
Alternativni jedrski reaktor na torij, »energijski ojačevalnik« ali »sistem gnan s pospeševalnikom«, kot ga predlagajo Nobelov nagrajenec Carlo Rubbia in njegovi sodelavci, bi po njihovih ocenah pretvoril 6 milijonov ton torija v 15.000 TW-let energije oz. 60 kWh/d na prebivalca v 1000 letih. Če predpostavimo 40-odstotni izkoristek pri pretvorbi v elektriko, to pomeni 24 kWh/d na prebivalca za 1000 let. Odpadki energijskega ojačevalnika bi bili manj radioaktivni. Pravijo tudi, da bi količina ekonomsko dostopnega torija v doglednem času nekajkrat presegla sedanjih 6 milijonov ton. Če je njihova ocena – 300-krat – pravilna, bi lahko torij in energijski ojačevalnik 60.000 let zagotavljala 120 kWh/d na prebivalca.

Raba površin

Zamislimo si, da se Velika Britanija odloči in resno nameni prekiniti rabo fosilnih goriv, zato zgradi veliko novih jedrskih reaktorjev, četudi to morda ni »trajnosten« način. Je država dovolj velika za vse reaktorje, ki bi jih potrebovali za obsežnejše razogljičenje prometa in ogrevanja? Potrebujemo podatek o moči jedrskih elektrarn na enoto površine: približno 1000 W/m² (slika 24.10). Recimo, da elektrarne proizvedejo 22 kWh električne energije na dan na prebivalca, kar ustreza 55 GW (približno toliko je

država	zaloge (v 1000 tonah)
Turčija	380
Avstralija	300
Indija	290
Norveška	170
ZDA	160
Kanada	100
Južna Afrika	35
Brazilija	16
druge države	95
svet skupaj	1580

Tabela 24.7 Znane svetovne zaloge torija v monazitu (ekonomsko dostopne).



Slika 24.8 Možnosti, povezane s torijem.

francoskih jedrskih zmogljivosti). Takšno količino bi lahko zagotovili s 55 jedrskimi elektrarnami in vsaka bi potrebovala kvadratni kilometer prostora. To je približno 0,02 % površine Velike Britanije. Za vetrne elektrarne z enako povprečno proizvodnjo bi potrebovali 500-krat večjo površino: 10 % države. Če bi jedrske elektrarne v parih razporedili ob obali (dolžine 3000 km, ločljivost 5 km), bi dobili dve vsakih 100 km. Čeprav je potrebna površina zmerna, bi si torej elektrarne prisvojile približno 2 % obale (2 kilometra vsakih 100 km).

Ekonomika čiščenja

Kolikšen je strošek čiščenja lokacij jedrskih elektrarn? Letni proračun pristojnega britanskega organa za razgradnjo jedrskih elektrarn za naslednjih 25 let je 2 milijardi funtov. Jedrska industrija približno 25 let vsem v Veliki Britaniji prodaja po 4 kWh/d, torej je strošek organa za razgradnjo jedrskih elektrarn 2,3 penija na kWh. Kar zajetna subvencija – čeprav, to je treba reči, ne tako zajetna kot subvencija, ki se namenja za veter na morju (7 p/kWh). Poleg tega večina teh stroškov ni povezanih s civilnimi elektrarnami, temveč z zmogljivostmi za proizvodnjo orožja.

Varnost

Varnost jedrskih aktivnosti v Veliki Britaniji še naprej vzbuja skrb. V predlovalnem obratu THORP v Sellafieldu, ki so ga zgradili leta 1994 za 1,8 milijarde funtov, je od avgusta 2004 do aprila 2005 zaradi počene cevi puščalo, in to čedalje bolj. V osmih mesecih je v zadrževalni hram, opremljen z varnostnimi sistemi, ki bi morali nemudoma že po 15 litrih zaznati vsakršno odtekanje, izteklo 85.000 litrov z uranom bogate tekočine. A tega niso zaznali, saj upravljavci niso opravili kontrole delovanja varnostnih sistemov in se tudi sicer niso veliko menili za varnostne alarme.

Varnostni sistem je imel več varovalk. Z rutinskimi varnostnimi meritvami tekočin v hramu bi morali neodvisno od prezrtih varnostnih alarmov neobičajno prisotnost urana zaznati v enem mesecu po začetku odtekanja, vendar pa se upravljavci s temi rutinskimi meritvami niso ukvarjali, saj se jim je zdelo, da imajo preveč dela. Ko so jih končno opravili in zaznali neobičajno prisotnost urana v hramu (28. avgusta 2004, 26. novembra 2004 in 24. februarja 2005), niso ukrepali.

Do aprila 2005 je izteklo že 22 ton urana in še vedno noben sistem zaznavanja puščanja tega odtekanja ni odkril. Nazadnje ga je odkrilo računovodstvo, saj so pikolovski birokrati opazili, da ven prihaja 10 % manj urana, kot ga njihova stranka po lastnih trditvah vloži! Sama sreča, da je to zasebno podjetje zasledovalo dobiček, kajne? Glavni inšpektor za jedrske objekte je izrekel uničujočo kritiko: »Obrat so upravljali v okolju, v katerem so, kot kaže, raje dovoljevali obratovanje instrumentov, ki so kazali alarme, kot da bi raziskali vzrok alarma in napako odpravili.«



Slika 24.9 Elektrarne Sizewell. Zmogljivost elektrarne Sizewell A v ospredju, ki so jo zaustavili konec leta 2006, je bila 420 MW. Zmogljivost elektrarne Sizewell B v ozadju je 1,2 GW. Foto: William Connolley.



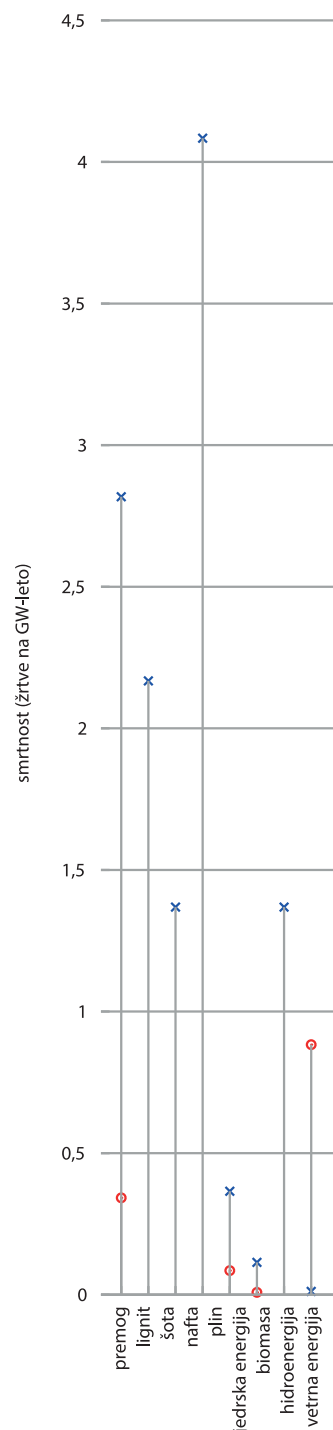
Slika 24.10 Površina elektrarne Sizewell je manjša od 1 km². Razmik med dvema modrima črtama je 1 km. © Crown copyright; Ordnance Survey.

Če bomo dovolili, da bodo nove reaktorje gradila zasebna podjetja, kako bomo zagotovili, da bodo izpolnjevala višje varnostne standarde? Ne vem.

Po drugi strani pa ne smemo dopustiti, da nas popade smrtni strah pred nevarnostjo jedrske energije. Jedrska energija ni neskončno nevarna. Samo nevarna je, tako kot premogovniki, skladišča bencina, kurjenje fosilnih goriv in vetrne turbine. Tudi če nihče ne zagotavlja, da v prihodnosti ne bo jedrskih nesreč, je po mojem mnenju prav, da jedrsko energijo objektivno primerjamo z drugimi viri energije. Termoelektrarne na premog na primer izpostavljajo javnost radioaktivnemu sevanju, saj premogov prah običajno vsebuje uran. Po podatkih nekega članka, objavljenega v reviji *Science*, so v Ameriki tisti, ki živijo v bližini elektrarn na premog, izpostavljeni večjim odmerkom sevanja kot tisti, ki živijo v bližini jedrskih elektrarn.

Za vrednotenje tveganja, ki ga za javnost predstavljajo različni viri energije, potrebujemo novo enoto. Izbral bom »žrtve na GW-leto (gigavatno leto)«. Naj poskusim ubesediti, kaj bi pomenila smrtnost elektrarne v višini 1 žrtve na GW-leto. Gigavatno leto je količina energije, ki jo proizvede 1-gigavatna elektrarna, če s polno močjo deluje eno leto. V Veliki Britaniji za svojo porabo elektrike potrebujemo približno 45 GW moči ali, če hočete, 45 gigavatnih-let na leto. Če bi elektriko proizvajali s pomočjo vira, katerega smrtnost je 1 žrtev na GW-leto, bi to pomenilo, da britanski elektroenergetski sistem ubije 45 ljudi na leto. Za primerjavo: na britanskih cestah letno umre 3000 ljudi. Če se torej *ne* zavzimate za odpravo cest, lahko na podlagi tega sklenete, da je smrtnost v višini »1 žrtev na GW-leto« sicer obžalovanja vredna, vendar pa z njo lahko živite. Seveda bi bilo 0,1 žrtve na GW-leto bolje, a če malo pomislite, boste takoj ugotovili, da povzroči proizvodnja energije s pomočjo fosilnih goriv najbrž žal več kot 0,1 žrtve na GW-leto – spomnite se vseh katastrof na naftnih ploščadih, strmoglavljenih helikopterjev na morju, požarov na cevovodih, eksplozij v rafinerijah in nesreč v premogovnikih. V Veliki Britaniji je v verigi fosilnih goriv vsako leto na desetine smrtnih žrtev.

Poglejmo torej dejansko smrtnost različnih načinov proizvodnje električne energije. Vrednosti se po državah močno razlikujejo. Na Kitajskem je smrtnost v premogovnikih na tono izkopa 50-krat večja kot v večini drugih držav. Slika 24.11 zajema podatke iz raziskav Inštituta Paul Scherrer in projekta Evropske unije po imenu ExternE, v sklopu katerega so pripravili celovite ocene vseh učinkov proizvodnje energije. Po podatkih EU imajo največjo smrtnost premog, lignit in nafta, sledita jim šota in biomasa, smrtnost vseh pa je večja od 1 žrtve na GW-leto. Najbolje se odrežeta jedrska in vetrna energija z manj kot 0,2 žrtve na GW-leto. Hidroenergija je po podatkih evropske raziskave najboljša, v raziskavi Inštituta Paul Scherrer pa se je odrezala najslabše, saj so preučevali drugačen nabor držav.



Slika 24.11 Smrtnost tehnologij za proizvodnjo električne energije. x: Ocene Evropske unije v projektu ExternE. o: Inštitut Paul Scherrer.

Inherentno varna jedrska energetika

Strah pred jedrskimi nesrečami je inženirje spodbudil k razvoju mnogih novih reaktorjev z izboljšanimi varnostnimi lastnostmi. Za reaktor GT-MHR trdijo, da je inherentno varen, poleg tega pa ima pri pretvorbi toplote v elektriko večji izkoristek od konvencionalnih jedrskih elektrarn [gt-mhr.ga.com].

Miti in zmote

Med pomanjkljivostmi jedrske energije se veliko govori o stroških gradnje in odpadkih. Oglejmo si nekaj vidikov teh vprašanj.

Za gradnjo jedrskega reaktorja rabimo ogromno količino betona in jekla, njuna proizvodnja pa je povezana z ogromnimi izpusti CO₂.

Ogljični odtis jekla in betona v 1-gigavatni jedrski elektrarni je približno 300.000 t CO₂.

Če to »ogromno« količino porazdelimo na 25-letno življenjsko dobo reaktorja, lahko izrazimo prispevek k ogljični intenzivnosti v standardnih enotah (g CO₂ na kWh(e)):

$$\begin{aligned} \text{z gradnjo povezana} &= \frac{300 \times 10^9 \text{ g}}{10^6 \text{ kW(e)} \times 220.000 \text{ h}} \\ \text{ogljčna intenzivnost} &= 1,4 \text{ g/kWh(e)} \end{aligned}$$

To je precej manj od vrednosti fosilnih goriv, ki predstavljajo 400 g CO₂/kWh(e). Medvladni odbor za podnebne spremembe (IPCC) ocenjuje, da je *skupna* ogljična intenzivnost jedrske energetike (vključno z gradnjo, predelavo goriva in razgradnjo) manj kot 40 g CO₂/kWh(e) (Sims in sod. 2007).

Ne razumite me napak: ne zagovarjam jedrske energije. Zagovarjam računanje.

Kaj niso ogromen problem tudi odpadki jedrskih reaktorjev?

Kot smo zapisali v uvodu tega poglavja, je količina odpadkov iz jedrskih reaktorjev relativno majhna. Prahu iz desetih elektrarn na premog je za štiri milijone ton na leto (s prostornino približno 40 litrov na prebivalca na leto), jedrskih odpadkov iz desetih britanskih jedrskih elektrarn pa za samo 0,84 litra na prebivalca na leto – predstavljajte si jih kot steklenico vina na osebo na leto (slika 24.13).

Večina teh odpadkov ima nizko radioaktivnost; 7 % jih je srednje radioaktivnih, samo 3 % – 25 ml na leto – pa visoko radioaktivnih.

Zares zoprna stvar so visoko radioaktivni odpadki. Prvih 40 let jih običajno hranijo v elektrarni, in sicer v bazenu z vodo, kjer jih hladijo. Po 40 letih je njihova radioaktivnost 1000-krat manjša. In tudi potem še naprej upada. Če iz odpadkov s *predelavo* ločimo uran in plutonij za ponovno



Slika 24.12 Elektrarna Černobil (zgoraj) in zapuščeno mesto Pripyat, ki ji je nudilo infrastrukturo (spodaj). Foto: Nik Stanbridge.

uporabo v jedrskem gorivu, je radioaktivnost visoko radioaktivnih odpadkov po 1000 letih približno enaka radioaktivnosti uranove rude. Strokovnjaki za skladiščenje jedrskih odpadkov torej morajo izdelati načrt, kako bodo visoko radioaktivne odpadke zaščitili za približno 1000 let.

Je to težko? 1000 let je v primerjavi z življenjsko dobo vlad in držav vsekakor dolga doba! A količina je tako majhna, da se mi zdijo jedrski odpadki precej neznatna skrb v primerjavi z vsemi drugimi odpadki, s katerimi bomo zasuli prihodnje generacije. Pri 25 ml na leto bi v času življenja pridelali manj kot 2 litra visoko radioaktivnih odpadkov. Tudi če to pomnožimo s 60 milijoni ljudi, količina, ki bi jo pridobili v eni generaciji, ne zveni neobvladljiva: 105.000 kubičnih metrov. Enako prostornino ima 35 olimpijskih bazenov. Če bi te odpadke naložili v meter visoko plast, bi ta merila samo desetinko kvadratnega kilometra.

Krajev, kamor ljudje ne smemo, je že zdaj veliko. Jaz morda ne smem niti na vaš vrt. In vi ne smete na mojega. Ne vi ne jaz nismo dobrodošli na gradu Balmoral. Napisi za »prepovedan vstop« visijo vsepovsod. Downing Street, letališče Heathrow, vojaški objekti, opuščeni rudniki – vstop je povsod prepovedan. Si res ni mogoče zamisliti, da bi vstop za 1000 let prepovedali še na enem kraju s površino enega kvadratnega kilometra, ki bi bil morda celo globoko pod zemljo?

Primerjajte teh 25 ml visoko radioaktivnih odpadkov na leto na prebivalca z drugimi tradicionalnimi oblikami odpadkov, ki jih sedaj proizvajamo: komunalni odpadki – 517 kg na leto na prebivalca; nevarni odpadki – 83 kg na leto na prebivalca.

Potencialne nove jedrske odpadke včasih primerjajo s tistimi, ki jih po zaslugi obstoječih reaktorjev že imamo. Poglejmo podatke za Veliko Britanijo. Predvidena količina »odpadkov z visoko aktivnostjo« do leta 2120 je po razgradnji obstoječih jedrskih zmogljivosti 478.000 m³. Od tega bo 2 % (približno 10.000 m³) visoko radioaktivnih odpadkov (1290 m³) in izrabljenega goriva (8150 m³), ki skupaj prispevajo 92 % aktivnosti. Z izgradnjo 10 novih jedrskih reaktorjev (10 GW) bi tej vsoti dodali še 31.900 m³ izrabljenega goriva, kar je enako prostornini 10 bazenov.

Če bi s pomočjo jedrske cepitve ali zlitja proizvedli še in še elektrike, ne bi vsa dodatna energija, ki bi se sprostila v okolje, prispevala h globalnemu segrevanju?

Zabavno vprašanje. In ker smo vse v tej knjigi vestno izražali v istih enotah, nanj ni težko odgovoriti. Najprej se spomnimo glavnih števil iz svetovne energijske bilance na str. 20: povprečna moč sonca, ki jo absorbirajo ozračje, zemlja in oceani, je 238 W/m², podvojitve koncentracije CO₂ v ozračju bi neto segrevanje efektivno povečalo za 4 W/m². Ta 1,7-odstotni prirastek naj bi bil za podnebje slaba novica. Moč sonca v njegovem 11-letnem ciklu od te vrednosti odstopa do 0,25 W/m². Predpostavimo, da bo čez približno 100 let na svetu živelo 10 milijard ljudi, vsi po evropskih standardih s porabo 125 kWh na dan, pri čemer bodo energijo proizvajali



Slika 24.13 Prostornina britanskih jedrskih odpadkov na prebivalca na leto je malenkost večja od steklenice vina.

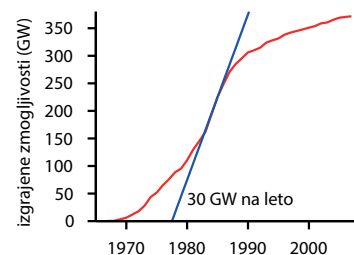
iz fosilnih goriv, jedrske energije in s pomočjo pridobivanja geotermalne energije iz kamnin. Na prebivalca bi bilo 51.000 m² površine Zemlje. Če moč na prebivalca delimo s površino na prebivalca, ugotovimo, da je dodatne moči, ki jo prispeva človek z rabo energije, za 0,1 W/m². To je ena štiridesetina teh 4 W/m², zaradi katerih se zdaj razburjamo, in malenkost manj od sončnega odstopanja, ki je 0,25 W/m². Ja, ob teh predpostavkah bi se človekova proizvodnja elektrike *za las* kvalificirala kot prispevek h globalnim podnebnim spremembam.

Slišal sem, da jedrskih elektrarn ni mogoče graditi dovolj hitro, da bi bil njihov prispevek koristen.

Navedbe o tem, kako težko je hitro graditi jedrske elektrarne, so prenapihnjene, k temu pa prispeva zavajajoča metoda navajanja podatkov, ki jo imenujem »čarobno polje«. Pri tej metodi na videz primerjamo dve reči, vendar vmes zamenjamo polje primerjave. Guardianov urednik okoljskih vsebin je v povzetku poročila skupine *Oxford Research Group* napisal: »Če bi hoteli v prihodnjih dveh generacijah računati na kakršen koli resen prispevek jedrske energije k zmanjševanju svetovnih ogljikovih izpustov, bi morali zgraditi skoraj 3000 novih reaktorjev oz. naslednjih 60 let približno enega na teden. Tako obsežen program gradnje civilnih elektrarn in njihove oskrbe je pobožna želja in je popolnoma neizvedljiv. V preteklosti je bila največja hitrost gradnje 3,4 reaktorja na leto.« 3000 zveni precej več kot 3,4, kajne? Pri tej uporabi metode »čarobnega polja« ne opazimo samo zamenjave **časovnega merila**, temveč tudi **geografskega**. Prva številka (3000 novih reaktorjev **v 60 letih**) se nanaša na **ves planet**, druga (3,4 novega reaktorja **na leto**) pa je največja hitrost gradnje v **posamezni državi** (Franciji)!

Pri bolj poštenih predstavitvi podatkov bi vse vrednosti navedli za planet. Od 429 delujočih reaktorjev na svetu jih je v Franciji 59, zato je realna največja hitrost gradnje za ves planet približno desetkrat večja od francoske, torej 34 novih reaktorjev na leto. Potrebna hitrost (za 3000 reaktorjev v 60 letih) pa je 50 novih reaktorjev na leto. Trditev, da je »tako obsežna gradnja civilnih elektrarn pobožna želja in je popolnoma neizvedljiva«, je traparija. Hitrost je res velika, a je enakega reda velikosti kot že dosežene zgodovinske vrednosti.

Je kaj soli v moji trditvi, da je zgodovinska vrednost največje hitrosti gradnje v svetovnem merilu najbrž približno 34 novih jedrskih reaktorjev na leto? Poglejmo podatke. Na sliki 24.14 vidimo moč svetovnega jedrskega parka kot funkcijo časa, pri čemer so zajete samo elektrarne, ki so leta 2007 še delovale. Hitrost gradnje je bila največja leta 1984 in je bila (tam-ta-dam ...) približno 30 GW na leto – to pomeni trideset 1-gigavatnih reaktorjev. Kaj sem rekel.



Slika 24.14 Graf skupnih jedrskih zmogljivosti na svetu, zgrajenih po letu 1967, ki še vedno delujejo. Hitrost gradnje je dosegla vrh leta 1984 s 30 GW na leto.

Kaj pa jedrsko zlitje?

Pravimo, da bomo sonce zaprli v škatlo. Simpatična ideja. Težava je v tem, da ne znamo izdelati škatle.

Sébastien Balibar, direktor oddelka za raziskave, CNRS

Pri proizvodnji energije s pomočjo jedrskega zlitja smo na špekulativni in eksperimentalni ravni. Lahkomiselno bi bilo predpostaviti, da bodo fuzijski oreh zagotovo strli, z veseljem pa ocenim, koliko moči bi na ta način zagotovili, če bi ga vendarle strli.

Za najobetavnejši veljata naslednji fuzijski reakciji:

reakcija DT, pri kateri se devterij zlije s tritijem in nastane helij;

reakcija DD, pri kateri se devterij zlije z devterijem.

Devterij je naraven stabilen težak izotop vodika, in ga lahko pridobimo iz morske vode. Tritija, ki je še težji radioaktiven izotop vodika, pa v naravi ni veliko (njegova razpolovna doba je namreč samo 12 let), a ga lahko proizvedemo iz litija.

ITER je mednarodni projekt, s pomočjo katerega naj bi ugotovili, kako izdelati stalno delujoč fuzijski reaktor. V prototipu bodo uporabili reakcijo DT. DT velja za boljšo od DD, saj je izkoristek energije večji, temperatura, potrebna za sprožitev, pa »samo« 100 milijonov °C. Za reakcijo DD potrebujemo temperaturo 300 milijonov °C. (Maksimalna temperatura sonca je 15 milijonov °C.)

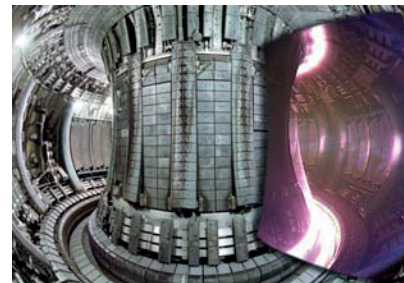
Privoščimo si nekaj fantaziranja in predpostavimo, da bo projekt ITER uspel. Koliko trajnostne energije bi lahko proizvedli z jedrskim zlitjem? Elektrarne, ki izvajajo reakcijo DT in uporabljajo litij, bodo ostale brez »bencina«, ko zmanjka litija. A upam, da bo še pred tem prišlo nadaljevanje fantazije: fuzijski reaktor, ki uporablja samo devterij.

Ta fantazijska vira energije bom po prevladujočem gorivu, s katerem bi se v posameznem primeru ukvarjali, poimenoval »litijeva fuzija« in »devterijeva fuzija«. Zdaj pa ocenimo, koliko energije bi z njuno pomočjo proizvedli.

Litijeva fuzija

Svetovne zaloge litija ocenjujejo na 9,5 milijona ton rude. Če bi v 100 letih vse te zaloge namenili fuziji, bi zagotovile **10 kWh/d na prebivalca**.

Obstaja še en vir litija, in sicer morska voda. Koncentracija litija v njej je 0,17 ppm. Za proizvodnjo 100 milijonov kg litija iz morske vode na leto bi potrebovali 2,5 kWh(e) energije na gram litija. Če fuzijski reaktorji povrnejo 2300 kWh(e) na gram litija, tako zagotovijo moč **105 kWh/d na prebivalca** (pri 6 milijardah ljudi). Pri tej proizvodnji bi bilo litija v oceanih dovolj za več kot milijon let.



Slika 24.15 Notranjost eksperimentalnega fuzijskega reaktorja. Na spodnji sliki je vakuumska posoda JET-a, spredaj pa slika plazme, kot jo posname običajna televizijska kamera. Foto: EFDA-JET.



Slika 24.16 Če bi fuzijo na osnovi litija uporabljali pošteno in »trajnostno«, bi lahko z njo proizvedli toliko, kot sedaj porabimo. Z litijem iz zemlje bi 1000 let zagotavljali 10 kWh/d na prebivalca, z litijem iz morske vode pa 105 kWh/d na prebivalca več kot milijon let.



Slika 24.17 Če je fuzija na osnovi devterija mogoča, bi več milijonov let zagotavljala obilne količine trajnostne energije. Da lahko potencialni prispevek fuzije predstavimo na eni strani, je merilo diagrama v obeh smereh desetkrat pomanjšano. Za primerjavo v enakem merilu dodajamo rdeči in zeleni stolpec iz slike 18.1.

Devterijeva fuzija

Zamislimo si, da znanstveniki in inženirji strejo oreh sprožitve reakcije DD. To bi bila imenitna novica. V vsaki toni vode je 33 g devterija, ob zlitju enega samega grama devterija pa bi se sprostilo nepredstavljaljivih 100.000 kWh energije. Če vemo, da je masa oceanov 230 milijonov ton na prebivalca, lahko sklenemo, da je devterija dovolj, da vsakemu človeku na svetu z desetkrat več prebivalci milijon let zagotavljamo po 30.000 kWh na dan (kar je več kot 100-krat več od povprečne ameriške porabe) (slika 24.17).

Opombe in dodatno branje

stran

- 161 *Slika 24.1.* Vir: World Nuclear Association [5qntkb]. Skupna zmogljivost delujočih jedrskih reaktorjev je 372 GW(e), porabijo pa 65.000 ton urana na leto. ZDA imajo 99 GW, Francija 63,5 GW, Japonska 47,6 GW, Rusija 22 GW, Nemčija 20 GW, Južna Koreja 17,5 GW, Ukrajina 13 GW, Kanada 12,6 GW in Velika Britanija 11 GW. Leta 2007 so vsi reaktorji na svetu skupaj proizvedli 2608 TWh električne energije, kar v povprečju pomeni 300 GW ali **1,2 kWh na dan na prebivalca**.
- 162 *V hitrih oplojnih reaktorjih iz urana dobimo približno 60-krat več energije.* Vir: www.world-nuclear.org/info/inf98.html. Vodilna sila v razvoju hitrih oplojnih reaktorjev je zdaj Japonska.
- *Ena gigavatna jedrska elektrarna z odprtim gorivnim ciklom porabi 162 ton urana na leto.* Vir: www.world-nuclear.org/info/inf03.html. Odtis začetka verige je pri elektrarni z zmogljivostjo 1 GW(e), s 33-odstotnim toplotnim izkoristkom in 83-odstotnim faktorjem izkoriščenosti naslednji: pridobivanje rude – 16.600 ton 1-odstotne uranove rude; mletje – 191 t uranovega oksida (ki vsebuje 162 t naravnega urana); bogatenje in izdelava gorivnih elementov – 22,4 t uranovega oksida (ki vsebuje 20 t obogatenega urana). Za bogatenje je potrebnih 115.000 SWU. Porabo energije SWU (enot ločevalnega dela) najdete na str. 102.
- 163 *Ocenili so, da je zalog urana z nizko koncentracijo urana več kot 1000-krat več od naše predpostavke 27 milijonov ton.* Deffeyes in MacGregor (1980) zaloge urana v rudi z minimalno koncentracijo 30 ppm ocenjujeta na 3×10^{10} ton.

(Povprečna koncentracija v rudi, predelani v Južni Afriki med letoma 1985 in 1990, je bila 150 ppm. Pri fosfatih je običajno povprečje 100 ppm.)

Takole so o zalogah urana junija 2008 zapisali pri Svetovnem jedrskem združenju (World Nuclear Association): »Ko znane zaloge primerjamo z večkratnikom sedanje hitrosti rabe virov, se občasno pojavi skrb, da bodo te nezadostne. Vendar gre pri tem za zmoto, ki ji pravimo »omejitve rasti«, /.../ ki ne upošteva naše stalne zelo omejene narave vedenja o tem, kaj je dejansko v Zemljini skorji. Ob našem znanju na področju geologije smo lahko prepričani, da predstavljajo odkrite zaloge kovinskih mineralov le majhen delež tega, kar je tam.

Izmerjene zaloge urana, torej količina, za katero vemo, da je ekonomsko dostopna, je /.../ odvisna od intenzitete preteklih raziskovalnih dejavnosti in v osnovi ni izjava o tem, kaj je v Zemljini skorji, temveč o tem, kaj vemo.

Sedanje izmerjene svetovne zaloge urana (5,5 Mt) /.../ zadoščajo za več kot 80 let. To predstavlja višjo raven zagotovljenih virov, kot je običajno za večino mineralov. Ko sedanje zaloge poidejo, bodo na podlagi sedanjega geološkega znanja dodatne raziskave in višje cene zagotovo dali nove vire.

Ekonomsko racionalni akterji bodo vložili sredstva v iskanje novih zalog šele takrat, ko bodo povsem prepričani o njihovem dobičku, za to pa so običajno potrebni pozitivni cenovni signali, ki jih povzročijo trendi nezadostne ponudbe. Če gospodarski sistem deluje pravilno in je kapitalaska učinkovitost kar največja, zalog nobene surovine v nobenem trenutku ne bi smelo biti za več kot nekaj desetletij.«

[Raziskovanje ima svojo ceno. Strošek iskanja urana je bil v zadnjih tridesetih letih 1–1,50 USD na kg urana (3,4 GBP/MJ), kar predstavlja 2 % promptne cene, ki je 78 USD/kgU. Povprečni strošek iskanja surove nafte je bil približno 6 USD/sodček (1050 GBP/MJ) (12 % promptne cene).]

»V nasprotju s kovinami, ki jih družba uporablja že stoletja, smo uran komaj začeli koristiti. Minil je šele en cikel »raziskovanja – odkritja – proizvodnja«, ki ga je v veliki meri zagnala rast cen ob koncu 70. let 20. stoletja.

Prezgodaj je govoriti o dolgoročnem pomanjkanju urana, ko je celotna jedrska industrija tako mlada, da je bil potreben komaj en cikel obnove vira.« www.world-nuclear.org/info/inf75.html

Dodatna literatura: Herring (2004), Price in Blaise (2002), Cohen (1983).

IPCC navaja OECD pri svojih predvidevanjih, da bi ob ravni porabe iz leta 2004 zaloge urana v konvencionalnih virih in fosfatih zadoščale za 670 let, če bi jih uporabili v reaktorjih z odprtim gorivnim ciklom, 20.000 let, če bi jih uporabili v hitrih reaktorjih s ponovno uporabo plutonija, oz. 160.000 let, če bi jih uporabili v hitrih reaktorjih s ponovno uporabo urana in vseh aktinidov (Sims in sod. 2007).

165 *Japonski raziskovalci so odkrili metodo pridobivanja urana iz morske vode*. Ocena stroška 100 USD na kg: Seko in sod. (2003) in [y3wnzr]. Ocena 300 USD na kg: Agencija za jedrsko energijo pri OECD (2006, str. 130). Pri tej metodi pridobivanja urana za nekaj mesecev v ocean potopijo tkivo iz polimernih vlaken, ki jih pred tem obsevajo, da postanejo lepljiva. To potem nabere 2 g urana na kilogram vlaken.

– *Strošek pridobivanja urana iz vode bi lahko zmanjšali tako, da bi morsko vodo hkrati uporabili še za kakšen drug namen – na primer za hlajenje elektrarne*. Zamisel o jedrskem otoku, ki bi proizvajal vodik, je splavil C. Marchetti. Oplodne reaktorje bi hladila morska voda, uran pa bi iz hladilne vode pridobivali s hitrostjo 600 t urana na 500.000 Mt morske vode.

166 *Torijevi reaktorji proizvedejo 3,6 x 10⁹ kWh toplote na tono torija*. Vir: www.world-nuclear.org/info/inf62.html. Pri torijevih reaktorjih je še mogoče doseči napredek, zato bi se številka v prihodnosti utegnila povečati.

– *Alternativni jedrski reaktor na torij, »energijski ojačevalnik«* /.../ Glejte Rubbia in sod. (1995), web.ift.uib.no/~lillestol/Energy_Web/EA.html, [32t5zt], [2qr3yr], [ynk54y].

– *Svetovne zaloge torija v monazitu*. Vir: US Geological Survey, Poročilo o mineralnih virih, januar 1999. [y17tkm] Citiran v publikaciji UIC Nuclear Issues Briefing Paper, št. 67, november 2004.

»Če bi se povpraševanje bistveno povečalo, bi bili verjetnejši viri pridobivanja drugi minerali z večjo vsebnostjo torija, na primer torit.«

Na [yju4a4] izpustijo vrednost za Turčijo, najdemo pa jo tukaj: [yeyr7z].

167 *Jedrska industrija približno 25 let vsem v Veliki Britaniji prodaja po 4 kWh/d*. Do leta 2006 je bilo skupaj proizvedenih približno 2200 TWh. Vir: Energetski pregled Stephena Salterja za škotsko nacionalno stranko.

- *Letni proračun pristojnega britanskega organa za razgradnjo jedrskih elektrarn je 2 milijardi funtov.* V resnici se zdi, da ta proračun za čiščenje kar naprej narašča. Zadnji skupni strošek razgradnje je 73 milijard funtov. news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm.

168 *Glavni inšpektor za jedrske naprave je izrekel uničujočo kritiko /.../* (Weightman 2007).

- *Jedrska energija ni neskončno nevarna. Samo nevarna je.* Dodatna literatura o nevarnostih: Kammen in Hassenzahl (1999).
- *V Ameriki so tisti, ki živijo v bližini elektrarn na premog, izpostavljeni večjim odmerkom sevanja kot tisti, ki živijo v bližini jedrskih elektrarn.* Vir: McBride in sod. (1978). Koncentracija urana v premogu je približno 1 ppm, torija pa 2 ppm. Dodatna literatura: gabe.web.psi.ch/research/ra/ra_res.html, www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.xpdf.
- *Najmanjšo smrtnost imata jedrska in vetrna energija.* Glejte tudi Jones (1984). Podatki so vzeti iz raziskav, ki napovedujejo prihodnost, lahko pa se ozremo tudi v preteklost.

V Veliki Britaniji smo s pomočjo jedrske energije proizvedli 200 GW-let elektrike, v jedrski industriji pa je bila 1 smrtna žrtev, in sicer delavec, ki je leta 1978 umrl pri elektrarni Chapelcross [4f2ekz]. Ena žrtev na 200 GW-let je v primerjavi z industrijo fosilnih goriv občudovanja vredna majhna smrtnost.

V svetovnem merilu je preteklo smrtnost v jedrski industriji težko oceniti. Ob talitvi reaktorja Three Mile Island ni umrl nihče, zaradi posledičnih izpustov pa naj bi od nesreče po ocenah morda umrl en človek. Ob nesreči v Černobilu je neposredno zaradi izpostavljenosti sevanju umrlo 62 ljudi, pozneje pa zaradi raka na ščitnici še 15 domačinov. Po ocenah je v okolici za rakom umrlo še 4000 ljudi, po vsem svetu pa za rakom, ki ga je povzročila nesreča, približno 5000 ljudi (od 7 milijonov, kolikor jih je bilo izpostavljenih radioaktivnemu prahu) (Williams in Baverstock 2006). Teh smrtnih primerov pa ni mogoče beležiti, saj je rak v Evropi že tako vzrok za 25 % smrti, pogosto pa se razvije zaradi naravnega radioaktivnega sevanja.

Svetovno smrtnost jedrske energetike lahko ocenimo tako, da oceno o številu žrtev Černobila (9000) delimo s kumulativno količino energije, proizvedene iz jedrske energije med letoma 1969 in 1996, ki je 3685 GW-let. Rezultat je 2,4 žrtve na GW-leto.

Kar zadeva smrtne žrtve, ki jih pripisujemo vetrni energiji, v elektrarni Caithness Windfarm na www.caithnesswindfarms.co.uk navajajo 49 žrtev na svetu v obdobju med letoma 1970 in 2007 (35 delavcev vetrne industrije in 14 pripadnikov javnosti). Leta 2007 je Paul Gipe na svetu naštel skupaj 34 žrtev [www.wind-works.org/articles/BreathLife.html]. Sredi 90. let prejšnjega stoletja je bila z vetrno energijo povezana smrtnost 3,5 žrtve na GW-leto. Po podatkih Paula Gipa se je do konca leta 2000 zmanjšala na 1,3 žrtve na GW-leto.

Pretekla smrtnost je torej tako pri jedrski kot pri vetrni energiji večja od predvidene smrtnosti v prihodnosti.

- 169 *Ogljični odtis jekla in betona v 1-gigavatni jedrski elektrarni je približno 300.000 t CO₂.* Ena gigavatna jedrska elektrarna vsebuje 520.000 m³ betona (1,2 milijona ton) in 67.000 ton jekla [2k8y7o]. Če predpostavimo 240 kg CO₂ na m³ betona [3pvf4j], je odtis betona približno 100.000 t CO₂. Po podatkih podjetja Blue Scope Steel [4r7zpg] je odtis jekla približno 2,5 tone CO₂ na tono jekla. Odtis 67.000 ton jekla je torej približno 170.000 ton CO₂.

- 170 *Razprava o jedrskih odpadkih.* Viri: www.world-nuclear.org/info/inf04.html, [49hcnw], [3kduo7].

Novi jedrski odpadki v primerjavi s starimi. Committee on Radioactive Waste Management (2006).

- 172 *Svetovne zaloge litija ocenjujejo na 9,5 milijona ton rude.* Največje zaloge litija so v Boliviji (56,6 %), Čilu (31,4 %) in ZDA (4,3 %). www.dnmp.gov.br

- *Obstaja še en vir litija, in sicer morska voda.* Preskusili so že več metod pridobivanja (Steinberg in Dang 1975, Tsuruta 2005, Chitrakar in sod. 2001).
- *Fuzijska energija, ki bi jo proizvedli s pomočjo litija.*

Energijska gostota naravnega litija je približno 7500 kWh na gram (Ongena in Van Oost 2006). Ocene, kako učinkovito bi fuzijski reaktorji to spremenili v elektriko, so precej različne, od 310 kWh(e)/g (Eckhardt 1995) do 3400 kWh(e)/g naravnega litija (Steinberg in Dang 1975). Jaz sem predpostavil 2300 kWh(e)/g, in sicer na podlagi pogosto navedenega podatka: »En gigavatni fuzijski reaktor bi porabil približno 100 kg devterija in 3 tone naravnega litija na leto, proizvedel pa približno 7 milijard kWh.« [69vt8r], [6oby22], [63121p].

Dodatna literatura o jedrski cepitvi: Hodgson (1999), Nuttall (2004), Rogner (2000), Williams (2000), Uranium Information Center – www.uic.com.au, www.world-nuclear.org, [wnchw].

O stroških: Zaleski (2005).

O skladiščih odpadkov: [shrln].

O oplodnih reaktorjih in toriju: www.energyfromthorium.com.

Dodatna literatura o jedrskem zlitju: www.fusion.org.uk, www.askmar.com/Fusion.htm.

25 Življenje na račun obnovljive energije drugih?

Vprašanje, ali bo Mediteran v 21. stoletju postal regija sodelovanja ali konfliktov, bo za našo skupno varnost strateškega pomena.

Joschka Fischer, nemški zunanji minister, februar 2004

Ugotovili smo, da je težko prekiniti rabo fosilnih goriv samo z lastnimi obnovljivimi viri. Tudi z jedrsko energijo so problemi. Kaj nam potem preostane? No, kaj pa če bi živeli na račun obnovljive energije nekoga drugega? (Do nje seveda nismo upravičeni, ampak mogoče bi nam jo ta nekdo hotel prodajati.)

Večina virov, ki omogočajo trajnostno življenje, zahteva neko površino. Če hočete uporabiti sončne elektrarne, potrebujete zemljo, kamor jih namestite, če hočete gojiti rastline, spet potrebujete zemljo. Jared Diamond v svoji knjigi *Propad civilizacij* ugotavlja, da k propadu civilizacij prispeva veliko dejavnikov, vsem propadom pa je skupno to, da se je preveč povečala gostota prebivalstva.

Območja, kot sta Velika Britanija ali vsa Evropa, so v zagatnem položaju, saj imajo veliko gostoto prebivalstva, vsi razpoložljivi obnovljivi viri pa so razpršeni – njihova specifična moč je majhna (tabela 25.1). Ko se oziramo po pomoči, bi morali pogledovati k državam, ki imajo troje: a) majhno gostoto prebivalstva, b) veliko površino in c) obnovljivo energijo z veliko gostoto moči.

območje	prebivalstvo	površina (km ²)	gostota (ljudi na km ²)	površina na osebo (m ²)
Libija	5.760.000	1750.000	3	305.000
Kazahstan	15.100.000	2.710.000	6	178.000
Savdska Arabija	26.400.000	1.960.000	13	74.200
Alžirija	32.500.000	2.380.000	14	73.200
Sudan	40.100.000	2.500.000	16	62.300
svet	6.440.000.000	148.000.000	43	23.100
Škotska	5.050.000	78.700	64	15.500
Evropska unija	496.000.000	4.330.000	115	8.720
Wales	2.910.000	20.700	140	7.110
Velika Britanija	59.500.000	244.000	243	4.110
Anglija	49.600.000	130.000	380	2.630

V tabeli 25.2 je navedenih nekaj držav, ki ustrezajo merilom. V Libiji je na primer gostota prebivalstva 70-krat manjša kot v Veliki Britaniji, njena površina pa je sedemkrat večja. Druge s površino bogate države so Kazahstan, Savdska Arabija, Alžirija in Sudan.

moč na enoto površine kopnega ali morja	
veter	2 W/m ²
veter na morju	3 W/m ²
plimski bazeni	3 W/m ²
plimski tokovi	6 W/m ²
sončne FN elektrarne	5–20 W/m ²
rastline	0,5 W/m ²
deževnica	
(višavje)	0,24 W/m ²
hidroelektrarna	11 W/m ²
sončni dimnik	0,1 W/m ²
sončna termoelektrarna (puščava)	15 W/m²

Tabela 25.1 Zmogljivosti za obnovljivo energijo morajo biti reda velikosti držav, ker so obnovljivi viri zelo razpršeni.

Tabela 25.2 Nekaj območij, razporejenih od najmanjše gostote prebivalstva do največje. Podatki o gostoti prebivalstva na drugih območjih so na voljo na str. 338.

Mislim, da je v vseh teh državah najobetavnejši obnovljivi vir sončna energija, predvsem *tehnologija sončnih termoelektrarn s koncentriranjem sevanja*, ki s pomočjo zrcal usmerjajo sončno sevanje v gorišče. Sončne termoelektrarne so na voljo v več okusih glede na to, na kakšen način razporejajo gibljiva zrcala in katero tehnologijo pretvorbe postavljajo v ospredje – na primer Stirlingov motor, tlačnovodno metodo ali staljeno sol –, vse pa zagotavljajo precej podobno povprečno moč na enoto površine, ki je približno 15 W/m^2 .

Tehnologija, ki se izide

»Vso energijo za ves svet bi lahko proizvajali na kvadratu v Sahari, velikem 100 krat 100 km.« Je to res? Povprečna moč na enoto površine, ki jo v puščavah zagotavljajo sončne termoelektrarne, je približno 15 W/m^2 . Če v takšnem kvadratu ne bi bilo nič drugega, bi zagotavljal moč 150 GW. To ni enako sedanjim globalnim potrebam po moči. Ne približa se niti svetovnim potrebam po *elektriki*, ki so 2000 GW. Svetovne potrebe po moči so zdaj 15.000 GW. Pravilna izjava o saharski energiji bi bila, da bi sedanjim potrebam lahko zadostili s puščavskim kvadratom, velikim *1000 krat 1000 km*, ki bi bil v celoti napolnjen s sončnimi termoelektrarnami. Takšna površina je štirikrat večja od Velike Britanije. In če hočemo živeti v pravičnem svetu, bi najbrž morali meriti na večjo količino, kot jo porabljamo zdaj. Če bi hoteli vsakemu prebivalcu sveta omogočiti povprečno evropsko porabo (125 kWh/d), bi potrebovali *dva* puščavska kvadrata površine 1000 krat 1000 km.

Sahara k sreči ni edina puščava, zato bi bilo morebiti ustrežnejše razsekati svet na manjše regije in se vprašati, kolikšno površino potrebujemo v puščavi posamezne regije. Poglejmo Evropo: kolikšno površino potrebujemo na severu Sahare, da *vsem v Evropi in Severni Afriki* omogočimo povprečno evropsko porabo? Če rečemo, da v Evropi in Severni Afriki živi milijarda ljudi, se potrebna površina zmanjša na 340.000 km², kar ustreza kvadratu, ki meri **600-krat 600 km**. To je površina Nemčije, 1,4 Velike Britanije ali **16 Walesov**.

Britanski delež teh 16 Walesov bi bil en Wales: saharski kvadrat s površino 145-krat 145 km bi zadostil celotni sedanji britanski porabi primarne energije. Kvadrata lahko vidite na sliki 25.5. Rumeni kvadrat je v primerjavi z Afriko mogoče videti »majhen«, vendar ima enako površino kot Nemčija.

Načrt DESERTEC

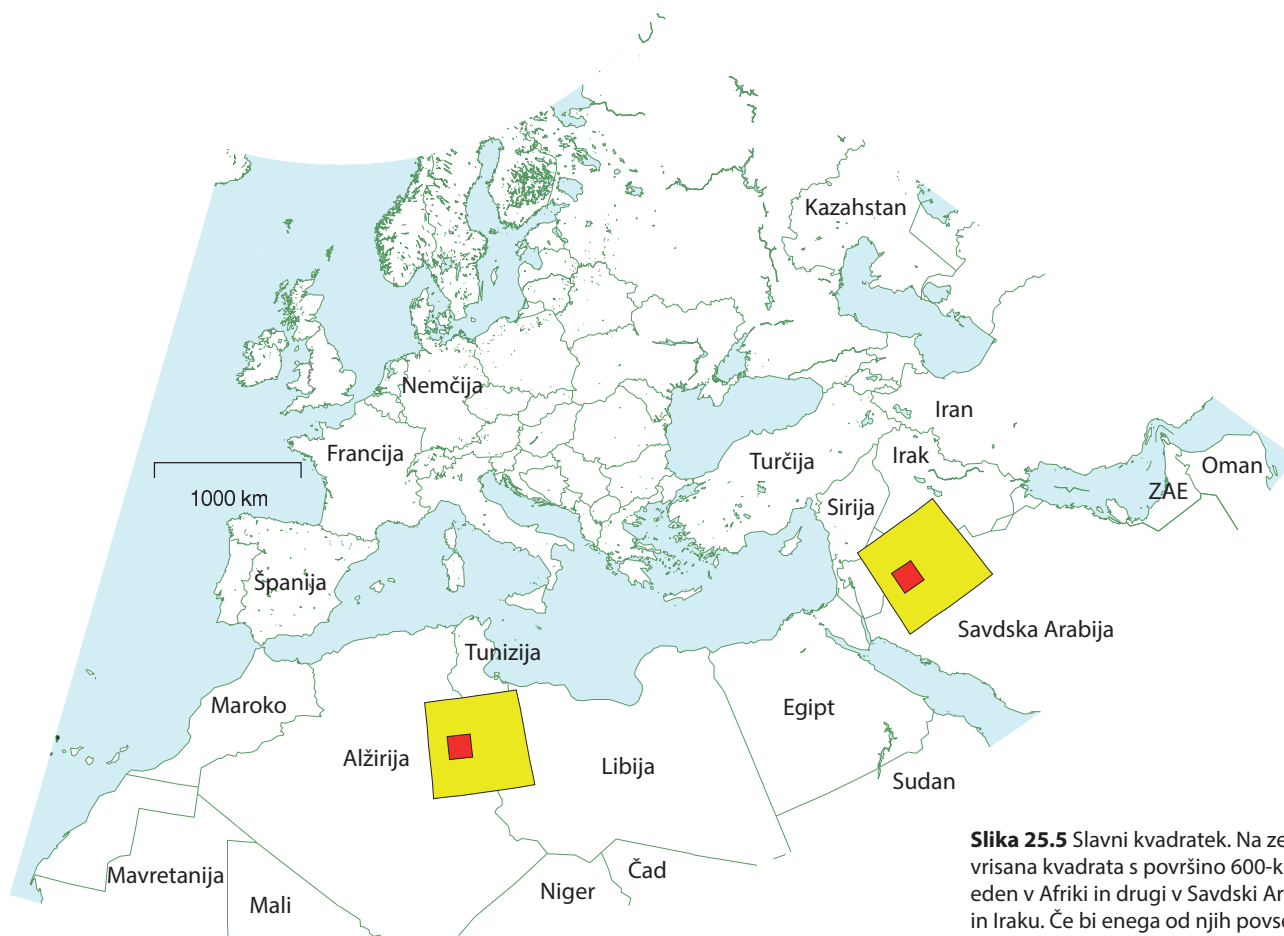
Organizacija z imenom DESERTEC [www.desertec.org] zagovarja načrt, po katerem bi v sončnih mediteranskih državah postavili sončne termoelektrarne in elektriko s pomočjo visokonapetostnih enosmer-
nih daljnovodov (slika 25.7) dobavljali v bolj oblačne severne predele.



Slika 25.3 Paraboloidni koncentrador s Stirlingovim motorjem. Specifična moč teh prekrasnih koncentradorjev je 14 W/m^2 . Fotografija objavljena z dovoljenjem Stirling Energy Systems. www.stirlingenergy.com



Slika 25.4 Andasol – španska »100-megavatna« sončna elektrarna v gradnji. Presežno toploto, ki jo bo proizvedla podnevi, bodo za največ sedem ur shranjevali v rezervoarjih s staljeno soljo in tako zagotavljali nepretrgano, stabilno dobavo električne energije v omrežje. V elektrarni naj bi proizvedli 350 GWh na leto (40 MW). Parabolična korita se razprostirajo na 400 hektarih, zato bo moč na enoto površine 10 W/m^2 . Foto zgoraj: ABB. Foto spodaj: IEA SolarPACES.



Slika 25.5 Slavni kvadratek. Na zemljevidu sta vrisana kvadrata s površino 600-krat 600 km, eden v Afriki in drugi v Savdski Arabiji, Jordaniji in Iraku. Če bi enega od njih povsem napolnili s sončnimi termoelektrarnami, bi te zagotovile dovolj moči, da bi milijardi ljudi omogočili povprečno evropsko porabo 125 kWh/d. Površina kvadrata je enaka površini Nemčije in 16-krat večja od površine Walesa. V vsakem velikem kvadratu je še manjši kvadrat s površino 145-krat 145 km – velikost Walesa –, kolikor bi je v Sahari potrebovali za pokritje vse britanske porabe.

S tehnologijo visokonapetostnih enosmernih sistemov elektriko že od leta 1954 prenašajo tako po zračnih daljnovodih kot po podvodnih kablilih (kakršna je medomrežna povezava med Francijo in Anglijo). Za prenos elektrike na 1000-kilometerske razdalje jo že zdaj uporabljajo v Južni Afriki, na Kitajskem, v Ameriki, Kanadi, Braziliji in Kongu. Prenosna zmogljivost tipičnega 500-kilovoltnega voda je 2 GW. Zmogljivost dvojice visokonapetostnih enosmernih vodov v Braziliji je 6,3 GW.

Visokonapetostni enosmerni daljnovodi veljajo za boljše od tradicionalnih visokonapetostnih izmeničnih, saj zahtevajo manj fizične opreme in manj zemlje, imajo pa tudi manjše izgube. Izgube na 3500-kilometerskem visokonapetostnem enosmernem daljnovodu, vključno s pretvorbo iz dvosmerne toka v izmeničnega in nazaj, so približno 15-odstotne. Dodatna prednost visokonapetostnih enosmernih sistemov pa je, da pomagajo stabilizirati elektroenergetsko omrežje, na katerega so priključeni.

Po načrtih DESERTEC-a bi v prvi vrsti izkoriščali obalna območja, saj sončne termoelektrarne, ki so nameščene ob morju, kot stranski produkt lahko zagotavljajo tudi razsoljeno vodo – ta pa je dragocena za človekovo rabo in kmetijstvo.

država	ekonomsko izvedljivi potencial (TWh/leto)	obalni potencial (TWh/leto)
Alžirija	169.000	60
Libija	140.000	500
Savdska Arabija	125.000	2.000
Egipt	74.000	500
Irak	29.000	60
Maroko	20.000	300
Oman	19.000	500
Sirija	10.000	0
Tunizija	9.200	350
Jordanija	6.400	0
Jemen	5.100	390
Izrael	3.100	1
ZAE	2.000	540
Kuvajt	1.500	130
Španija	1.300	70
Katar	800	320
Portugalska	140	7
Turčija	130	12
skupaj	620.000 (70.000 GW)	6.000 (650 GW)

V tabeli 25.6. so ocene predlagateljev projekta DESERTEC o tem, koliko potencialno moč bi lahko zagotavljali v državah Evrope in Severne Afrike. »Ekonomsko izvedljivega potenciala« je več kot dovolj za 125 kWh na dan za milijardo ljudi. Skupnega »obalnega potenciala« je dovolj za 16 kWh na dan na prebivalca za milijardo ljudi.

Poskusimo na zemljevidu upodobiti realen načrt. Zamislite si, da bi postavili sončne elektrarne s površino po 1500 km² – približno toliko je velik London. (S predmestji meri 1580 km², londonska obvoznica M25 zamejuje območje, veliko 2300 km².) Poimenujmo te objekte *krogci*. Zamislite si, da je v vsakem krogcu polovica površine namenjena sončnim termoelektrarnam s povprečno specifično močjo 15 W/m², ob tem pa ostane prostor za kmetijstvo, stavbe, železnico, ceste, cevovode in kablovode. Če upoštevamo 10 % prenosnih izgub med krogcem in porabnikom, vsak krogec zagotavlja povprečno 10 GW. Na zemljevidu 25.8 je nekaj krogcev predstavljenih v merilu. Za občutek, kako velike so te sončne termoelektrarne, sem jih nekaj posejal tudi po Veliki Britaniji. S *štirimi* bi proizvedli približno toliko elektrike, kot je sedaj v Veliki Britaniji porabimo (16 kWh/d na prebivalca, 60 milijonov ljudi). S *petinšestdesetimi* bi oskrbeli vso milijardo ljudi v Evropi in Severni Afriki s 16 kWh/d na prebivalca. Na sliki 25.8 je v puščavi 68 krogcev.

Tabela 25.6 Potencial sončne energije v državah okoli Evrope in v njeni bližini.
»Ekonomsko izvedljivi potencial« pomeni moč, ki bi jo lahko zagotovili na ustreznih območjih, kjer je običajno neposredno obsevanje najmanj 2000 kWh/m² na leto.
»Obalni potencial« pomeni moč, ki bi jo lahko zagotovili v pasu, ki je največ 20 m nad morsk gladino. Takšna proizvodnja je še posebej obetavna zaradi potencialne kombinacije z razsoljevanjem.
Za primerjavo: če želimo milijardi ljudi zagotoviti 125 kWh na dan, je skupna potrebna moč 46.000 TWh/leto (5200 GW). 6000 TWh/leto (650 GW) je 16 kWh na dan na prebivalca za milijardo ljudi.



Slika 25.7 Gradnja visokonapetostne enosmerne medomrežne povezave med Finsko in Estonijo. Moč dvojice teh kablov je 350 MW. Foto: ABB.



Slika 25.8 Vsak krogec predstavlja površino 1500 km². Če bi jo do polovice napolnili s sončnimi elektrarnami, bi te zagotavljale povprečno moč 10 GW. S 65 krogi bi za milijardo ljudi zagotavljali 16 kWh/d na prebivalca.

Fotonapetostne elektrarne s koncentriranjem sevanja

Alternativa sončnim termoelektrarnam s koncentriranjem sevanja v puščavah so veliki fotonapetostni sistemi s koncentriranjem sevanja. Izdelamo jih tako, da zelo kakovostno sončno celico za proizvodnjo elektrike poveznemo v gorišče poceni leč ali zrcal. Faiman in sod. (2007) pravijo, da je »sončna energija v fotonapetostni različici s koncentriranjem lahko [v puščavskih ameriških zveznih državah, kot so Kalifornija, Arizona, Nova Mehika in Teksas] cenovno povsem konkurenčna fosilnim gorivom in ne potrebuje nikakršnih subvencij«.

Po podatkih proizvajalca Amonix naj bi bila povprečna moč na enoto površine pri takšni obliki koncentriranja sončnega sevanja 18 W/m^2 .

Če hočemo dobiti občutek, koliko je vse potrebne opreme, lahko podatke prevedemo na osebno raven. En »25-kilovatni« (največja moč) fotonapetostni zbiralnik, kakršnega vidimo na sliki 25.9, zagotavlja povprečno 138 kWh na dan, za sedanji ameriški življenjski slog pa potrebujemo 250 kWh na dan na prebivalca. Če hočemo torej s pomočjo sončne energije v ZDA opustiti fosilna goriva, potrebujemo približno dva takšna zbiralnika velikosti 15 x 15 m na prebivalca.

Vprašanja

Nič več mi ni jasno. V 6. poglavju ste trdili, da z najboljšimi fotonapetostnimi moduli v krajih z britansko osončenostjo dobimo povprečno 20 W/m^2 . V puščavah bi z istimi moduli najbrž dobili 40 W/m^2 . Zakaj torej z elektrarnami s koncentriranjem sevanja dobimo samo $15\text{--}20 \text{ W/m}^2$? Mar ne bi morala biti tehnologija koncentriranja sevanja celo boljša od navadnih ploskih elektrarn?

Dobro vprašanje. Kratek odgovor je ne. Elektrarne s koncentriranjem sevanja ne dosežejo večje moči na enoto površine kot ploske sončne elektrarne. Priprava, ki koncentrira sevanje, mora slediti soncu, sicer sevanja ne usmerja ustrezno. In ko začnete na neko območje nameščati priprave, ki sledijo soncu, morate med njimi pustiti dovolj prostora. Veliko sevanja zato pade na prazno površino in se izgubi. Ljudje pa elektrarne s koncentriranjem sevanja kljub vsemu postavljajo zato, ker so ploske sončne elektrarne sedaj zelo drage, sončne termoelektrarne pa ne toliko. Cilj koncentradorjev ni izdelati naprave z veliko močjo na enoto površine. Površina je poceni (tako se jim zdi). Cilj je zagotoviti veliko moč na vloženi dolar.

Ampak če imajo ploske sončne elektrarne večjo specifično moč, zakaj ne opišete, kako bi Saharo prekrili z njimi?

Ker razmišljam o izvedljivih možnostih obsežne proizvodnje trajnostne energije v Evropi in Severni Ameriki do leta 2050. Ocenjujem, da bodo do leta 2050 zrcala še vedno cenejša od fotonapetostnih modulov, zato moramo usmeriti pozornost k sončnim termoelektrarnam.



Slika 25.9 25-kilovatni (največja moč) fotonapetostni zbiralnik s koncentradorji kalifornijskega podjetja Amonix. Površina zbiralnika meri 225 m^2 , na njej je 5760 Fresnelovih leč s koncentracijo 260 sonc, vsaka pa osvetljuje silicijevo celico s 25-odstotnim izkoristkom. Tak zbiralnik na ustrezni puščavski lokaciji proizvede 138 kWh na dan, kar zadostuje za porabo energije polovice Američana. Za merilo ob napravi stoji človek. Foto: David Faiman.

Kaj pa sončni dimniki?

Sončni dimnik moč sonca izkorišča na zelo preprost način. Sredi območja, prekrita s prosojno stekleno ali plastično streho, postavimo dimnik. Vroč zrak se vedno dviga in zrak, ki nastaja v tem rastlinjaku podobnem zbiralniku toplote, odnese po dimniku navzgor, pri tem pa z oboda zbiralnika vdira hladnejši zrak. Turbine ob vznožju dimnika iz zračnih tokov črpajo energijo. Sončni dimnik je precej preprosto postaviti, vendar njegova moč na enoto površine ni nič posebnega. Pilotni objekt v španskem Manzanaresu je obratoval sedem let, od leta 1982 do 1989. Dimnik je bil visok 195 m, njegov premer je bil 10 m. Premer zbiralnika je bil 240 m, na strehi je bilo 6000 m² stekla in 40.000 m² prosojne plastike. Proizvedli so 44 MWh na leto, kar ustreza površinski specifični moči 0,1 W/m². Teoretično bi se z velikostjo zbiralnika in višino dimnika povečala tudi specifična moč sončnega dimnika. Inženirji, ki so razvili Manzanares, menijo, da bi lahko na območju s sončnim sevanjem 2300 kWh/m² na leto (262 W/m²) s 1000-metrskim stolpom, obdanim z zbiralnikom s 7-kilometrskim premerom, proizvedli 680 GWh energije na leto, torej bi bila njegova povprečna moč 78 MW. Moč na enoto površine je tako približno 1,6 W/m², kar je podobno kot pri vetrnih elektrarnah v Veliki Britaniji in desetinka gostote moči sončnih termoelektrarn. Po nekaterih trditvah naj bi sončni dimniki elektriko proizvajali po podobni ceni kot konvencionalne elektrarne. Predlagam, da države z dovolj veliko količino odvečnega ozemlja in sonca priredijo velik kuharski obračun med sončnimi dimniki in sončnimi termoelektrarnami, financirajo pa naj ga države proizvajalke in porabnice nafte.

Kaj pa, če bi elektriko uvažali z Islandije, kjer je geotermalne energije in hidroenergije zares dovolj?

Islandija energijo učinkovito že izvaža, saj z njo napaja industrije, ki izdelujejo energijsko intenzivne proizvode. Na Islandiji na primer proizvedejo skoraj tona aluminija na prebivalca na leto! Lahko bi torej želi velikanske dobičke. Ampak ali lahko rešijo Evropo? Presenetilo bi me že tolikšno povečanje islandske elektroenergetike, da bi omogočili obsežen izvoz elektrike v Veliko Britanijo. Za primerjalno osnovo vzemimo medomrežno povezavo med Anglijo in Francijo, ki na drugo stran Rokavskega preliva zagotavlja do 2 GW. Ta največja moč je ekvivalentna 0,8 kWh na dan na prebivalca Velik Britanije, kar je približno 5 % povprečne britanske porabe elektrike. Na Islandiji elektrarne s pomočjo geotermalnih virov zagotavljajo povprečno samo 0,3 GW električne moči, kar je manj kot 1 % povprečnih britanskih potreb po moči. Vse islandske elektrarne zagotavljajo povprečno 1,1 GW električne moči. Za povezavo, po kateri bi zagotavljali enako moč kot francoska medomrežna povezava, bi Islandija torej morala *potrojiti* svojo proizvodnjo elektrike. Za 4 kWh na dan na prebivalca (kolikor približno v Veliki Britaniji pridobimo iz lastnih jedrskih elektrarn) bi morale biti islandske elektroenergetske zmogljivosti



Slika 25.10 Prototip sončnega dimnika Manzanares. Foto: solarmillennium.de.



Slika 25.11 Več islandskih elektrarn na geotermalno energijo. Foto: Rosie Ward.

desetkrat večje. Najbrž medomrežne povezave z Islandijo niso slaba ideja, ne pričakujte pa, da bo njihov prispevek zelo opazen.

Opombe in dodatno branje

stran

178 Povprečna moč na enoto površine, ki jo v puščavah zagotavljajo sončne termoelektrarne, je približno 15 W/m^2 . Moja vira za ta podatek sta podjetji, ki izdelujeta sončne termoelektrarne za puščave.

Pri www.stirlingenergy.com pravijo, da lahko s paraboloidnim koncentradorjem, ki ima v gorišču 25-kilovatni Stirlingov motor, na ugodni puščavski lokaciji proizvedemo 60.000 kWh na leto. Namestimo lahko po en koncentrador na 500 m^2 , povprečna specifična moč je tako 14 W/m^2 . Pravijo, da njihov koncentrador po proizvedeni energiji najbolje izkorišča površino.

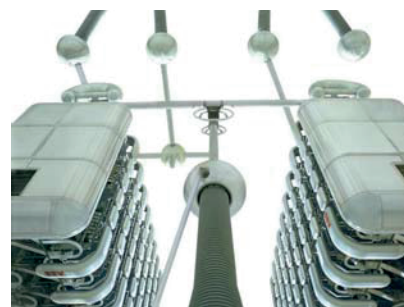
Pri www.ausra.com uporabljajo ploska zrcala, ki segrevajo vodo na 285°C in poganjajo parno turbino. Segreto vodo pod tlakom lahko shranjujejo v globoke s kovino obdane jame in tako elektriko proizvajajo tudi ponoči. Snovci v opisu elektrarne z močjo »240 MW(e)«, ki so jo načrtovali za Avstralijo (Mills in Lièvre 2004), trdijo, da bi s $3,5 \text{ km}^2$ zrcal proizvedli $1,2 \text{ TWh(e)}$, kar pomeni 38 W/m^2 zrcala. Za moč na enoto površine zemlje moramo upoštevati razmike med zrcali. Pri Ausri pravijo, da bi za vso elektriko za ZDA v puščavi potrebovali kvadrat s površino 153 krat 153 km (Mills in Morgan 2008). Skupna poraba elektrike v ZDA je 3600 TWh na leto, torej je moč na enoto površine zemlje po njihovem 18 W/m^2 . Tehnologija se imenuje *kompaktni linearni sončni koncentrador* (*compact linear fresnel reflector*) (Mills in Morrison 2000, Mills in sod. 2004, Mills in Morgan 2008). Mimogrede, v podjetju Ausra pri sončnih termoelektrarnah poudarjajo koristi hranjenja toplote v primerjavi s fotonapetostnimi napravami s koncentriranjem sevanja, ki nimajo naravne možnosti hranjenja.

Trieb in Knies (2004), velika zagovornika sončnih termoelektrarn, napovedujeta, da bo razpon površinske specifične moči alternativnih tehnologij sončnih termoelektrarn naslednji: pri paraboloidnih koritih $14\text{--}19 \text{ W/m}^2$, pri linearnih zbiralnikih s Fresnelovimi lečami $19\text{--}28 \text{ W/m}^2$, pri stolpih s heliostati $9\text{--}14 \text{ W/m}^2$ in pri paraboloidnem koncentradorju $9\text{--}14 \text{ W/m}^2$.

V Evropi so tri demonstracijske sončne termoelektrarne. Andasol, kjer uporabljajo paraboloidna korita, stolp Solúcar PS10 blizu Seville in stolp Solartres, kjer za hranjenje toplote uporabljajo staljeno sol. Andasolova naprava s paraboloidnimi koriti, ki jo vidite na sliki 25.4, naj bi zagotavljala 10 W/m^2 . Solúcarjev »11-megavatni« stolp ima 624 zrcal s površino po 121 m^2 . Zrcala koncentrirajo sončno sevanje do specifične moči 650 kW/m^2 . Največja moč, ki jo prejme sprejemnik, je 55 MW. Elektrarna lahko shrani 20 MWh toplote, kar ji omogoča 50-minutno delovanje v oblačnih razmerah. Proizvedla naj bi po pričakovanjih 24,2 GWh elektrike na leto, razprostira pa se na 55 hektarjih. Povprečna moč na enoto površine je tako 5 W/m^2 . (Vir: Letno poročilo Abengoa 2003.) Solartres se razprostira na 142 hektarjih in naj bi po pričakovanjih proizvedel 96,4 GWh na leto, kar pomeni specifično moč 8 W/m^2 . Tako Andasol kot Solartres za normalno delovanje porabita nekaj zemeljskega plina.



Slika 25.12 Inženirja nameščata sončno termoelektrarno eSolar s heliostati (zrcali, ki z vrtenjem in nagibanjem sledijo soncu). Pri esolar.com izdelujejo srednje velike elektrarne: 33-megavatno (največja moč) napravo na 64 hektarjih. To pomeni največ 51 W/m^2 in rekel bi, da bi na tipični puščavski lokaciji zagotovila četrtno te vrednosti: 13 W/m^2 .



Slika 25.13 Visokonapetostni enosmerni elektroenergetski sistem na Kitajskem. Foto: ABB.

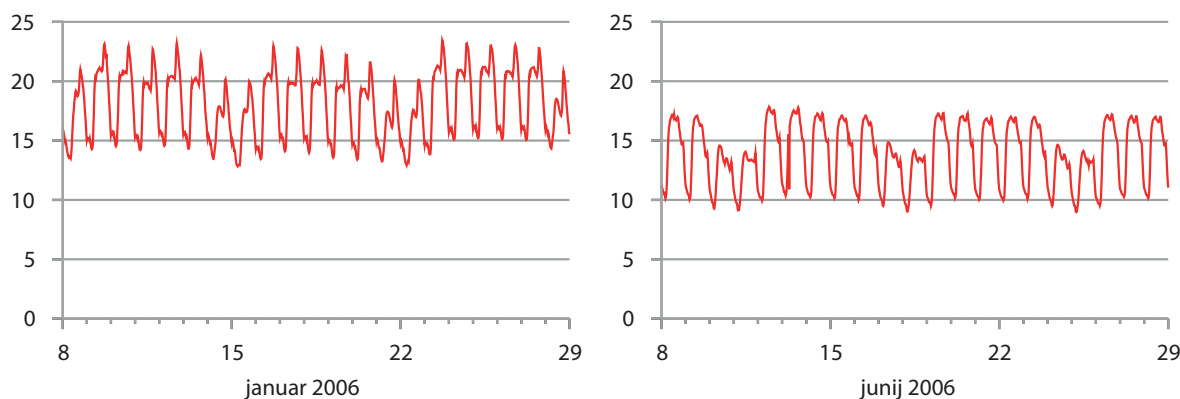
- 179 *Za prenos elektrike na 1000-kilometrsko razdalje tehnologijo visokonapetostnih enosmernih sistemov že zdaj uporabljajo v Južni Afriki, na Kitajskem, v Ameriki, Kanadi, Braziliji in Kongu.* Vira: Asplund (2004), Bahrman in Johnson (2007). Dodatna literatura o visokonapetostnih enosmernih sistemih: Carlsson (2002).
- 179 *Izgube na 3500-kilometerskem visokonapetostnem enosmernem daljnovodu, vključno s pretvorbo iz izmeničnega toka v enosmerne in nazaj, so približno 15-odstotne.* Vira: Trieb in Knies (2004), van Voorthuysen (2008).
- 182 *Po podatkih proizvajalca Amonix naj bi bila povprečna moč na enoto površine pri takšni obliki koncentriranja sončnega sevanja 18 W/m².* Pri www.amonix.com predpostavljajo: leča prepušča 85 % svetlobe, celica ima 32-odstotni izkoristek, zbiralnik ima 25-odstotni izkoristek, še 10 % je dodatnih izgub zaradi senčenja. Razmerje površina zbiralnika/površina zemlje je 1/3. Običajno neposredno sončno obsevanje: 2222 kWh/m²/leto. Po njihovih pričakovanjih naj bi vsak kilovat nazivne moči zagotavljal 2000 kWh/leto (v povprečju 0,23 kW). Elektrarna z največjo močjo 1 GW bi potrebovala 12 km² površine, proizvedli pa bi 2000 GWh na leto. To pomeni 18 W/m².
- *Sončni dimniki.* Viri: Schlaich J. (2001), Schlaich in sod. (2005), Dennis (2006), www.enviromission.com.au, www.solarairpower.com.
- 183 *Na Islandiji elektrarne s pomočjo geotermalnih virov zagotavljajo povprečno samo 0,3 GW električne moči. Vse islandske elektrarne zagotavljajo povprečno 1,1 GW električne moči.* Statistični podatki za leto 2006 pravijo: 7,3 TWh električne energije iz hidroelektrarn in 2,6 TWh elektrike iz geotermalnih virov, pri čemer je moč hidroelektrarn 1,16 GW, elektrarn na geotermalno energijo pa 0,42 GW. Vir: Nacionalni urad za energijo Orkustofnun [www.os.is/page/energystatistics].

Dodatna literatura: Evropska komisija (2007), Sektor za systemske analize in tehnološke ocene Inštituta za tehnično termodinamiko pri Nemškem letalskem in vesoljskem središču DLR (2006), www.solarmillennium.de.

26 Nihanja in hranilniki

Veter je kot neposredno gonilno silo povsem nemogoče uporabiti v sistemu strojnega dela, saj bi v brezvetrju ves posel v državi pahnili v mirovanje. Pred dobo parnega stroja so za drenažo rudnikov preskusili mline na veter: to so bili zmogljivi stroji, vendar so delovali neredno in v daljšem obdobju mirnega vremena je rudnike zalilo, delavce pa pahnilo v brezdelje.

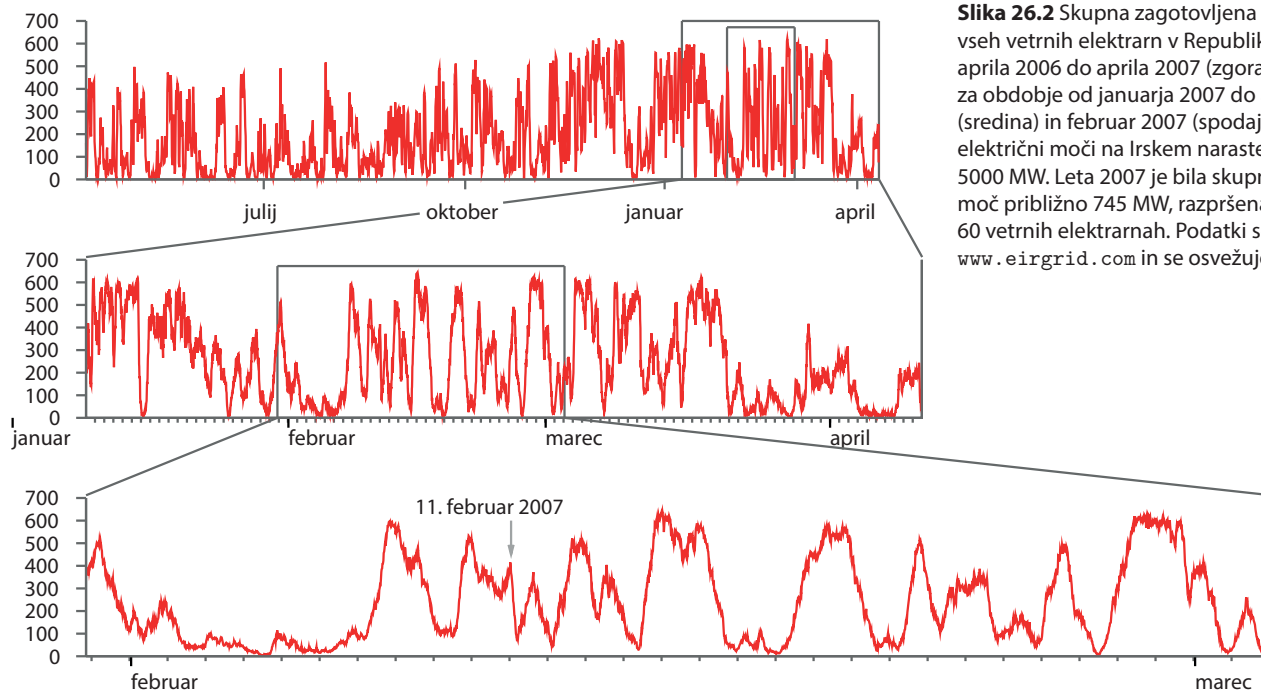
William Stanley Jevons, 1865



Če se poslovimo od fosilnih goriv in se v celoti preusmerimo k obnovljivim virom *ali* v celoti k jedrski energiji *ali* h kombinaciji obojega, utegnemo trčiti ob težavo. Večina obilnih obnovljivih virov se ne da vklopiti ali izklopiti na ukaz. Ko piha veter in se pokaže sonce, je energija na pladnju, samo dve uri pozneje pa morda ni več na voljo. Tudi jedrske elektrarne običajno niso zasnovane tako, da bi jih kar vklapljali in izklapljali. Navadno delujejo ves čas, moč, ki jo zagotavljajo, pa lahko zmanjšujemo ali povečujemo v nekaj urah. To je problematično, ker morata biti poraba in proizvodnja v elektroenergetskem omrežju ves čas povsem enaki. Omrežje energije ne more hraniti. Za energetske načrt, ki se izide vsako minuto dneva, torej potrebujemo *nekaj enostavno vklopljivega in izklopljivega*. Običajno se predpostavlja, da bi ta nekaj moral biti *vir* energije, ki bi ga vklapljali in izklapljali in tako glede na povpraševanje izravnavali nihanja ponudbe (na primer elektrarna na fosilna goriva!). Enako učinkovit način izenačevanja ponudbe in povpraševanja pa bi bile enostavno vklopljive in izklopljive *potrebe* po energiji – ponor moči, ki bi ga lahko brez pomišljanja vklopili in izklopili.

V vsakem primeru ta nekaj mora biti *velik*, saj se potrebe po električni energiji močno spreminjajo (slika 26.1). Včasih se bistveno spremenijo že

Slika 26.1 Potrebe po električni moči v Veliki Britaniji (v kWh/d na prebivalca) v dveh zimskih in dveh poletnih tednih leta 2006. Največje vrednosti januarja so vsak dan ob 6h zvečer. Tako poleti kot pozimi se jasno razloči petdnevni delovni teden. (Če vas zanimajo nacionalne vrednosti v GW, naj vas spomnim, da vrh skale, 24 kWh/d na prebivalca, pomeni 60 GW na VB.)



Slika 26.2 Skupna zagotovljena moč (v MW) vseh vetrnih elektrarn v Republiki Irski od aprila 2006 do aprila 2007 (zgoraj) ter izrezi za obdobje od januarja 2007 do aprila 2007 (sredina) in februar 2007 (spodaj). Potrebe po električni moči na Irskem narastejo do največ 5000 MW. Leta 2007 je bila skupna moč približno 745 MW, razpršena je bila po 60 vetrnih elektrarnah. Podatki so na voljo na www.eirgrid.com in se osvežujejo na 15 minut.

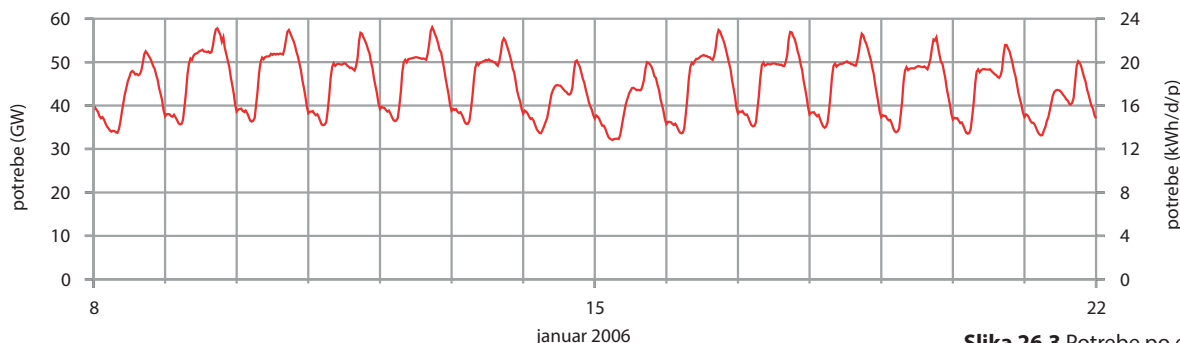
v nekaj minutah. V tem poglavju bomo govorili o tem, kako se spopasti z nihanji v ponudbi in povpraševanju brez rabe fosilnih goriv.

Kako močno je nihanje obnovljivih virov?

Ne glede na to, kako zelo obožujemo obnovljive vire, si moramo priznati, da veter niha.

Nasprotniki vetrne energije bodo rekli: »Vetrna energija je spremenljiva in nepredvidljiva, zato ne more prispevati k varnosti oskrbe. Če postavimo veliko vetrnih elektrarn, bomo morali ohraniti veliko elektrarn na fosilna goriva, da bomo ob padcu vetrne energije zapolnili vrzel.« To mnenje utrjujejo naslovi, kot je »Pomanjkanje vetra v teksaškem omrežju povzročilo izredne razmere«. Po drugi strani zagovorniki vetrne energije težavi zmanjšujejo pomen: »Brez skrbi – proizvodnja posameznih vetrnih elektrarn je morda res spremenljiva, precej manj pa je spremenljiva vsota vseh vetrnih elektrarn na različnih lokacijah.«

Poglejmo konkretne podatke in poskusimo priti do uravnovešenega stališča. Na sliki 26.2 vidimo skupno proizvodnjo vetrnega arzenala Republike Irske med aprilom 2006 in aprilom 2007. Veter očitno je spremenljiv, tudi če seštejemo veliko turbin po vsej državi. Velika Britanija je nekoliko večja od Irske, a ima enako težavo. Med oktobrom 2006 in februarjem 2007 je bila proizvodna moč 1632 britanskih vetrnic 17 dni manj kot 10 % njihove zmogljivosti. V tem obdobju je bila pet dni manj kot 5 % in en dan samo 2 % zmogljivosti.



Slika 26.3 Potrebe po električni moči v Veliki Britaniji v dveh zimskih tednih leta 2006. Leva skala prikazuje nacionalno raven (v GW), desna pa osebno raven (v kWh/d na prebivalca). Podatki so enaki kot na sliki 26.1.

Ocenimo velikost nihanj v proizvodnji elektrike s pomočjo vetra na ravni države. Prva težava so nenadne spremembe, druga pa dolgotrajna zatišja. Poiščimo najhitrejšo kratkotrajno spremembo v posameznem mesecu v irskih podatkih. Moč vetrnih elektrarn na Irskem je 11. februarja 2007 enakomerno padla s 415 MW, kolikor je bila ob polnoči, na 79 MW ob 4h zjutraj. Hitrost spremembe je bila tako 84 MW na uro pri državnem arzenalu z močjo 745 MW. (S hitrostjo sunka želim povedati, kako hitro je zagotovljena moč narasla ali upadla, kar izraža tudi nagib krivulje 11. februarja.) Torej, če skupno moč britanskih vetrnih elektrarn v teoriji povečamo na 33 GW (da zagotavljajo v povprečju 10 GW), lahko pričakujemo občasne sunke s hitrostjo

$$84 \text{ MW/h} \times \frac{33\,000 \text{ MW}}{745 \text{ MW}} = 3700 \text{ MW/h},$$

če predpostavimo, da je v Veliki Britaniji enako kot na Irskem. Torej moramo biti sposobni bodisi *povečevati* moč nadomestkov za vetrno energijo s hitrostjo 3,7 GW na uro – to na primer pomeni 4 jedrske elektrarne, ki vsako uro povečajo moč z nič na polno zmogljivost – bodisi s hitrostjo 3,7 GW na uro v trenutku začeti *zmanjševati* naše potrebe.

Lahko izpolnimo te vetrovne zahteve? V odgovoru na to vprašanje bomo morali še nekaj časa ostati pri »gigavatih«. Gigavati so velike, državi primerne enote za moč. Za državo predstavljajo to, kar kilovatna ura na dan predstavlja za človeka: lepo priročno enoto. Povprečne britanske potrebe po moči so približno 40 GW. Ta nacionalni podatek lahko povežemo z osebno porabo: 1 kWh na dan na prebivalca ustreza 2,5 GW v nacionalnem merilu. Če vsak prebivalec vsak dan porabi 16 kWh elektrike, so potrebe po moči na nacionalni ravni 40 GW.

Je hitrost sunka **4 GW na uro** povsem zunaj okvirov že videnega? Ne. Kot kaže slika 26.3, se britanske potrebe po moči vsako jutro med 6.30 in 8.30 povzpnejo za približno 13 GW, kar pomeni hitrost sunka **6,5 GW na uro**. Elektroinženirji se torej že zdaj vsak dan v elektroenergetskem omrežju soočajo s hitrostjo sunka, ki presega 4 GW na uro. Občasni dodatni sunek na ravni 4 GW na uro, ki bi ga povzročilo nenadno nihanje vetra, torej ni razumen razlog, da bi pokopali idejo o vetrnih elektrarnah velikosti

države. Takšne težave so inženirji že reševali. Ugotoviti moramo le, kako brez fosilnih goriv izenačiti stalno spremenljivo ponudbo in povpraševanje v omrežju. Nočem reči, da je problem vetrnih sunkov že rešen – le to, da je enako velik kot problemi, ki so jih že rešili.

Dobro, preden začnemo iskati rešitve, moramo oceniti velikost druge težave z vetrom: dolgotrajnih zatišij. Na začetku februarja 2007 je bilo na Irskem po vsej državi petdnevno zatišje. Kot vidite na sliki 26.2, to ni bilo nič neobičajnega. Do dva- ali tridnevni zatišij pride nekajkrat na leto.

Zatišje lahko premostimo na dva načina. Energijo pred tem nekje shranimo ali pa za ves ta čas nekako zmanjšamo potrebe. (Ali združimo oboje.) Če imamo vetrne elektrarne z močjo 33 GW, ki zagotavljajo povprečno 10 GW, moramo bodisi vnaprej shraniti bodisi pet dni shajati brez naslednje količine energije:

$$10 \text{ GW} \times (5 \times 24 \text{ h}) = 1200 \text{ GWh.}$$

(Gigavatna ura (GWh) je prikupna enota energije za državo. Britanska poraba elektrike je približno 1000 GWh na dan.)

Prevedimo vrednost na osebno raven: 1200 GWh shranjene energije na državni ravni pomeni 20 kWh shranjene energije na prebivalca. S tolikšnim hranjenjem bi bilo lahko v državi 5 dni 10 GW manj električne moči, za vsakega posameznika pa 5 dni 4 kWh/d manj električne moči.

Obvladovanje zatišij in sunkov

Odpraviti moramo dve težavi – zatišja (dolga obdobja z majhno proizvodnjo obnovljive energije) in sunke (nenadne spremembe v ponudbi ali povpraševanju). Težavi smo predstavili kvantitativno ob predpostavki, da ima Velika Britanija za približno 33 GW vetrnih elektrarn. Če želimo obvladovati zatišja, moramo efektivno shraniti približno 1200 GWh energije (20 kWh na prebivalca). Hitrost sunkov, s katero se moramo znati spopasti, je **6,5 GW na uro** (oz. 0,1 kW na uro na prebivalca).

Obstajata dve rešitvi in obe bi lahko uporabili v takem obsegu, da bi težavi rešili. Prva rešitev je centralizirana, druga pa decentralizirana. Pri prvi energijo shranimo in potem nihanja obvladujemo tako, da vklapljamo in izklapljamo *vir*, ki ga napaja shranjena energija. Pri drugi vklapljamo in izklapljamo *potrebe*.

Prva rešitev je *akumulacija vodne energije v črpalnih hidroelektrarnah*. Pri drugi uporabimo baterije *električnih vozil*, o katerih smo govorili v 20. poglavju. Preden ju opišem, pogledajmo še nekaj drugih idej za obvladovanje sunkov.

Drugi načini obvladovanja sunkov na strani ponudbe

Nekateri obnovljivi viri so vklopljivi in izklopljivi. Če bi imeli veliko enostavno vklopljivih in izklopljivih zmogljivosti za obnovljivo energijo, bi vse težave tega poglavja izpuhte. Države, kot sta Norveška in Švedska, imajo velike zaloge hidroenergije, ki jih lahko vklapljajo in izklapljajo. Kakšne možnosti ima Velika Britanija?

Prvič, lahko bi imeli veliko sežigalnic odpadkov in biomase, torej elektrarn, ki bi opravljale nalogo sedanjih elektrarn na fosilna goriva. Če bi jih zasnovali kot vklopljive in izklopljive, bi to pomenilo stroške, tako kot stroške povzročajo dodatne elektrarne na fosilna goriva, ki delujejo samo občasno: njihovi generatorji bi občasno mirovali, spet drugič pa delali dvakrat močnejše. Poleg tega večina generatorjev ni enako učinkovitih, če jim neprestano povečujemo ali zmanjšujemo hitrost, kot če delujejo s stalno hitrostjo. Dobro, pustimo zdaj stroške, poglavitno vprašanje je, kolikšen bi bil ta vklopljivi in izklopljivi vir. Če bi sežgali vse komunalne odpadke in še enako količino kmetijskih odpadkov, bi s tem zagotovili približno 3 GW povprečne moči. Če bi zgradili objekte, enake *dvakratniku* te moči, da bi torej sežigalnice lahko zagotavljale 6 GW in bi jih uporabljali samo polovico časa, bi zagotavljale 6 GW v času velike porabe, v temnih nočnih urah pa nič. Te elektrarne bi lahko vklapljali in izklapljali v roku ene ure in tako obvladovali sunke hitrosti 6 GW na uro – toda le sunke do 6 GW! Prispevek je sicer koristen, nima pa dovolj velikega razpona, če želimo obvladovati 33-gigavatna nihanja vetrne energije.

Kaj pa hidroenergija? Povprečni faktor izkoriščenosti britanskih hidroelektrarn je 20 %, zato imajo vsekakor potencial vklapljanja in izklapljanja. Poleg tega ima hidroenergija čudovito lastnost: vklapljamo in izklapljamo jo lahko zelo hitro. Novo hidroelektrarno Glendoe z močjo 100 MW bo na primer mogoče od nedelovanja do te vrednosti spraviti v 30 sekundah. To pomeni sunek s hitrostjo 12 GW na uro v eni sami elektrarni! Z dovolj velikim hidro arzenalom bi tako torej že morali biti sposobni obvladovati sunke velikanskih vetrnih elektrarn. A zmogljivost britanskega hidroarzenala zdaj *ni* dovolj velika za takšen prispevek k rešitvi težave (če predpostavimo, da hočemo obvladovati nenadno izgubo 10 ali 33 GW moči vetrnih elektrarn). Skupna moč tradicionalnih hidroelektrarn v Veliki Britaniji je samo približno 1,5 GW.

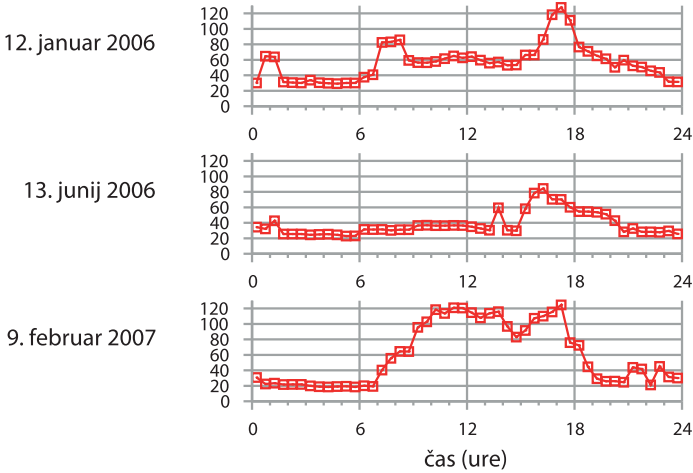
S preprostim vklapljanjem in izklapljanjem drugih obnovljivih virov se v Veliki Britaniji ne bo izšlo. Potrebujemo drugačne rešitve.

Črpalne hidroelektrarne

Črpalne hidroelektrarne z uporabo poceni elektrike vodo potiskajo iz nižjeležečega jezera v višjeležečega. Električno proizvajajo takrat, ko ima veliko vrednost, in sicer s pomočjo enakih turbin kot druge hidroelektrarne.

elektrarna	moč (GW)	padec (m)	prostornina (v milijonih m ³)	shranjena energija (GWh)
Ffestiniog	0,36	320–295	1,7	1,3
Cruachan	0,40	365–334	11,3	10,0
Foyers	0,30	178–172	13,6	6,3
Dinorwig	1,80	542–494	6,7	9,1

Tabela 26.4 Črpalne elektrarne v Veliki Britaniji. Največja potencialna količina shranjene energije v obstoječih črpalnih elektrarnah je približno 30 GWh.



Slika 26.5 Črpalne elektrarne so finančno samozadostne. Cene električne energije v funtih na MWh v treh dneh leta 2006 in 2007.

V Veliki Britaniji so štiri črpalne hidroelektrarne, ki lahko skupaj shranijo 30 GWh (tabela 26.4, slika 26.6). Običajno presežno elektriko hranijo ponoči in jo podnevi vračajo, predvsem v trenutkih konične porabe – kar je, kot kaže slika 26.5, donosen posel. Elektrarna Dinorwig, osupljiva katedrala, vrezana v goro Snowdonie, ima tudi varovalno vlogo: od sebe lahko da dovolj, da ob večjem izpadu ponovno zažene nacionalno omrežje. Od 0 do 1,3 GW moči lahko pride v 12 sekundah.

Dinorwig je kraljica med temi štirimi elektrarnami. Poglejmo karakteristike njenih življenjskih funkcij. V njej lahko shranijo približno 9 GWh energije. Zgornje jezero je kakšnih 500 m nad spodnjim in maksimalna hitrost toka z delovno prostornino 7 milijonov m³ je 390 m³/s, kar omogoča 5-urno zagotavljanje 1,7 GW moči. Izkoristek tega hranilnika energije je 75 %.

Če vklopimo vse štiri črpalne elektrarne hkrati, zagotavljajo moč 2,8 GW. Vklapijo se izjemno hitro, zato lahko obvladujejo kakršno koli hitrost sunkov, ki bi jih povzročala nihanja porabe ali nihanja vetrne energije. A 2,8 GW moči ni dovolj, da bi nadomestila 10 GW ali 33 GW moči vetrnih elektrarn, če bi ta nenadoma usahnila. Poleg tega količina vse shranjene energije (30 GWh) ni niti blizu 1200 GWh, kolikor bi jih želeli shraniti za



Slika 26.6 Llyn Stwlan, zgornje jezero črpalne elektrarne Ffestiniog na severu Walesa. Shranjena energija: 1,3 GWh. Foto: Adrian Pingstone.

čas dolgega zatišja. Bi lahko črpalne hidroelektrarne pomnožili? Si lahko zamislimo, da bi z njimi v celoti razrešili problem zatišij?

Lahko shranimo 1200 GWh?

Urediti želimo veliko večje hranilnike energije, in sicer takšne, v katerih bi lahko hranili 1200 GWh (približno 130-krat več, kot lahko shranijo v elektrarni Dinorwig). Radi bi objekte s skupno močjo približno 20 GW, kar je nekako desetkrat več od moči Dinorwiga. Rešitev s črpalnimi hidroelektrarnami bi bila potemtakem videti takole: zgradili bi kakšnih 12 novih objektov, v katerih bi lahko shranili po 100 GWh – približno desetkrat več kot v Dinorwigu. Črpalna in proizvodna oprema bi bila povsod enaka opremi v Dinorwigu.

V tabeli 26.7 vidimo nekaj načinov hranjenja 100 GWh pri različnih višinskih padcih in ob predpostavki, da imajo generatorji 90-odstotni izkoristek. (Fizikalne osnove, na katerih temelji tabela, najdete v opombah k tem poglavju.)

načini hranjenja 100 GWh		
padec od zgornjega jezera	potrebna delovna prostornina (v milijonih m³)	primer površine jezera ob izbrani globini
500 m	80	2 km² × 40 m
500 m	80	4 km² × 20 m
200 m	200	5 km² × 40 m
200 m	200	10 km² × 20 m
100 m	400	10 km² × 40 m
100 m	400	20 km² × 20 m

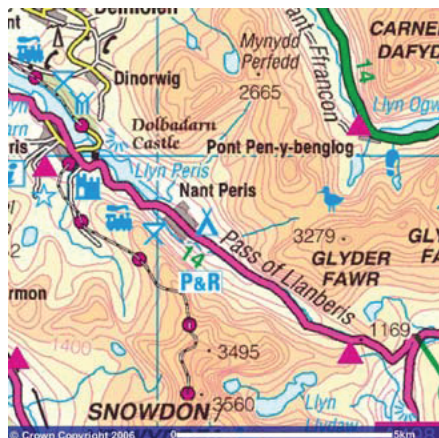
Tabela 26.7 Črpalne hidroelektrarne: kako bi shranili 100 GWh. Za primerjavo z 2. stolpcem: delovna prostornina elektrarne Dinorwig je 7 milijonov m³, prostornina jezera Windermere pa 300 milijonov m³. Za primerjavo s 3. stolpcem: površina umetnega jezera Rutland je 12,6 km², jezera Grafham 7,4 km², jezera v dolini Carron pa 3,9 km². Največje jezero v Veliki Britaniji je Loch Lomond s površino 71 km².

Bi realno lahko našli dvanajst takšnih lokacij? Seveda bi lahko ustvarili nekaj takšnih, kot je Dinorwig v Snowdonii. Dva enako velika objekta bi lahko zgradili na alternativnih lokacijah blizu Ffestinioga, ki sta navedeni v tabeli 26.8. in sta bili v igri v 70. letih prejšnjega stoletja, ko je bil naposled izbran Dinorwig.

predlagana lokacija	moč (GW)	padec (m)	prostornina (v milijonih m³)	shranjena energija (GWh)
Bowydd	2,40	250	17,7	12,0
Croesor	1,35	310	8,0	6,7

Tabela 26.8 Alternativni lokaciji za črpalno elektrarno v Snowdonii. Pri obeh bi spodnje jezero zgradili umetno.

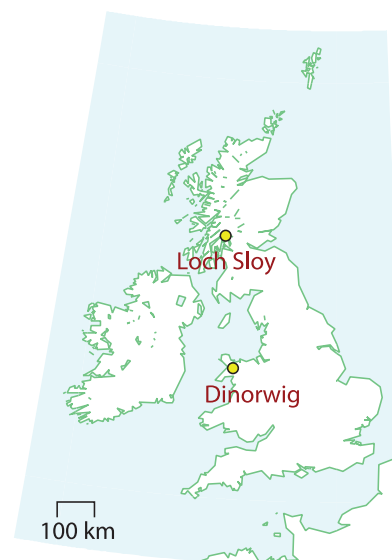
Če bi obstoječe hidroelektrarne na Škotskem izboljšali, bi lahko tam uredili črpalne elektrarne, v katerih bi hranili bistveno več energije kot v Dinorwigu. S preletom zemljevida Škotske naletimo na možno lokacijo, pri kateri bi kot zgornje jezero uporabili Loch Sloy, kot spodnje pa Loch Lomond. Že zdaj ju povezuje majhna hidroelektrarna. Na sliki 26.9



Dinorwig je hranilnik energije z zmogljivostjo 9 GWh, ki za zgornje jezero uporablja Marchlyn Mawr (615V, 620S), za spodnjega pa Llyn Peris (590V, 598S).

Loch Sloy je primer lokacije, kjer bi lahko uredili hranilnik energije z zmogljivostjo 40 GWh.

Slika 26.9 Primerjava elektrarne Dinorwig v narodnem parku Snowdonia ter jezer Loch Sloy in Loch Lomond. Zgornja zemljevida zajemata območji s površino 10-krat 10 km. Na spodnjih zemljevidih modro mrežo sestavljajo enokilometrski kvadrati. Pripravljeni so bili s pomočjo storitve Get-a-map urada Ordnance Survey, www.ordnancesurvey.co.uk/getamap. Objavljeno z dovoljenjem urada Ordnance Survey. © Crown copyright 2006.

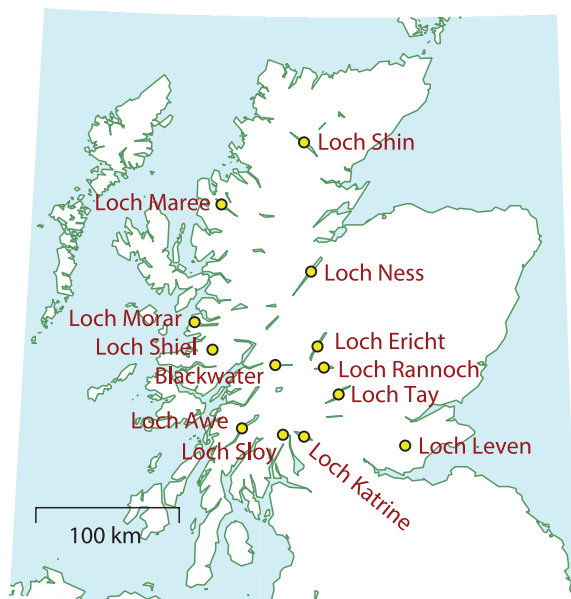


ju vidimo v istem merilu kot jezera elektrarne Dinorwig. Višinska razlika med jezeroma Loch Sloy in Loch Lomond je približno 270 m. Površina Sloya je 1,5 km², že zdaj pa tam lahko shranijo 20 GWh energije. Če bi jez dvignili za 40 m, bi lahko shranili dodatnih 40 GWh energije. Vodna gladina jezera Lomond bi se v enem ciklu spremenila za največ 0,8 m, kar je manj, kot je njen običajni letni odklon (2 m).

Na sliki 26.10 je 13 lokacij na Škotskem s potencialom za črpalne hidroelektrarne. (Na večini od njih hidroelektrarne že stojijo.) Če bi jih deset imelo enak potencial, kot sem ga ocenil za Loch Sloy, bi lahko shranili 400 GWh, kar je tretjina skupne vrednosti, na katero merimo (1200 GWh).

Lahko bi prečesali zemljevid vse Velike Britanije, da bi našli še druge lokacije, najraje blizu velikih vetrnih elektrarn. Lahko bi ustvarili tudi nova umetna jezera v dolinah (nad ustji rek, ki bi jih zajezili), ki se končajo nad morjem, pri čemer bi morje uporabili kot spodnje jezero.

Če pobrskamo po manj konvencionalnih možnostih, lahko odmislimo naravna in umetna jezera ter polovico objekta namestimo



Slika 26.10 Škotska jezera s potencialom za črpalne elektrarne.

v podzemno komoro. Obstajajo predlogi za črpalno komoro kilometer pod Londonom.

Kot kaže, bi lahko z gradnjo črpalnih hidroelektrarn povečali maksimalno količino shranjene energije s 30 GWh na 100 GWh ali celo na 400 GWh. Doseči 1200 GWh, kot smo upali, pa bo težko. K sreči obstaja druga rešitev.

Upravljanje potreb z električnimi vozili

Povzemimo naše zahteve: hraniti – ali brez težav pogrešiti – želimo 1200 GWh energije, kar je 20 kWh na prebivalca, ter obvladovati nihanja v oskrbi, ki segajo do 33 GW, kar je 0,5 kW na prebivalca. Številke so razveseljivo podobne količinam energije in potrebne moči za električne avtomobile. Tisti, o katerih smo govorili v 20. poglavju, lahko hranijo med 9 kWh in 53 kWh energije. Nacionalni vozniki park s 30 milijoni električnih vozil bi lahko shranil za skoraj 20 kWh energije na prebivalca! Tipični polnilniki baterij potrebujejo moč 2 ali 3 kW. Če bi hkrati vklopili 30 milijonov polnilnikov, bi povzročili približno 60-gigavatno spremembo na strani povpraševanja! Če bi elektrificirali ves promet v državi, bi za napajanje potrebovali povprečno 40 ali 50 GW moči. Uvajanje električnih avtomobilov, kot ga predlagam v 20. poglavju, in izgradnja vetrnih elektrarn s skupno močjo 33 GW, ki bi zagotavljale povprečno 10 GW, se torej skoraj ujemata.

Ujemanje bi lahko izkoristili takole: električne avtomobile bi doma ali v službi priklapljali na pametne polnilnike. Ti bi poznali tako vrednost



Slika 26.11 Črpalna elektrarna Okinawa, ki za spodnje jezero uporablja ocean. Shranjena energija: 0,2 GWh. Objavljeno z dovoljenjem J-Power. www.ieahydro.org.

elektrike kot vznikalne zahteve (na primer »avto mora biti napolnjen v ponedeljek ob 7h zjutraj«). Polnilnik bi vznikalne zahteve pametno izpolnil tako, da bi žrl elektriko, kadar piha veter, in se izklopil, kadar bi veter pojenjal ali bi se povečale druge potrebe. Pametni polnilniki bi pri prilaganju omrežju opravljali koristno delo, ki bi bilo lahko finančno nagrajeno.

Posebej zanesljivo rešitev bi dobili, če bi bile baterije avtomobilov zamenljive. Zamislite si, skočili bi do polnilnice in namesto svojih izpraznjenih baterij vstavili nove. Za polnjenje bi bili zadolženi v polnilnici, in to bi lahko počeli ob pravem času, pri čemer bi polnilnike uravnavali tako, da bi bila skupna ponudba in povpraševanje ves čas uravnotežena. Zamenljive baterije so posebej zanesljiva rešitev zato, ker bi bilo lahko v skladiščih polnilnic na milijone rezervnih baterij. Te bi bile dodaten blažilec v času zatišja. Ljudje bodo rekli: »Groza! Svojih baterij že ne bi zaupal polnilnici. Kaj, če bi mi podtaknili zanič blago?« Prav tako bi danes lahko rekli: »Kaj, če bi mi na bencinski postaji dali z vodo razredčen bencin?« Jaz bi veliko raje vozil avto, ki bi ga vzdrževal profesionallec, ne pa trot, kakršen sem jaz.

Povzemimo možnosti. Nihajoče povpraševanje in nihajočo ponudbo lahko držimo v ravnovesju z vklapljanjem in izklapljanjem *generatorjev* moči (na primer sežigalnic odpadkov ali hidroelektrarn), s *hranjenjem* energije in z njeno obnovo, ko jo potrebujemo, ali z vklapljanjem in izklapljanjem *potreb*.

Po obsegu je najobetavnejša možnost vklapljanje in izklapljanje potreb po moči pri polnjenju električnih avtomobilov. S 30 milijoni avtomobilov, ki imajo vsak za 40 kWh baterij (nekaj od teh bi jih lahko bilo zamenljivih in bi čakale v polnilnicah), dosežemo 1200 GWh. Če bi elektrificirali tudi tovarni promet, bi bila skupna zmogljivost hranjenja še večja.

Vetrne elektrarne in električna vozila se krasno ujemajo. Če bi število električnih vozil povečevali hkrati z vetrnimi elektrarnami, približno 3000 novih vozil za vsako 3-megavatno turbino, in če zagotovimo pametne sisteme polnjenja, bi s to sinergijo močno pripomogli k reševanju težav z nihanjem vetrne energije. Če sem se v napovedi o avtomobilih na vodik zmotil in bodo prav ti postali nizkoenergijska vozila naše prihodnosti, bi kombinacijo vetrnih elektrarn in električnih vozil seveda lahko nadomestili s kombinacijo vetra in vodika. Z vetrnimi turbinami bi proizvajali elektriko in kadar bi je bilo dovolj, bi pridobivali vodik in ga shranjevali v rezervoarje za poznejšo rabo v vozilih ali kje drugje, na primer pri proizvodnji stekla.

Druge oblike upravljanja potreb in hranjenja energije

Poglejmo, kako lahko še drugače upravljamo potrebe in hranimo energijo.

Ideja o tem, da bi hitrost, s katero proizvajamo stvari, prilagajali moči obnovljivega vira, ni nič novega. Številne tovarne aluminija stojijo blizu hidroelektrarn; več kot je dežja, več aluminija proizvedejo. Kadarkoli se energija porablja za izdelavo stvari, ki jih lahko shranimo, obstaja potencial za pametno vklapljanje in izklapljanje teh potreb po energiji. Vzemimo sisteme, ki delujejo na osnovi reverzne osmoze (s katero iz morske vode pridobivamo pitno, glejte str. 92) – ti so v mnogih državah veliki porabniki energije (a ne v Veliki Britaniji). Še en proizvod, ki ga lahko hranimo, je toplota. Če bi elektrificirali sisteme ogrevanja in hlajenja, predvsem ogrevanja vode in zraka, kot predlagam v 21. poglavju, bi v omrežju pridobili veliko enostavno vklopljivih in izklopljivih porabnikov energije. Dobro izolirane stavbe dolgo zadržujejo toploto, zato lahko čas ogrevanja prilagajamo. V stavbe bi lahko namestili tudi velike hranilnike toplote in v času presežka elektrike toploto s toplotno črpalko črpali vanje ali iz njih, z drugo črpalko pa toploto ali hlad iz hranilnikov dovajali v prostore, kjer bi ju potrebovali.

Avtomatsko upravljanje potreb po elektriki bi bilo preprosto. Najenostavnejši način je, da naprave, kot sta hladilnik in zamrzovalnik, spremljajo frekvenco v vtičnici. Kadar v omrežju primanjkuje elektrike, frekvenca pade pod standardno vrednost 50 Hz, ob presežku pa se povzpne nad 50 Hz. (Tako kot dinamo na kolesu: ko prižgete luči, morate za dodatno moč poganjati močnejše, v nasprotnem primeru vozite počasneje.) Hladilnike je mogoče prilagoditi tako, da rahlo uravnavajo svoje notranje termostate glede na frekvenco omrežja in tako energijo porabljajo takrat, ko to koristi omrežju, ne da bi pri tem kadarkoli ogrozili temperaturo vašega masla.

Lahko upravljanje potreb predstavlja velik del virtualnega hranjenja? Kako velik ponor moči so vsi hladilniki v državi? Tipični hladilnik z zamrzovalnikom rabi povprečno 18 W. Vzemimo, da imamo približno 30 milijonov hladilnikov. Potencialni izklop vseh hladilnikov v državi za nekaj minut bi ustrezal 0,54 GW avtomatsko nastavljive moči. To je kar precej – več kot odstotek skupne nacionalne vrednosti. Za podobno vrednost se potrebe nenadno povečajo, kadar vsi ljudje, kot eno združeni pri verskem obredu (na primer spremljanju EastEnderjev), med oglasi hkrati vklopijo grelnik za vodo. Takšni »oglasni« skoki potrebe povečajo običajno za 0,6 do 0,8 GW. Z avtomatskim izklapljanjem vseh hladilnikov bi *skoraj* uravnotežili te dnevne skokce zaradi enoglasnega gretja vode. Pametni hladilniki bi lahko pomagali tudi pri glajenju kratkotrajnih nihanj vetrne energije. Oglasni skoki ob najsvetejših obredih (na primer spremljanju nogometne tekme med Anglijo in Švedsko) lahko potrebe nenadno povečajo za več kot 2 GW. V takšnih primerih povpraševanje in ponudbo ohranja v ravnovesju sam Dinorwig v vsej svoji mogočnosti.

Da bi imeli upravljavci elektroenergetskega omrežja, ki neprestano uravnavajo moč elektrarn in tako zagotavljajo ravnovesje med proizvodnjo in porabo, več manevrskega prostora, ima veliko industrijskih odjemalcev elektrike posebne pogodbe, ki upravljavcem dovoljujejo njihov izklop v zelo kratkem roku. V Južni Afriki (kjer so primanjkljaji elektrike pogosti) v tisoče in tisoče gospodinjstev nameščajo radijsko vodene sisteme upravljanja potreb, ki naj bi upravljali klimatske naprave in električne kotle za toplo vodo.

Danska rešitev

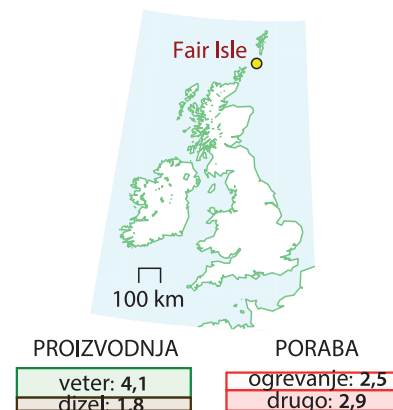
Poglejmo, kako spremenljivost vetrne energije obvladujejo na Danskem. Danci efektivno plačujejo drugim državam, da lahko njihove hidroelektrarne uporabljajo kot hranilnike. Skoraj vso elektriko iz vetrnih elektrarn izvažajo svojim evropskim sosedam in nekatere od teh imajo hidroelektrarne, ki jim lahko zmanjšujejo moč in tako ohranjajo ravnovesje. Prihranjeno elektriko iz hidroelektrarn nato v obdobju šibkega vetra in velike porabe prodajajo nazaj Dancem (po višji ceni). Energija iz danskih vetrnih elektrarn je tako koristno porabljena, skupna moč hidroelektrarn pa sistemu v celoti zagotavlja precejšnjo varnost.

Bi lahko Velika Britanija prevzela dansko rešitev? Potrebovali bi neposredne, zelo zmogljive povezave z državami, ki imajo veliko vklopljivih in izklopljivih hidroelektrarn, ali pa močno povezavo z vseevropskim elektroenergetskim omrežjem.

Moč norveških hidroelektrarn je 27,5 GW, švedskih približno 16 GW, islandskih pa 1,8 GW. Leta 2003 je bila v načrtu 1,2-gigavatna visokonapetostna enosmerna medomrežna povezava z Norveško, vendar ni bila zgrajena. Leta 2010 bodo vzpostavili povezavo z Nizozemsko z 1-gigavatnim vodom BritNed. Danska ima za 3,1 GW vetrnih elektrarn in 1-gigavatno povezavo z Norveško, 0,6-gigavatno s Švedsko in 1,2-gigavatno z Nemčijo. Skupna izvozna moč je tako 2,8 GW in je skoraj enaka skupni moči vetrnih elektrarn. Če bi Velika Britanija hotela tako kot Danska izvažati vso presežno elektriko iz vetrnih elektrarn, bi (ob predpostavki, da je skupna moč teh elektrarn 33 GW) potrebovala na primer 10-gigavatno povezavo z Norveško, 8-gigavatno s Švedsko in 1-gigavatno z Islandijo.

Rešitev z dvema omrežjema

Radikalnejša rešitev bi bila vetrne elektrarne in druge spremenljive vire priklopiti na ločeno elektroenergetsko omrežje, s katerim bi napajali sisteme, ki ne potrebujejo zanesljive oskrbe z energijo, na primer ogrevanje in polnjenje baterij električnih vozil. Na škotskem otoku Fair Isle (70 prebivalcev, površina 5,6 km²) imajo že več kot 25 let (od leta 1982) dve elektroenergetski omrežji za distribucijo elektrike iz dveh vetrnih turbin, po potrebi pa še iz dizelskega generatorja. Eno omrežje zagotavlja standardno



Slika 26.12 Proizvodnja in poraba elektrike na otoku Fair Isle v obdobju 1995–1996. Vsi podatki so v kWh/d na prebivalca. Proizvodnja presega porabo, saj je bilo 0,6 kWh/d na prebivalca zavrženih.

oskrbo z elektriko, drugi komplet kablov pa skrbi za ogrevanje na elektriko. Električna za ogrevanje prihaja večinoma iz presežkov vetrnih turbin, ki bi sicer šli v nič. Posamezne kotle za toplo vodo in termoakumulacijske peči v posameznih stavbah upravljajo daljinski programirljivi frekvenčni releji. Naprave o tem, kdaj se lahko vklopijo, obveščajo s pomočjo frekvence omrežja. Vsako gospodinjstvo ima do šest frekvenčnih kanalov, zato sistem v resnici deluje kot sedem omrežij. Poleg tega so na Fair Isle uspešno preskusili hranilnik kinetične energije (vztrajnik), ki ob nihanju moči vetra shrani energijo v 20 sekundah.

Električna vozila kot generatorji

Če bi bilo 30 milijonov električnih vozil pripravljenih ob primanjkljajih elektrike v nacionalnem omrežju svoje polnilnike pognati v nasprotni smeri in energijo vračati v omrežje, potem bi pri 2 kW na vozilo dobili 60-gigavatni potencialni vir moči, kar je skoraj enako moči vseh elektrarn v državi. Tudi če bi hkrati priklopili in dali na voljo samo tretjino vozil, bi še vedno imeli 20-gigavatni potencialni vir moči. Če bi vsa vozila v izrednih razmerah darovala po 2 kWh energije – to je približno 20 % hranilne zmogljivosti njihove baterije –, bi vozni park skupaj prispeval 20 GWh, dvakrat več kot črpalna hidroelektrarna Dinorwig.

Druge tehnologije hranjenja energije

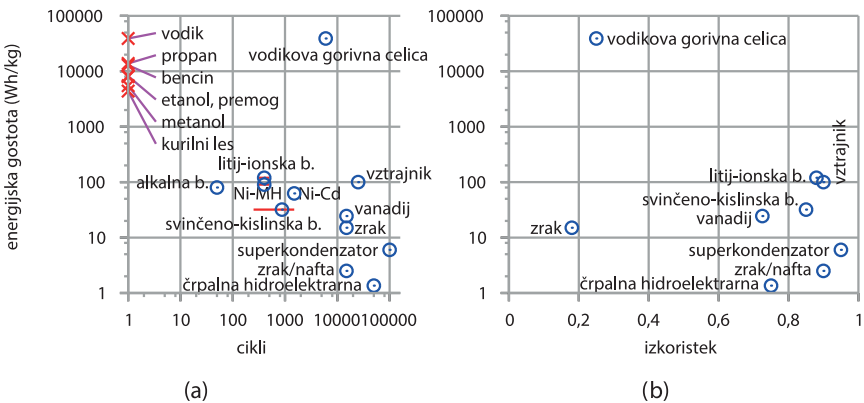
Obstaja veliko drugih načinov hranjenja energije pa tudi veliko meril, po katerih rešitve ocenjujemo. Na sliki 26.13 vidimo tri najpomembnejša merila: energijsko gostoto (koliko energije se shrani na kilogram hranilnika), izkoristek (koliko energije dobimo nazaj na enoto vložene energije) in življenjsko dobo (koliko ciklov shranjevanja lahko opravimo, preden hranilnik potrebuje prenovno). Druga pomembna merila so: maksimalna hitrost, s katero energijo črpamo v hranilnik ali iz njega in jo pogosto izrazimo v moči na kg, trajanje hrambe energije v hranilniku, seveda pa tudi stroški in varnost hranilnika.

Vztrajniki

Na sliki 26.15 je zverinski vztrajnik, ki s kratkimi, do 0,4-gigavatnimi izbruhi moči napaja eksperimentalni objekt. Tehta 800 t. Z 225 vrtljaji na minuto lahko shrani 1000 kWh, njegova energijska gostota pa je približno 1 Wh na kg.



Slika 26.15 Gradnja enega od dveh vztrajnikov v fuzijskem raziskovalnem objektu v Culhamu. Foto: EFDA-JET. www.jet.efda.org.



Slika 26.13 Lastnosti hranilnikov energije in goriv. (a) Energijska gostota (na logaritemski skali) v primerjavi z življenjsko dobo (številom ciklov). (b) Energijska gostota v primerjavi z izkoristkom. Podatki o energijski gostoti ne vključujejo mase rezervoarja hranilnika razen v primeru »zraka« (sistemi na stisnjen zrak). Če upoštevamo maso kriogenskega rezervoarja za vodik, se energijska gostota vodika zmanjša z 39.000 Wh/kg na približno 2400 Wh/kg.

gorivo	kalorična vrednost	
	(kWh/kg)	(MJ/l)
propan	13,8	25,4
bencin	13,0	34,7
dizelsko gorivo	12,7	37,9
reaktivno gorivo	12,8	37,0
kurilno olje	12,8	37,3
etanol	8,2	23,4
metanol	5,5	18,0
bioetanol		21,6
premog	8,0	
kurilni les	4,4	
vodik	39,0	
zemeljski plin	14,85	0,04

(a)

Tabela 26.14 (a) Kalorična vrednost (energijska gostota na kg in na liter) izbranih goriv (v kWh na kg in MJ na liter). (b) Energijska gostota izbranih baterij (v Wh na kg). 1 kWh = 1000 Wh.

vrsta baterije	energijska gostota	življenjska doba (cikli)
nikelj-kadmijeva	45–80	1500
NiMH	60–120	300–500
sviņeno-kislinska	30–50	200–300
litij-ionska	110–160	300–500
litij-ionski polimer	100–130	300–500
polnljiva alkalna	80	50

(b)

Vztrajniški hranilnik energije v dirkalniku lahko shrani 400 kJ (0,1 kWh) energije in tehta 24 kg (str. 126). Energijska gostota je torej 4,6 Wh na kg.

Energijska gostota hitrih vztrajnikov iz sestavljenih materialov lahko doseže 100 Wh/kg.

Superkondenzatorji

S superkondenzatorji shranjujemo majhne količine električne energije (do 1 kWh), in sicer tam, kjer potrebujemo veliko ciklov in hitro polnjenje. Bolje kot baterije se na primer obnesejo pri regenerativnem zaviranju v vozilih, ki veliko ustavljajo in speljujejo. Na voljo so takšni z energijsko gostoto 6 Wh/kg.

Pri ameriškem podjetju EESstor trdijo, da z barijevim titanatom lahko izdelajo veliko boljši superkondenzator, energijska gostota katerega je 280 Wh/kg.

Vanadijeve baterije s povratnim tokom

Podjetje VRB power systems je izdelalo hranilnik 12 MWh energije za vetrno elektrarno Sorne Hill na Irskem, pri kateri se sedanja moč »32 MW« poveča na »39 MW«. (VRB pomeni vanadijeva redox baterija s povratnim tokom.) Hranilnik je v resnici velika »baterija s povratnim tokom«, redox regenerativna gorivna celica, z nekaj rezervoarji, polnimi vanadija v različnih kemijskih stanjih. Proizvodnjo vetrne elektrarne lahko uravnovesi v nekaj minutah, vendar tretjino moči elektrarne (med zatišjem vetra) lahko zagotavlja največ eno uro.

Vanadijev hranilnik, ki shrani 1,5 MWh energije in stane 480.000 USD, meri 70 m² in tehta 107 ton. Življenjska doba vanadijeve redox baterije s povratnim tokom je več kot 10.000 ciklov. Polniti jo je mogoče z enako hitrostjo, kot se prazni (v nasprotju s svinčeno-kislinsko baterijo, ki jo je treba polniti petkrat počasneje). Izkoristek polnega cikla je 70 do 75 %. Za hranjenje 20 kWh potrebujemo približno 1 m³ 2-molarne raztopine vanadija v žveplovi kislini. (To pomeni 20 Wh/kg.)

Za hranjenje 10 GWh bi torej potrebovali 500.000 m³ (170 bazenov) – na primer 2 m visoke rezervoarje s površino 500 x 500 m.

Povečanje obsega vanadijeve tehnologije na takšno raven (10 GWh), da bi se kosala z veliko črpalno elektrarno, bi utegnilo imeti opazen učinek na svetovni trg vanadija, vendar pa vanadija na dolgi rok ne bo primanjkovalo. Globalno ga proizvedemo 40.000 ton na leto. Hranilnik z 10 GWh bi ga vseboval 36.000 ton – približno vso letno proizvedeno količino. Vanadij sedaj pridobivajo kot stranski produkt drugih procesov, skupne svetovne zaloge pa ocenjujejo na 63 milijonov ton.

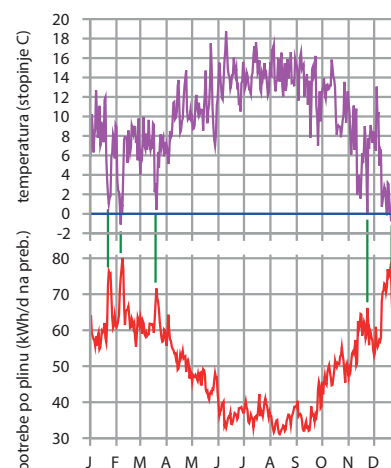
»Gospodarne« rešitve

V sedanjem svetu, ki ne razmišlja o stroških onesnaženja z ogljikom, se vsak hranilnik energije ocenjuje glede na finančni prag, ki ga določa umazana alternativa: dodatne potrebe lahko namesto s hranjenjem izpolnimo tako, da preprosto zgradimo še eno termoelektrarno na plin več, vso presežno elektriko pa razmetavamo v grelnikih.

Sezonska nihanja

Najdaljša nihanja ponudbe in povpraševanja so povezana z letnimi časi. Najobsežnejšega povzročča ogrevanje, ki porabo vedno poveča pozimi. Britanska poraba zemeljskega plina se spreminja vse leto, od tipičnega povprečja 36 kWh/d na prebivalca julija in avgusta do povprečja 72 kWh/d na prebivalca med decembrom in februarjem, ekstremi pa segajo od 30 do 80 kWh/d na preb. (slika 26.16).

Letna nihanja poznajo tudi nekateri obnovljivi viri – poleti je več sončne energije in manj vetrne.



Slika 26.16 Potrebe po plinu (spodnji graf) in temperatura (zgornji graf) v Veliki Britaniji leta 2007.

Kako vijugati med temi dolgotrajnimi nihanji? Z električnimi vozili in črpalnimi elektrarnami ne bomo mogli shraniti zadostnih količin. Dolgoročno hranjenje toplote bo zagotovo uporabna tehnologija. V veliki skali ali velikem rezervoarju vode lahko shranite toliko toplote, da z njo ogrevate stavbo vso zimo – to idejo podrobneje opišem v poglavju E. Na Nizozemskem poletno toploto iz cest shranjujejo v vodonosnikih in jo pozimi s toplotnimi črpalkami dovajajo v stavbe [2wmuw7].

Opombe

stran

187 *Skupna proizvodnja vetrnega arzenala Republike Irske*. Vir podatkov: eirgrid.com [2hxf6c].

- »Pomanjkanje vetra v tekšaškem omrežju povzročilo izredne razmere«. [2199ht] Četudi bo slišati nenavadno, sem sam iz članka pravzaprav razbral, da je šlo za običajno delovanje omrežja. Omrežje ima industrijske odjemalce, pri katerih se oskrba ob neskladju med povpraševanjem in ponudbo lahko prekrine. Moč vetrnih elektrarn je upadla za 1,4 GW v času, ko so se potrebe Teksačanov povečale za 4,4 GW, kar je povzročilo natanko takšno neskladje med povpraševanjem in ponudbo. Oskrba, ki jo je mogoče prekiniti, se je prekinila. Vse je delovalo, kot bi moralo.

Naj navedem še en primer, kjer bi prišlo prav boljše načrtovanje elektroenergetskega sistema: »Španske vetrne elektrarne z rekordno proizvodnjo, odredili prekinitev.« [3x2kvv] Povprečne potrebe po moči v Španiji so 31 GW. V torek, 4. marca 2008, so vetrne elektrarne zagotavljale 10 GW. »Španski trg električne energije postaja posebej občutljiv na nihanja vetrne energije.«

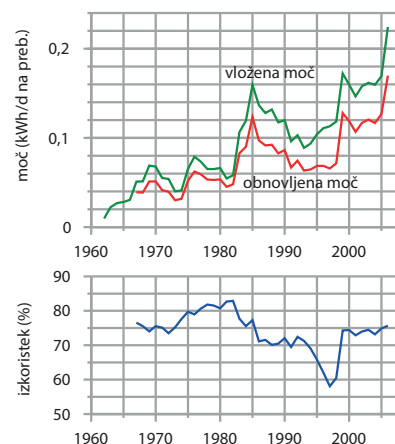
- *Zagovorniki vetrne energije težavi zmanjšujejo pomen: »Brez skrbi – proizvodnja posameznih vetrnih elektrarn je morda res spremenljiva, precej manj pa je spremenljiva vsota vseh vetrnih elektrarn na različnih lokacijah.«* Glejte na primer spletno stran yes2wind.com, ki naj bi »razbila mit, da vetrne elektrarne niso zanesljive«, in kjer trdijo, da so »odkloni v proizvodnji vetrnih elektrarn, od koder se elektrika distribuira po državi, komaj opazni«. www.yes2wind.com/intermittency_debunk.html
 - *Veter očitno je spremenljiv, tudi če seštejemo veliko turbin po vsej državi. Velika Britanija je nekoliko večja od Irske, a ima isto težavo.* Vir: Oswald in sod. (2008).
- 191 *Izkoristek črpalne hidroelektrarne Dinorwig je 75 %*. Podatki so na sliki 26.17. Dodatne informacije o elektrarni Dinorwig in alternativnih lokacijah za črpalne elektrarne: Baines in sod (1983, 1986).

192 *Tabela 26.7*. Potrebno delovno prostornino izpeljemo iz višinskega padca h po naslednji enačbi. Če velja, da je ϵ izkoristek pretvorbe potencialne energije v elektriko, potem je

$$V = 100 \text{ GWh}/(\rho g h \epsilon),$$

pri čemer je ρ gostota vode, g pa gravitacijski pospešek. Predpostavil sem, da je izkoristek generatorjev enak $\epsilon = 0,9$.

192 *Tabela 26.8. Alternativni lokaciji za črpalne elektrarne*. Za zgornje jezero elektrarne Bowydd so predlagali Llyn Newydd s koordinatami SH 722 470, za Croesor pa Llyn Cwm-y-Foel s koordinatami SH 653 466.



Slika 26.17 Izkoristek štirih britanskih črpalnih elektrarn.

- 193 Če bi deset škotskih črpalnih elektrarn imelo enak potencial kot Loch Sloy, bi lahko shranili 400 GWh. To grobo oceno potrjuje raziskava Univerze Strathclyde [5o2xgu], v kateri navajajo 14 lokacij z ocenjeno zmogljivostjo hranjenja 514 GWh.
- 196 Hladilnike je mogoče prilagoditi tako, da rahlo uravnavajo svoje notranje termostate glede na frekvenco omrežja. [2n3pmb] Dodatne spletne povezave: Dynamic Demand www.dynamicdemand.co.uk, www.rltec.com, www.responsiveload.com.
- 197 V Južni Afriki /.../ nameščajo sisteme upravljanja potreb. Vir: [2k8h4o]
- Danci skoraj vso elektriko iz vetrnih elektrarn izvažajo svojim evropskim sosedam. Vir: Sharman (2005).
- 198 Na škotskem otoku Fair Isle imajo že več kot 25 let (od leta 1982) dve elektroenergetski omrežji. www.fairisle.org.uk/FIECo/
Hitrost vetra je večino časa med 3 m/s in 16 m/s, najverjetnejša hitrost je 7 m/s.
- 199 Slika 26.13. Izkoristek hranjenja. Litij-ionske baterije: 88 %. Vir: www.national.com/appinfo/power/files/swcap_eet.pdf
Svinčeno-kislinske baterije: 85–95 %. Vir: www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm
Stisnjen zrak: 18 %. Vira: Lemofouet-Gatsi in Rufer (2005), Lemofouet-Gatsi (2006). Glejte tudi Denholm in sod. (2005).
Zrak/nafta: hidravlični akumulatorji, kakršne v tovarnjakih uporabljajo za regenerativno zaviranje, so hranilniki na stisnjen zrak, pri katerih izkoristek cikla lahko doseže 90 %, ob čemer se zajame 70 % kinetične energije. Vira: Lemofouet-Gatsi (2006), [5cp27j].
- Tabela 26.14. Viri: Xtronics xtronics.com/reference/energy_density.htm, Battery University [2sx1yj]; vir podatkov o vztrajniku Ruddell (2003).
Najnovejše baterije z največjo energijsko gostoto so litij-žveplene in litij-sulfidne, gostota katerih je 300 Wh/kg.
Nekateri streznjeni navdušenci nad vodikom se očitno pomikajo po periodnem sistemu navzgor in se spreminjajo v navdušence nad borom. Energijska gostota bora (če predpostavimo, da ga boste spremenili v B_2O_3) je 15.000 Wh na kg, kar je lepo in veliko. Predstavljam pa si, da bo moj glavni pomislek glede vodika veljal tudi za bor: proizvodnja goriva (v tem primeru bora iz borovega oksida) bo v energijskem smislu neučinkovita in tak bo tudi proces izgorevanja.
- 200 Vanadijeve baterije s povratnim tokom. Viri: www.vrbpower.com, irska vetrna elektrarna [ktd7a];
hitrost polnjenja [627ced]; globalna proizvodnja [5fas17].
- 201 /.../ poletno toploto iz cest shranjujejo v vodonosnikih /.../ [2wmuw7].



Slika 26.18 Možna lokacija za novo črpalno elektrarno z zmogljivostjo 7 GWh. Dolina Croesor leži nekoliko proti levi med zašiljenim vrhom (Cnicht) na levi in bolj zaobljenimi vrhovi (Moelwyni) na desni.

27 *Pet energetskih načrtov za Veliko Britanijo*

Če se hočemo rešiti zasvojenosti s fosilnimi gorivi, potrebujemo radikalen načrt. In v njem se morata poraba in proizvodnja izenačiti. Poleg tega potrebuje politično in finančno osnovo, a politika in ekonomija nista del argumentacije te knjige, zato bom v tem poglavju preprosto govoril o tem, kakšna bi bila tehnična plat načrta, ki se izide.

Načrtov, ki se izidejo, je veliko. Opisal jih bom pet. Ne vzemite tega kot »rešitve po priporočilu avtorja«. Moje edino priporočilo je:

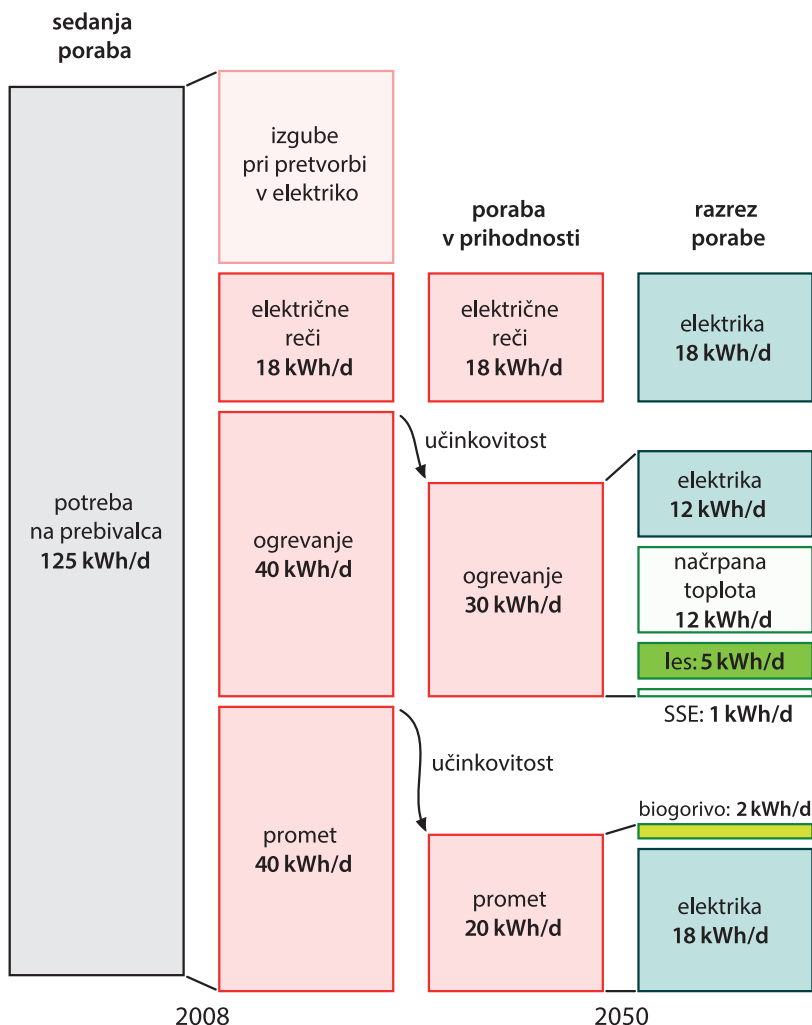
Poskrbite, da bodo vaše strategije vsebovale načrt, ki se izide!

Vsak načrt ima dva vidika, vidik porabe in vidik proizvodnje: opredeliti moramo, koliko energije bo država porabila in kako jo bomo proizvedli. Da načrti ne bi zavzeli preveč prostora, bom preučeval karikirano Veliko Britanijo, v kateri energijo porabljamo v samo treh oblikah: v prometu, pri ogrevanju in v obliki elektrike. To je skrajna poenostavitev, pri kateri zanemarimo industrijo, kmetijstvo, hrano, uvoz in tako naprej. Upam pa, da je koristna in da bomo tako lahko zelo hitro primerjali in soočili alternativne načrte. Sčasoma bomo potrebovali podrobnejše načrte, a če vprašate mene, smo danes še tako daleč od cilja, da je preprosta ilustracija najboljši način, da zajamemo vsa odprta vprašanja.

Predstavil bom nekaj načrtov, ki so v Veliki Britaniji do leta 2050 po mojem prepričanju tehnično izvedljivi. Vidik porabe bo pri vseh enak. Ponovno poudarjam, da to ne pomeni, da se mi zdi to pravilen načrt porabe ali celo edini možni. Preprosto bi vam rad prizanesel s celo kopico različic. Na strani proizvodnje bom opisal različne možnosti z različnimi kombinacijami obnovljivih virov, »čistega premoga« in jedrske energije.

Sedanje stanje

Takole je videti sedanje stanje v naši karikirani državi. Za promet (tako ljudi kot stvari) potrebujemo 40 kWh/d na prebivalca. Večino tega sedaj porabimo v obliki bencina, dizelskega goriva ali reaktivnega goriva. Za ogrevanje zraka in vode potrebujemo 40 kWh/d na prebivalca. Večino tega sedaj zagotavlja zemeljski plin. Elektrike je za 18 kWh/d na preb., za njeno proizvodnjo pa uporabljamo gorivo (večinoma premog, plin in jedrska energija) z energijsko vsebnostjo 45 kWh/d na preb. Preostalih 27 kWh/d na preb. se izgubi v hladilnih stolpih (25 kWh/d na preb.) in žicah distribucijskega omrežja (2 kWh/d na preb.). Skupnega energijskega vložka v karikirani državi je za 125 kWh/d na prebivalca.



Slika 27.1 Poraba »karikirane Britanije leta 2008« na prebivalca (leva stolpca) ter načrt porabe v prihodnosti in možen razrez goriv (desna stolpca). Načrt predvideva, da se poraba elektrike poveča z 18 na 48 kWh/d na prebivalca.

Skupne značilnosti vseh petih načrtov

V moji karikirani državi prihodnosti porabo energije zmanjšamo z uporabo učinkovitejše tehnologije v prometu in pri ogrevanju.

V vseh petih načrtih za prihodnost je **promet** večinoma elektrificiran. Električni motorji so učinkovitejši od bencinskih, zato se potrebe po energiji v prometu zmanjšajo. Javni promet (ki je prav tako večinoma elektrificiran) je bolje integriran, bolje prilagojen posamezniku in bolje podprt. Predpostavil sem, da promet z elektrifikacijo postane približno štirikrat učinkovitejši in da gospodarska rast nekaj teh prihrankov izniči, zato je neto učinek prepolovitev porabe energije v prometu. Nekaj osnovnih vozil ni mogoče elektrificirati na enostaven način, zato posebej zanje proizvajamo tekoča goriva (na primer biodizel, biometanol ali celulozni bioetanol). Porabo v prometu sestavljata elektrika z 18 kWh/d na preb. in tekoča goriva z 2 kWh/d na preb. Baterije električnih vozil uporabljamo za hrambo

energije in tako lažje obvladujemo nihanja v ponudbi in povpraševanju po elektriki. Za proizvodnjo biogoriv potrebujemo približno 12 % površine Velike Britanije (500 m² na prebivalca), če jih proizvajamo iz rastlin z enodstotnim izkoristkom in če ima pretvorba iz rastlin v gorivo 33-odstotni izkoristek. Druga možnost je uvoz biogoriv, če nam uspe prepričati druge države, da biogorivom za naše potrebe namenijo potrebno površino kmetijske zemlje (v velikosti Walesa).

V vseh petih načrtih porabo energije za **ogrevanje** zmanjšamo z boljšo izolacijo vseh stavb in boljšim upravljanjem temperature (s termostati, izobraževanjem in seksi oglasi za puloverje). Nove stavbe (vse zgrajene po letu 2010) so zelo dobro izolirane in skoraj ne potrebujejo ogrevanja. Stare (ki bodo leta 2050 še vedno v večini) se ogrevajo večinoma s toplotnimi črpalkami zrak/voda in zemlja/voda. Vodo ogrevamo deloma s SSE (2,5 kvadratnega metra na vsaki hiši), deloma s toplotnimi črpalkami in deloma z elektriko. Nekatere stavbe, ki so blizu vzdrževanih gozdov in posevkov energijskih rastlin, se ogrevajo na biomaso. Moč, potrebno za ogrevanje, tako zmanjšamo s prvotnih 40 kWh/d na preb., novo vrednost pa sestavljajo elektrika z 12 kWh/d na preb., topla voda, ogreta s pomočjo sonca, z 1 kWh/d na preb. in les s 5 kWh/d na preb.

Les za proizvodnjo toplote (ali po možnosti soproizvodnjo toplote in električne energije) prihaja iz bližnjih gozdov in posevkov energijskih rastlin (kot so miskant, vrba ali topol) s površino 30.000 km² oz. 500 m² na prebivalca. To pomeni 18 % britanske kmetijske zemlje, površina katere je 2800 m² na prebivalca. Energijske rastline se gojijo večinoma na zemlji slabše kakovosti, da bolj kakovostna zemlja ostane za pridelavo hrane. Donos vsakih 500 m² energijskih rastlin je 0,5 tone suhe snovi na leto, energijska vsebnost te pa je približno 7 kWh/d. Približno 30 % te moči se v procesu proizvodnje in dobave toplote izgubi. Končni izkupiček toplote je 5 kWh/d na prebivalca.

V načrtih predpostavljam, da poraba **elektrike** za elektroniko, osvetlitev in tako naprej ostane na enaki ravni, torej še vedno potrebujemo 18 kWh(e)/d na preb. električne moči. Res je, da učinkovitost razsvetljave v večini primerov izboljšamo z uporabo LED-tehnologije in da se poveča učinkovitost številnih drugih naprav, a ker smo blagoslovljeni z gospodarsko rastjo, v vsakdanjem življenju uporabljamo še več naprav – na primer videokonferenčnih sistemov, zaradi katerih manj potujemo.

Skupne potrebe po električni moči se v tem načrtu *povečajo* (zaradi 18 kWh/d na preb. za električni promet in 12 kWh/d na preb. za toplotne črpalke) na 48 kWh/d na preb. (oz. 120 GW na nacionalni ravni). Britanska poraba elektrike se torej skoraj potroji. Od kod bomo to energijo dobili?

Opišimo nekaj možnosti. Vse ne ustrezajo v tej knjigi navedeni definiciji »trajnosti«, so pa vsi načrti nizkoogljični.

Proizvodnja velikih količin elektrike – osnovne sestavine

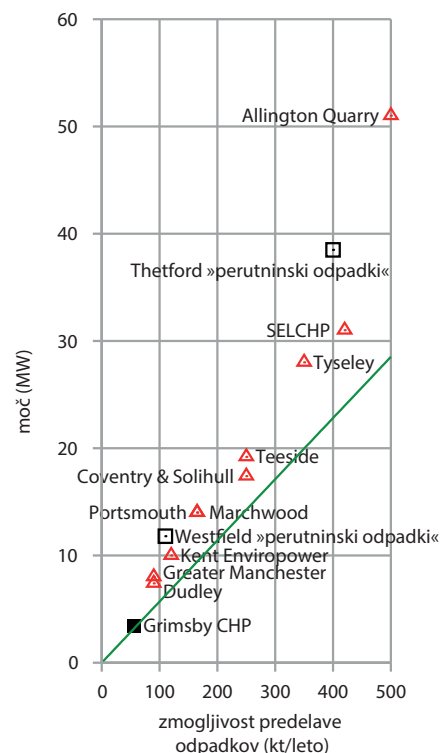
Vsi načrti za proizvodnjo velikih količin elektrike vsebujejo nekaj vetrnih elektrarn na kopnem in na morju, nekaj sončnih elektrarn, po možnosti nekaj elektrike, proizvedene s pomočjo sonca v puščavskih državah, nekaj sežigalnic odpadkov (komunalnih in kmetijskih), hidroelektrarn (v istem obsegu kot sedaj), morda valovne elektrarne, plimsko zajezitev, plimske lagune in elektrarne na plimski tok, morda jedrske elektrarne in morda nekaj »čistega fosilnega goriva«, torej premoga, ki ga kurijo v elektrarnah s sistemom zajemanja in shranjevanja ogljika. Vsi načrti merijo na povprečno skupno proizvodnjo na ravni 50 kWh/d na preb. – številko sem dobil tako, da sem zaokrožil 48 kWh/d na preb. povprečne porabe in upošteval nekaj izgub v distribucijskem omrežju.

Pri nekaterih načrtih bi energijo uvažali iz drugih držav. Za primerjavo bi bilo koristno vedeti, koliko je uvozimo sedaj. Odgovor: Velika Britanija je leta 2006 uvozila za 28 kWh/d na preb. goriva oz. 23 % svoje primarne porabe. Pri tem prevladujejo premog (18 kWh/d na preb.), surova nafta (5 kWh/d na preb.) in zemeljski plin (6 kWh/d na preb.). Jedrskega goriva (uran) običajno ne prištevamo k uvozu, saj ga ni težko shraniti.

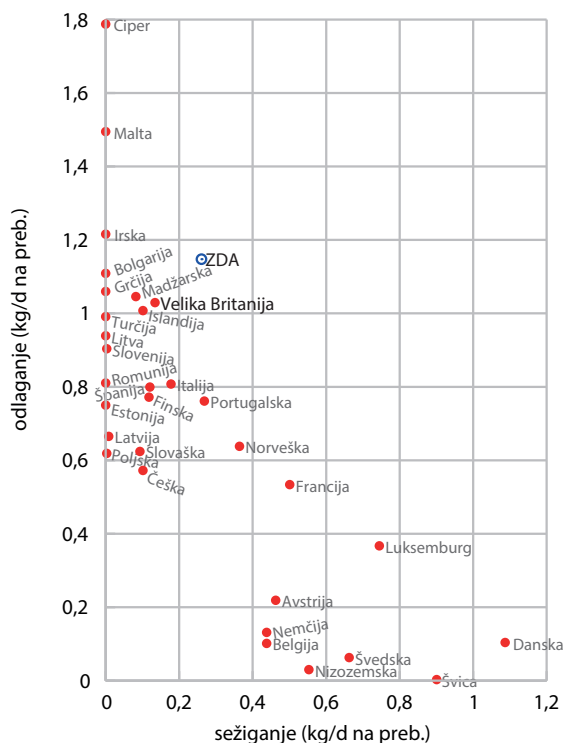
Pri vseh načrtih bom predpostavil, da sežiganje komunalnih odpadkov povečamo v takšni meri, da sežgemo skoraj vse odpadke, ki jih ni mogoče koristno reciklirati. S sežiganjem kilograma odpadkov na dan na prebivalca zagotovimo približno 0,5 kWh/d moči na prebivalca. Predpostavil bom, da sežgemo tudi podobno količino kmetijskih odpadkov in tako zagotovimo dodatnih 0,6 kWh/d na preb. Za vse to potrebujemo zmogljivosti pridobivanja energije iz odpadkov s skupno močjo 3 GW, kar je desetkratno povečanje v primerjavi z elektrarnami na odpadke leta 2008 (slika 27.2). V Londonu (7 milijonov ljudi) bi bilo dvanajst 30-megavatnih elektrarn na odpadke, kakršna je SELCHP na jugu mesta (glejte str. 287). V Birminghamu (milijon ljudi) bi bili dve. V vsakem mestu z 200.000 prebivalci bi bil en takšen 10-megavatni obrat. Strahove, da bi bilo tako obsežno sežiganje odpadkov zapleteno, umazano ali nevarno, bi morala pomiriti slika 27.3, na kateri vidimo, da številne evropske države že zdaj sežgejo *bistveno* več odpadkov na prebivalca kot Velika Britanija. Med temi sežigalnimi navdušenkami so Nemčija, Švedska, Danska, Nizozemska in Švica, ki jih običajno ne povezujemo s pomanjkljivo higieno! Eden od dobrih stranskih učinkov tega sežigalnega načrta je, da v prihodnosti odpravlja izpuste metana z odlagališč.

Hidroelektrarne v vseh petih načrtih prispevajo 0,2 kWh/d na preb., toliko kot danes.

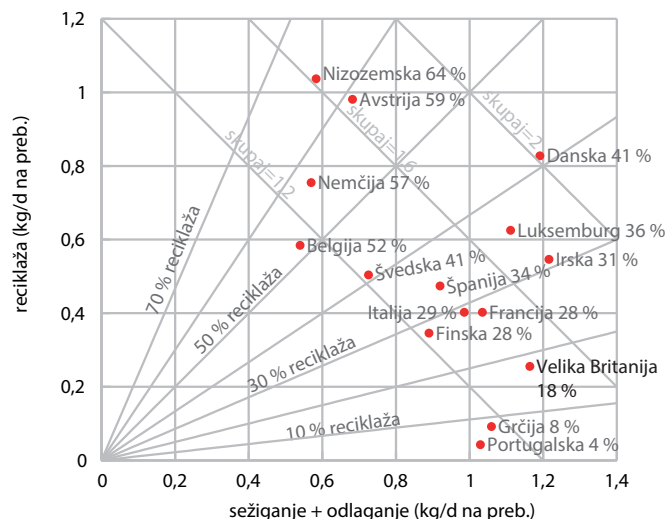
Električna vozila so dinamično prilagodljiva obremenitev elektroenergetskega sistema. Za njihovo polnjenje potrebujemo povprečno 45 GW moči (18 kWh/d na preb.). Nihanja obnovljivih virov, kot sta sončna in vetrna energija, lahko uravnovesimo s povečevanjem ali zmanjševanjem te obremenitve, če nihanja le niso premočna ali predolga. Dnevna nihanja v



Slika 27.2 Britanski obrati za proizvodnjo energije iz odpadkov. Premica pomeni povprečno proizvodnjo elektrike ob predpostavki, da iz kilograma odpadkov proizvedemo 0,5 kWh elektrike.



Slika 27.3 Levo: Odlaganje komunalnih odpadkov v primerjavi s sežiganjem po državah v kg na dan na prebivalca. Desno: Količina recikliranih odpadkov v primerjavi s količino, ki konča na odlagališču ali v sežigalnici. Odstotek recikliranih odpadkov je naveden ob posamezni državi.



porabi elektrike bodo večja kot danes, saj bomo namesto plina za kuhanje in ogrevanje uporabljali elektriko (glejte sliko 26.16, str. 200). Da bi zagotovo lahko obvladovali 10-gigavatna povečanja porabe, ki trajajo tudi do 5 ur, vsi načrti predvidevajo gradnjo petih novih črpalnih hidroelektrarn, kakršna je Dinorwig (ali nadgradnjo drugih hidroelektrarn v črpalne). 50 GWh shranjene energije ustreza petim 2-gigavatnim elektrarnam Dinorwig. Pri nekaterih načrtih so črpalne zmogljivosti še večje. Za dodatno varnost vseh pet načrtov predvideva medomrežno povezavo z Norveško z močjo 2 GW.

Proizvodnja elektrike na veliko – načrt D

Načrt D (»D« pomeni »domača raznolikost«) vsebuje vse mogoče domače vire električne energije in se v relativno majhni meri zanaša na dobavo energije iz drugih držav.

Takole bi 50 kWh/d na preb. električne moči pridobili z načrtom D. Vetrne elektrarne: 8 kWh/d na preb. (povprečje 20 GW, največja moč 66 GW) (in še za približno 400 GWh povezanih črpalnih hidroelektrarn). Sončne FN elektrarne: 3 kWh/d na preb. Sežiganje odpadkov: 1,1 kWh/d na preb. Hidroelektrarne: 0,2 kWh/d na preb. Valovanje: 2 kWh/d na preb. Plimovanje: 3,7 kWh/d na preb. Jedrske elektrarne: 16 kWh/d na preb. (40 GW). »Čisti premog«: 16 kWh/d na preb. (40 GW).

Za 8 kWh/d na preb. iz vetrnih elektrarn moramo vetrne zmogljivosti povečati za 30-krat glede na raven leta 2008. Velika Britanija bi tako imela skoraj trikrat toliko vetrne opreme, kot je ima Nemčija zdaj. Za nameščanje

takšne količine vetrnih elektrarn na morju v 10 letih bi potrebovali približno 50 dviznih ploščadi.

Za 3 kWh/d na preb. iz sončnih elektrarn potrebujemo 6 m² fotona-petostnih modulov z 20-odstotnim izkoristkom na osebo. Z njimi bi morali v celoti prekriti večino proti jugu obrnjenih streh ali pa bi jih morali v tradicionalni bavarski maniri (slika 6.7, str. 41) namestiti na podeželje, kar bi utegnilo biti gospodarnejše in bi povzročilo manj stresa zaveznikom ohranitve starih stavb.

Pri sežiganju odpadkov predvidevamo kilogram komunalnih odpadkov na dan na prebivalca (za 0,5 kWh/d na preb.) in podobno količino kmetijskih odpadkov (za 0,6 kWh/d na preb.). Iz hidroelektrarn pridobimo 0,2 kWh/d na preb., toliko kot sedaj.

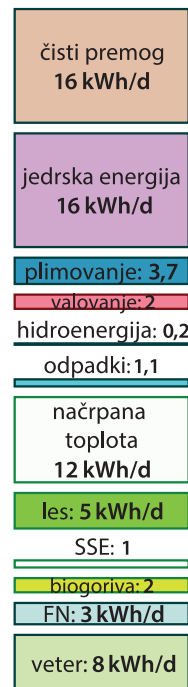
Za prispevek energije valovanja potrebujemo 16.000 globokomorskih valovnih naprav Pelamis, ki se razprostirajo po 830 km atlantske obale (glejte zemljevid na str. 73).

Energijo plimovanja zajemamo z napravami na plimski tok s skupno močjo 5 GW, zaježitvijo reke Severn z močjo 2 GW in plimskimi lagunami z močjo 2,5 GW, ki jih lahko uporabimo tudi kot črpalne hidroelektrarne za hranjenje energije.

Za 16 kWh/d na preb. iz jedrskih elektrarn potrebujemo skupaj 40 GW moči, kar pomeni približno štirikratno povečanje jedrskega parka iz leta 2007. Če bi z jedrskimi elektrarnami zagotovili 16 kWh/d na preb. moči, bi se po proizvodnji na prebivalca uvrščali med Belgijo, Finsko, Francijo in Švedsko: v Belgiji in na Finskem elektrarne zagotavljajo približno po 12 kWh/d na preb., v Franciji in na Švedskem pa 19 kWh/d na preb. oz. 20 kWh/d na preb..

Za 16 kWh/d na preb. iz »čistega premoga« (40 GW) bi morali obstoječi premogovni arzenal elektrarn, ki zagotavljajo približno 30 GW, posodobiti s sistemi zajemanja in shranjevanja ogljika, kar bi njihovo zagotovljeno moč zmanjšalo na 22 GW, potem pa zgraditi še za 18 GW novih elektrarn na čisti premog. Vložek premoga za takšen obseg proizvodnje v elektrarnah na premog je približno 53 kWh/d na preb., kar je nekaj več od sedanje stopnje kurjenja vseh fosilnih goriv v elektrarnah in precej več od tega, kar smo v 23. poglavju ocenili za »trajnostno«. Takšna poraba premoga je približno trikrat večja od sedanjega uvoza (18 kWh/d na preb.). Če ne bi ponovno odprli britanskih premogovnikov, bi bilo po tem načrtu 32 % britanske elektrike odvisne od uvoza premoga. Ponovno odprti britanski premogovniki bi lahko zagotovili približno 8 kWh/d na preb. moči, zato Velika Britanija pri premogu v nobenem primeru ne bi bila samozadostna.

Se vam kaj pri tem načrtu zdi nerazumno ali sporno? Če je tako, bo morda po vašem okusu kateri od naslednjih štirih.



Slika 27.4 Načrt D.

Proizvodnja elektrike na veliko – načrt N

Načrt N je načrt NNMD (»ne na mojem dvorišču«) za vse, ki se ne strinjate z industrializacijo britanskega podeželja z zmogljivostmi za obnovljivo

energijo, novih jedrskih elektrarn pa tudi nočete. Razkrijmo ga korak za korakom.

Najprej vse obnovljive pipice, ki so v načrtu D zelo na široko odprte, privijemo do naslednjih vrednosti. Vetrne elektrarne: 2 kWh/d na preb. (povprečje 5 GW), sončne FN elektrarne: 0, valovanje: 0, plimovanje: 1 kWh/d na preb.

Pravkar smo se z zmanjšanjem proizvodnje iz obnovljivih virov prikrajšali za 14 kWh/d na preb. (35 GW na nacionalni ravni). (Ne razumite me napak! Vetrnih zmogljivosti je še vedno osemkrat več kot leta 2008.)

V načrtu NNMD prispevek jedrskih elektrarn zmanjšamo na 10 kWh/d na preb. (25 GW), kar je za 15 GW manj kot v načrtu D, a še vedno precej več kot danes. Mislim, da bi 25 GW moči lahko porazdelili po obstoječih elektrarnah in se tako izognili vdiranju na nova dvorišča. Prispevek čistega premoga sem ohranil na ravni 16 kWh/d na preb. (40 GW). Prispevek hidroelektrarn in sežigalnic odpadkov ostaja enak kot v načrtu D.

Od kod bomo pridobili dodatnih 50 GW? NNMD pravi: »Ne na mojem dvorišču, temveč na dvorišču nekoga drugega.« V načrtu NNMD drugim državam plačujemo za uvoz električne energije, proizvedene v puščavskih elektrarnah, v višini 20 kWh/d na preb. (50 GW).

Načrt v čezmediteranski puščavi predvideva pet za London velikih krogcev (s premerom 44 km), polnih sončnih elektrarn. Prenosni sistemi morajo 50 GW moči spraviti do Velike Britanije. Sedanja visokonaletostna povezava s Francijo lahko zagotovi samo 2 GW moči, zato za ta načrt potrebujemo 25-krat večjo zmogljivost elektroenergetskih povezav s celino. (Ali alternativni način dobave elektrike, morda prevažanje metanola ali bora s puščavskih obal z ladjami.)

Ker imamo v načrtu N manj vetrnih elektrarn, nam ni treba graditi dodatnih črpalnih hidroelektrarn, o katerih govori načrt D, a glede na odvisnost od sončne energije kljub vsemu potrebujemo hranilnike, v katerih bomo hranili energijo spremenljivega sonca. Ena možnost so sistemi s staljeno soljo v sončnih elektrarnah. Mogoče bi lahko uporabili tudi črpalne hidroelektrarne v Alpah. Še ena možnost je pretvorba elektrike v gorivo, ki ga je mogoče hraniti, na primer metanol. A pretvorba pomeni izgube, zato bi potrebovali več sončnih elektrarn.

Po tem načrtu $32\% + 40\% = 72\%$ britanske elektrike dobimo iz drugih držav.

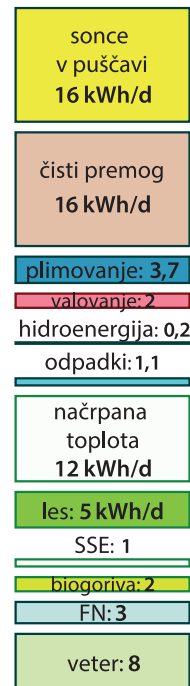
Proizvodnja elektrike na veliko – načrt L

Nekateri pravijo: »Nočemo jedrske energije!« Kako naj jim ustrežemo? Morda bi morali to protijedrsko kliko zadolžiti, da prepriča kliko NNMD, da v resnici hočejo obnovljivo energijo na našem dvorišču.

Brezjedrski načrt lahko pripravimo tako, da vzamemo načrt D in vse obnovljive vire ohranimo na našem dvorišču, jedrsko energijo pa preprosto zamenjamo s puščavskimi elektrarnami. Tako kot v načrtu N moramo za



Slika 27.5 Načrt N.



Slika 27.6 Načrt L.

dobavo puščavske elektrike močno povečati skupno moč prenosnih sistemov med Severno Afriko in Veliko Britanijo. Skupno moč medomrežnih povezav med Evropo in Veliko Britanijo bi morali povečati z 2 GW na vsaj 40 GW.

Takole bi 50 kWh/d na preb. električne moči pridobili z načrtom L. Vetrne elektrarne: 8 kWh/d na preb. (povprečje 20 GW) (in še za približno 400 GWh povezanih črpalnih hidroelektrarn). Sončne FN elektrarne: 3 kWh/d na preb. Hidroelektrarne in sežiganje odpadkov: 1,3 kWh/d na preb. Valovanje: 2 kWh/d na preb. Plimovanje: 3,7 kWh/d na preb. »Čisti premog«: 16 kWh/d na preb. (40 GW). Sončne elektrarne v puščavi: 16 kWh/d na preb. (povprečna moč 40 GW).

64 % britanske elektrike po tem načrtu uvozimo iz drugih držav.

Načrt sem poimenoval »L«, ker se lepo ujema s programom liberalnih demokratov – vsaj ko sem sredi leta 2007 napisal prvo različico tega poglavja, je bilo tako. V zadnjem času govorijo o »resnični britanski energetske neodvisnosti« in napovedali so brezogljivično strategijo, po kateri bi Velika Britanija postala neto *izvoznica* energije. Kako bi te cilje dosegli, v strategiji niso podrobneje pojasnili.

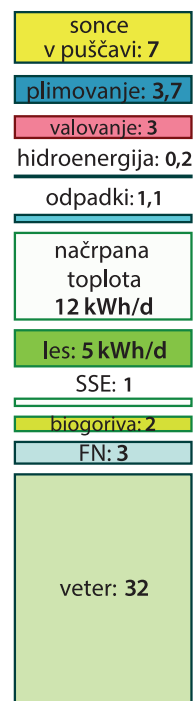
Proizvodnja elektrike na veliko – načrt G

Nekateri pravijo: »Nočemo jedrske energije, premoga pa *tudi* ne!« Zveni všečno, a potrebujemo načrt, kako to doseči. Poimenoval ga bom »načrt G«. Predvidevam, da stranka zelenih noče ne jedrske energije ne premoga, a se mi zdi, da nekaterim zelenim preostanek načrta ne bi bil po volji. Vem pa, da veter *obožujejo* v Greenpeaceu, zato načrt G posvečam njim, saj vsebuje *veliko* vetra.

Tudi tokrat bom izhajal iz načrta D, kjer bom prispevek valovanja povečal za 1 kWh/d na preb. (s črpanjem sredstev v raziskave energije valovanja ter povečanjem izkoristka naprave Pelamis) in štirikrat povečal obseg vetrne energije (glede na načrt D), da dobim 32 kWh/d na preb., kar je 64 % vse elektrike. To pomeni 120-kratno povečanje obstoječih britanskih vetrnih zmogljivosti. Po tem načrtu bi *svetovne* vetrne zmogljivosti iz leta 2008 pomnožili s 4, pri čemer bi vse nove vetrne elektrarne namestili na Britansko otočje ali okrog njega.

Ta izjemna odvisnost načrta G od obnovljivih virov, predvsem vetra, povzroča težave pri našem glavnem načinu uravnotežanja ponudbe in povpraševanja – prilagajanju polnjenja milijonov baterij za elektrificirani promet. V načrt G zato moramo dodati precej novih črpalnih hidroelektrarn, ki bodo sposobne po več dni izravnati nihanja vetrne energije. Dvodnevno zatišje vetrnih elektrarn lahko na nacionalni ravni v celoti nadomesti 400 črpalnih hidroelektrarn s takšno močjo, kot jo ima Dinorwig. Za takšne hranilnike energije bi uporabili približno 100 večjih britanskih jezer.

Takšen je razrez proizvodnje elektrike v načrtu G. Vetrne elektrarne: 32 kWh/d na preb. (povprečje 80 GW) (in še za približno 4000 GWh povezanih črpalnih hidroelektrarn). Sončne FN elektrarne: 3 kWh/d na preb.



Slika 27.7 Načrt G.

Hidroelektrarne in sežiganje odpadkov: 1,3 kWh/d na preb. Valovanje: 3 kWh/d na preb. Plimovanje: 3,7 kWh/d na preb. Sončne elektrarne v puščavi: 7 kWh/d na preb. (17 GW).

Po tem načrtu 14 % elektrike dobimo iz drugih držav.

Proizvodnja elektrike na veliko – načrt E

E pomeni ekonomija. Peti načrt je groba ocena tega, kaj bi se utegnilo zgoditi na liberaliziranem trgu energije s trdno ceno ogljika. V poštenih ekonomskih razmerah s ceno, ki bi dajala jasno sporočilo in bi preprečevala izpuste CO₂, ne pričakujemo raznovrstnih rešitev s široko paletto stroškov proizvodnje energije, temveč ekonomsko optimalno rešitev, ki bo potrebno energijo zagotavljala po najnižji ceni. In ko se pri ceni spopadeta »čisti premog« in jedrska energija, zmaga slednja. (Inženirji iz neke britanske elektrarne so mi povedali, da je investicijski strošek običajne *umazane* termoelektrarne na premog milijarda funtov na GW, približno toliko kot pri jedrski energiji, strošek elektrarne na »čisti premog«, ki zajema in shranjuje ogljik, pa približno 2 milijardi funtov na GW.) Predpostavil sem, da elektrika iz sončnih elektrarn v oddaljenih puščavah izgubi proti jedrski energiji, če upoštevamo strošek nujnih 2000-kilometerskih daljnovodov (čeprav Voorthuysen (2008) domneva, da bi lahko z razvojem proizvodnje kemičnih goriv s pomočjo sonca, ki bi bil vreden Nobelove nagrade, sončna energija v puščavah postala enako ekonomična kot jedrska). Proti jedrski energiji izgubi tudi veter na morju, stroški energije iz kopenskih vetrnih elektrarn pa so po mojih predpostavkah približno enaki jedrskim.

Takole bi 50 kWh/d na preb. električne moči pridobili z načrtom E. Vetrne elektrarne: 4 kWh/d na preb. (povprečje 10 GW). Sončne FN elektrarne: 0. Hidroelektrarne in sežiganje odpadkov: 1,3 kWh/d na preb. Valovanje: 0. Plimovanje: 0,7 kWh/d na preb. In jedrske elektrarne: 44 kWh/d na preb. (110 GW).

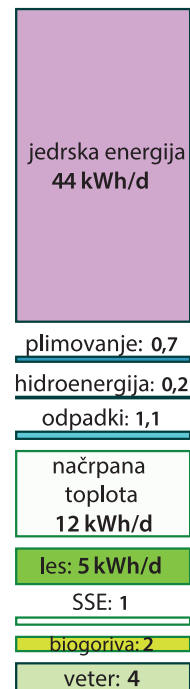
Načrt predvideva desetkratno povečanje jedrske energije v primerjavi z letom 2007. Velika Britanija bi imela za 110 GW zmogljivosti, približno dvakrat več kot zdaj Francija. Vključil sem nekaj energije plimovanja, saj mislim, da se lahko dobro zasnovana plimska laguna meri z jedrsko elektrarno.

Po tem načrtu Velika Britanija ne uvaža energije (razen urana, ki ga, kot sem rekel, običajno ne prištevamo k uvozu).

Načrti so skupaj predstavljeni na sliki 27.9.

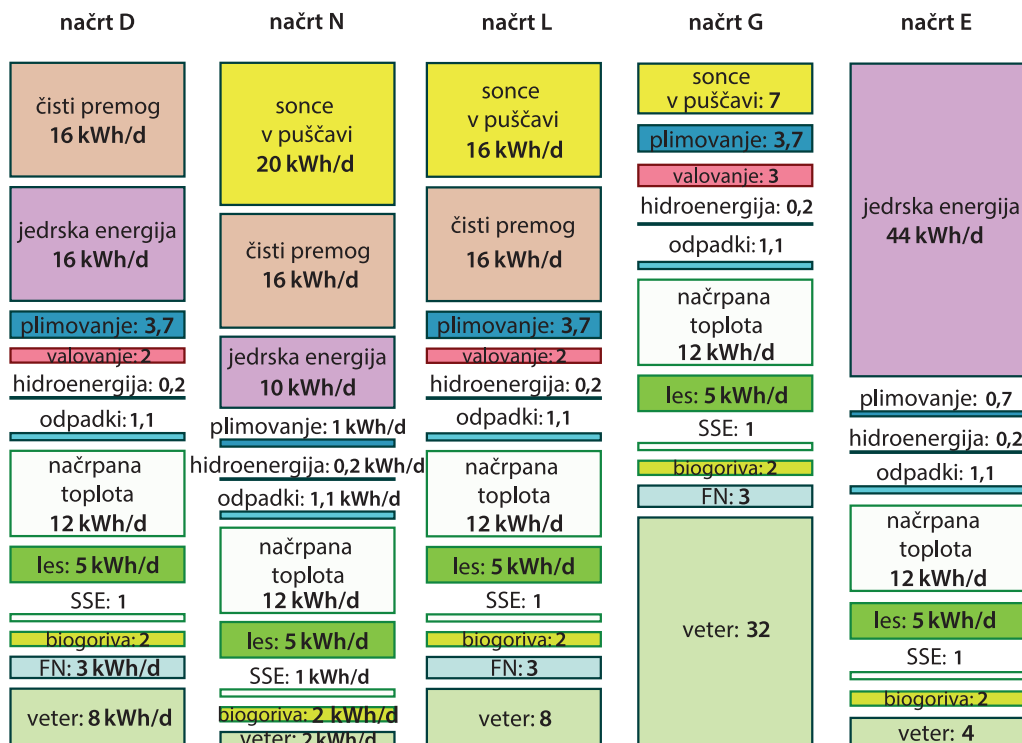
Koliko se načrti ujemajo z izsesavanjem ogljika in letenjem?

V prihodnjem svetu, kjer bo imelo onesnaževanje z ogljikom zaradi preprečevanja katastrofičnih podnebnih sprememb primerno ceno, nas bo zanimal vsak energetski program, ki bo za čim manjši denar strpal čim več ogljika v luknjo v tleh. S takšnimi v ogljično nevtralnost usmerjenimi programi bi morda lahko ohranili letalski promet v obsegu iz leta 2004 (dokler



Slika 27.8 Načrt E.

1 t CO₂e pomeni izpuste toplogrednih plinov, ekvivalentne toni CO₂.



Slika 27.9 Vseh pet načrtov.

bo še dovolj nafte). Takrat so bili povprečni izpusti CO₂ iz letalstva približno 0,5 t CO₂ na leto na prebivalca. Če upoštevamo polni toplogredni učinek letenja, so bili učinkovito morda 1 t CO₂ na leto na prebivalca. V vseh petih načrtih sem predpostavil, da osmino površine Velike Britanije namenimo gojenju energijskih rastlin, ki jih nato uporabimo za ogrevanje ali soproizvodnjo toplote in električne energije. Če bi vse te rastline raje preusmerili v elektrarne z zajemanjem in shranjevanjem ogljika – elektrarne na »čisti premog«, ki so vključene v tri načrte od petih –, bi dodatno zajeli približno 1 t CO₂ na leto na prebivalca. Če bi bile v teh elektrarnah tudi sežigalnice komunalnih ter kmetijskih odpadkov in bi si z njimi delile dimnik, bi morda lahko zajem povečali na 2 t CO₂ na leto na prebivalca. S takšno ureditvijo bi prišli novi stroški: biomaso in odpadke bi mogoče morali prevažati dlje, za zajem ogljika bi porabili precejšen delež energije rastlin, za ogrevanje stavb pa bi morali namestiti več toplotnih črpalk zrak/voda. A če je naš cilj ogljična nevtralnost, je vredno gledati nekaj korakov naprej in nove elektrarne na čisti premog umestiti k sežigalnicam odpadkov, oboje pa blizu potencialnih polj biomase.

»Vsi ti načrti so absurdni!«

Ne preseneča me, če vam načrti niso všeč. Strinjam se, da je prav v vsakem kaj neprijetnega. Po mili volji lahko izdelate takšnega, ki bo bolj po vašem okusu. Pazite le, da se izide!

Morda boste prišli do sklepa, da je treba za izvedljiv načrt zmanjšati porabo na prebivalca. Strinjal bi se, vendar je takšno strategijo težko prodati – kar spomnite se odgovora Tonyja Blaira (str. 222), ko so mu predlagali, naj na dopust manj pogosto potuje z letalom!

Ali pa boste mogoče sklenili, da je gostota prebivalstva prevelika in da moramo za izvedljiv načrt zmanjšati število ljudi. Tudi to strategijo boste težko prodali.

Opombe in dodatno branje

stran

206 *S sežiganjem kilograma odpadkov na dan na prebivalca zagotovimo približno 0,5 kWh/d moči na prebivalca.* Kalorična vrednost trdnih komunalnih odpadkov je približno 2,6 kWh na kg. Izkoristek elektrarn, ki sežigajo odpadke, je pri proizvodnji elektrike približno 20 %. Vir: vodnik v SELCHP.

207 *Slika 27.3.* Viri podatkov: Eurostat, www.epa.gov in www.esrcsocietytoday.ac.uk/ESRCInfoCentre/.

210 *Program liberalnih demokratov.* Glejte www.libdem.org.uk: [5os7dy], [yrw2oo].

28 Stroški in kaj ti zares pomenijo

Načrt na zemljevidu

Da bodo razsežnosti načrtov iz prejšnjega poglavja povsem jasne, naj vam pokažem zemljevid Velike Britanije z nekim drugim, šestim načrtom. Ta je nekje med preostalimi petimi, zato ga bom poimenoval načrt M (slika 28.1).

Površine in okvirni stroški zmogljivosti so zajeti v tabeli 28.3. Da je vse skupaj preprosteje, so finančni stroški ocenjeni glede na sedanje cene primerljivih objektov, pri čemer so mnogi od teh šele prvi prototipi. Pričakujemo lahko, da bodo številne cene še precej padle. Okvirni stroški se nanašajo na izgradnjo in ne vključujejo tekočih stroškov obratovanja ali stroškov razgradnje. Stroške »na prebivalca« sem dobil tako, da sem skupno vrednost delil s 60 milijoni. Prosim, ne pozabite, da to ni knjiga o ekonomiji – za to bi potreboval dodatnih 400 strani! Ocene navajam samo zato, da bi vam *v grobem* nakazal, kakšno ceno lahko pričakujemo pri načrtu, ki se izide.

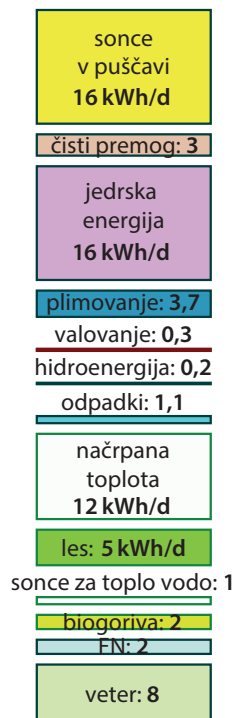
Rad bi poudaril, da ne zagovarjam posebej tega načrta. Vsebuje namreč nekaj postavk, ki jih kot britanski diktator ne bi izbral. Namerno sem vključil vse razpoložljive tehnologije, da lahko sami izdelate svoj načrt z drugačno kombinacijo.

Če želite lahko rečete: »Fotonapetostne naprave bodo predrage, raje bi več energije valovanja.« V tem primeru sami najdete rešitev: moč valovnih elektrarn osemkrat povečate. Če vam ni všeč razporeditev vetrnih elektrarn, jih lahko po mili volji premaknete (ampak kam?). Če jih več namestite na morje, vam bo to podražilo načrt. Če bi v resnici radi manj, brez problema – povejte samo, s katero drugo tehnologijo bi jih zamenjali. Lahko na primer namesto petih vetrnih elektrarn s površino 100 km² zgradite še eno 1-gigavatno jedrsko elektrarno.

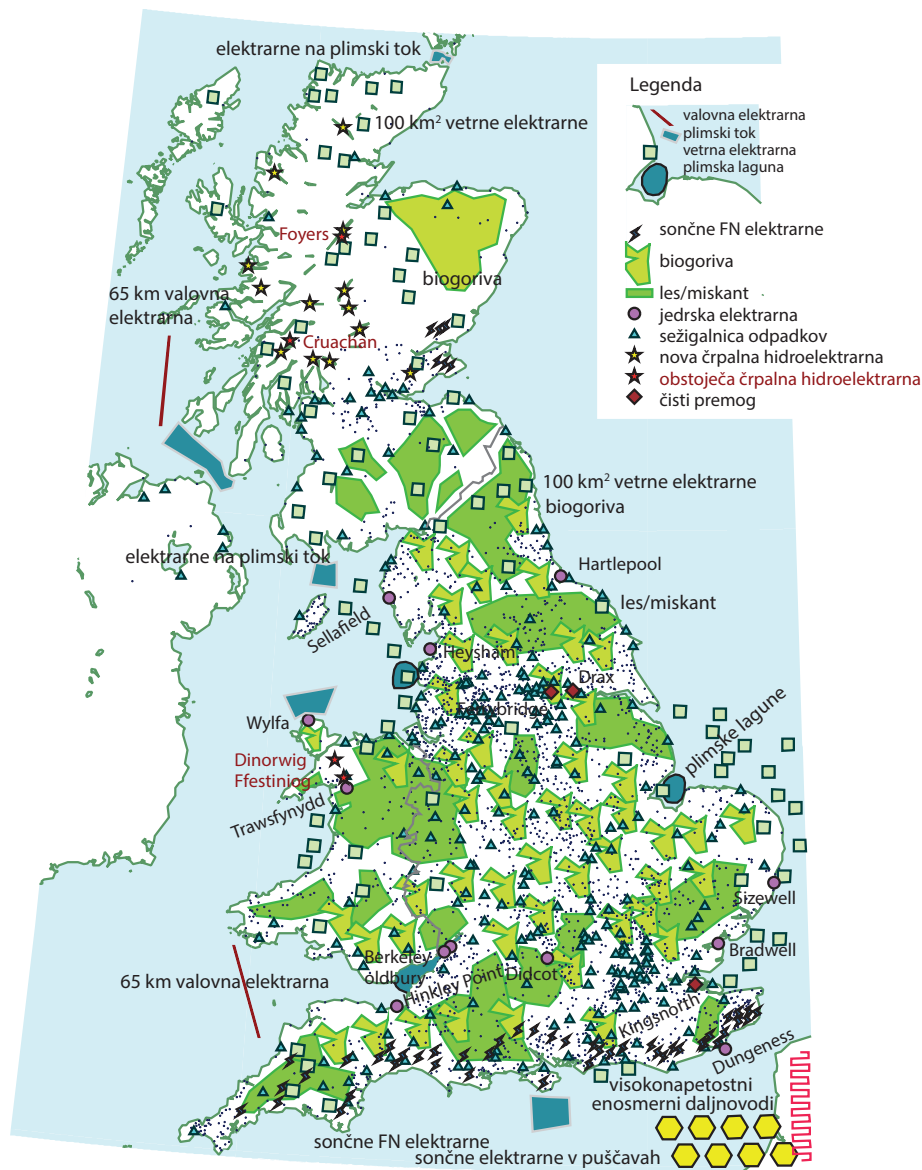
Morda si mislite, da načrt (tako kot vseh drugih pet iz prejšnjega poglavja) bizarno velika območja namenja biogorivom. Kakor hočete, očitno ste sklenili, da je treba potrebe po tekočih gorivih v prometu zmanjšati pod 2 kWh na dan na prebivalca, kolikor predvideva ta načrt, ali pa je treba do tekočih goriv priti kako drugače.

Stroški prehoda od fosilnih goriv k obnovljivim virom

Gradnja vsake vetrne elektrarne stane nekaj milijonov funtov, elektrarna pa zagotavlja nekaj megavatov. Če zelo poenostavimo podatke iz leta 2008, izgradnja enega vata moči stane en funt, en kilovat stane 1000 funtov, megavat vetrne moči stane milijon, gigavat moči jedrske elektrarne pa milijardo ali morda dve. Drugi obnovljivi viri so dražji. Naše (britanske) potrebe po moči sedaj znašajo približno 300 GW, večino tega pridobimo



Slika 28.1 Načrt M.



Slika 28.2 Načrt za Škotsko, Anglijo in Wales, ki se izide. Sivozelene kvadrati so vetrne elektrarne. Merijo po 100 km² in so vrisane v merilu.

Rdeče črte v morju so valovne elektrarne, vrisane v merilu.

Svetlomodri liki v obliki strele: sončne fotonapetostne elektrarne s površino po 20 km², vrisane v merilu.

Modri liki z ostrimi robovi v morju: plimske elektrarne.

Modri krogi v morju (Blackpool in zaliv Wash): plimske lagune.

Svetlozelena območja na kopnem: gozd in mlad gozd s kratko rotacijo (v merilu).

Rumenozelena območja: biogorivo (v merilu).

Mali modri trikotniki: sežigalnice odpadkov (niso v merilu).

Veliki rjavi rombi: elektrarne na čisti premog s sosežigom biomase ter zajemanjem in shranjevanjem ogljika (niso v merilu).

Vijolične pike: jedrske elektrarne (niso v merilu) – 12 objektov s povprečno močjo po 3,3 GW.

Rumeni šesterokotniki na drugi strani Rokavskega preliva: sončne termoelektrarne v odročnih puščavah (v merilu, vsaka 335 km²).

Rožnata vijuga v Franciji predstavlja nove visokonapetostne enosmerne 2000-kilometerske daljnovode, ki Veliki Britaniji zagotavljajo 40 GW iz oddaljenih puščav.

Rumene zvezdice na Škotskem: nove črpalne hidroelektrarne.

Rdeče zvezdice: obstoječe črpalne hidroelektrarne.

Modre pike: toplotni sprejemniki sončne energije za toplo vodo na vseh strehah.

	zmogljivost	okvirni strošek skupaj	na prebivalca	povprečna proizvodnja
52 vetrnih elektrarn na kopnem: 5200 km ²	35 GW	27 mrd. GBP – glede na vetrno elektrarno Lewis	450 GBP	4,2 kWh/d na preb.
29 vetrnih elektrarn na morju: 2900 km ²	29 GW	36 mrd. GBP – glede na Kentish Flats, vključno s 3-mrd. naložbo v vleke	650 GBP	3,5 kWh/d na preb.
Črpalne hidroelektrarne: 15 elektrarn, kakršna je Dinorwig	30 GW	15 mrd. GBP	250 GBP	
Sončne fotonapetostne elektrarne: 1000 km ²	48 GW	190 mrd. GBP – glede na Solarpark na Bavarskem	3200 GBP	2 kWh/d na preb.
Toplotni sprejemniki sončne energije: 1 m ² strešnega sprejemnika na prebivalca (skupaj 60 km ²)	2,5 GW(th) povprečje	72 mrd. GBP	1200 GBP	1 kWh/d na preb.
Sežigalnice odpadkov: 100 novih 30MW sežigalnic	3 GW	8,5 mrd. GBP – glede na SELCHP	140 GBP	1,1 kWh/d na preb.
Toplotne črpalke	210 GW(th)	60 mrd. GBP	1000 GBP	12 kWh/d na preb.
Valovne elektrarne – 2500 naprav Pelamis, 130 km morja	1,9 GW (povprečje 0,76 GW)	6 mrd. GBP?	100 GBP	0,3 kWh/d na preb.
Zajezitev reke Severn: 550 km ²	8 GW (povprečje 2 GW)	15 mrd. GBP	250 GBP	0,8 kWh/d na preb.
Plimske lagune: 800 km ²	1,75 GW povprečje	2,6 mrd. GBP?	45 GBP	0,7 kWh/d na preb.
Plimski tok: 15.000 turbin – 2000 km ²	18 GW (povprečje 5,5 GW)	21 mrd. GBP?	350 GBP	2,2 kWh/d na preb.
Jedrska energija: 40 elektrarn	45 GW	60 mrd. GBP – glede na Olkiluoto na Finskem	1000 GBP	16 kWh/d na preb.
Čisti premog	8 GW	16 mrd. GBP	270 GBP	3 kWh/d na preb.
Sončne termoelektrarne v puščavah: 2700 km ²	40 GW povprečje	340 mrd. GBP – glede na Solúcar	5700 GBP	16 kWh/d na preb.
Površine v Evropi za 1600 km visokonapetostnih enosmernih daljnovodov: 1200 km ²	50 GW	1 mrd. GBP – ob predpostavljeni ceni zemljišča 7500 GBP na ha	15 GBP	
2000 km visokonapetostnih enosmernih daljnovodov	50 GW	1 mrd. GBP – glede na ocene Nemškega letalskega in vesoljskega središča DLR	15 GBP	
Biogoriva: 30.000 km ²		(stroški niso ocenjeni)		2 kWh/d na preb.
Les/miskant: 31.000 km ²		(stroški niso ocenjeni)		5 kWh/d na preb.

Tabela 28.3 Površina kopnega in morja, potrebna za izvedbo načrta M, in okvirni stroški. Vprašaj pri stroških pomeni, da za izbrano tehnologijo natančni podatek o strošku prototipa še ni na voljo. »1 GW(th)« pomeni 1 GW toplotne moči.

s fosilnimi gorivi. Torej lahko pričakujemo, da bomo za obsežnejši prehod od fosilnih goriv k obnovljivim virom in/ali jedrski energiji potrebovali za približno 300 GW obnovljivih virov in/ali jedrske energije, strošek pa bo potemtakem približno 300 milijard funtov. Vsota okvirnih stroškov v tabeli 28.3 je 870 mrd. GBP, pri čemer prevladujejo sončne elektrarne – sončne fotonapetostne elektrarne stanejo 190 mrd. GBP, sončne termoelektrarne pa 340 mrd. GBP. Bi se pa utegnili ti stroški drastično zmanjšati, ko se bomo z uporabo tehnologij še kaj naučili. V Guardianu so avgusta 2007 razkrili poročilo vlade, v katerem je ta ocenila, da bi strošek cilja »20 % do leta 2020« (to pomeni, da bi 20 % vse energije pridobili iz obnovljivih virov, za kar bi zmogljivosti za obnovljivo energijo morali povečati za 80 GW) »lahko dosegel 22 milijard funtov« (kar bi v povprečju pomenilo 1,7 milijarde funtov na leto). Čeprav je to manj od 80 milijard, kolikor bi jih dobili po omenjeni poenostavljeni formuli, se avtorjem razkritega poročila strošek očitno zdi »nerazumen« in bi raje znižali cilj na samo 9 % obnovljive energije. (Drugi razlog, ki ga navedejo za svoj odpor do cilja »20 % do leta 2020«, pa je, da bi zaradi manjših izpustov toplogrednih plinov »utegnili evropska shema trgovanja z emisijskimi kuponi postati nepotrebna«. To bi bila tragedija!)

Kaj vse še stane milijardo

Milijarde so velike številke, za katere težko razvijemo občutek. Poglejmo nekaj drugih reči, ki jih merimo v milijardah funtov ali milijardah na leto, da boste stroške opustitve fosilnih goriv lahko s čim primerjali. Veliko teh izdatkov bom izrazil tudi »na prebivalca«, pri čemer bom vsoto delil z ustreznim številom prebivalcev.

Morda je najbolj smiselno, da stroške najprej primerjamo z denarjem, ki ga že zdaj letno namenjamo za energijo. V Veliki Britaniji končni odjemalci za energijo potrošimo 75 milijard GBP na leto, skupna tržna vrednost vse porabljene energije pa je 130 milijard GBP na leto. Vložiti 1,7 milijarde GBP na leto v energetske infrastrukture prihodnosti se sploh ne zdi nerazumno, saj predstavlja manj kot 3 % naših sedanjih izdatkov za energijo!

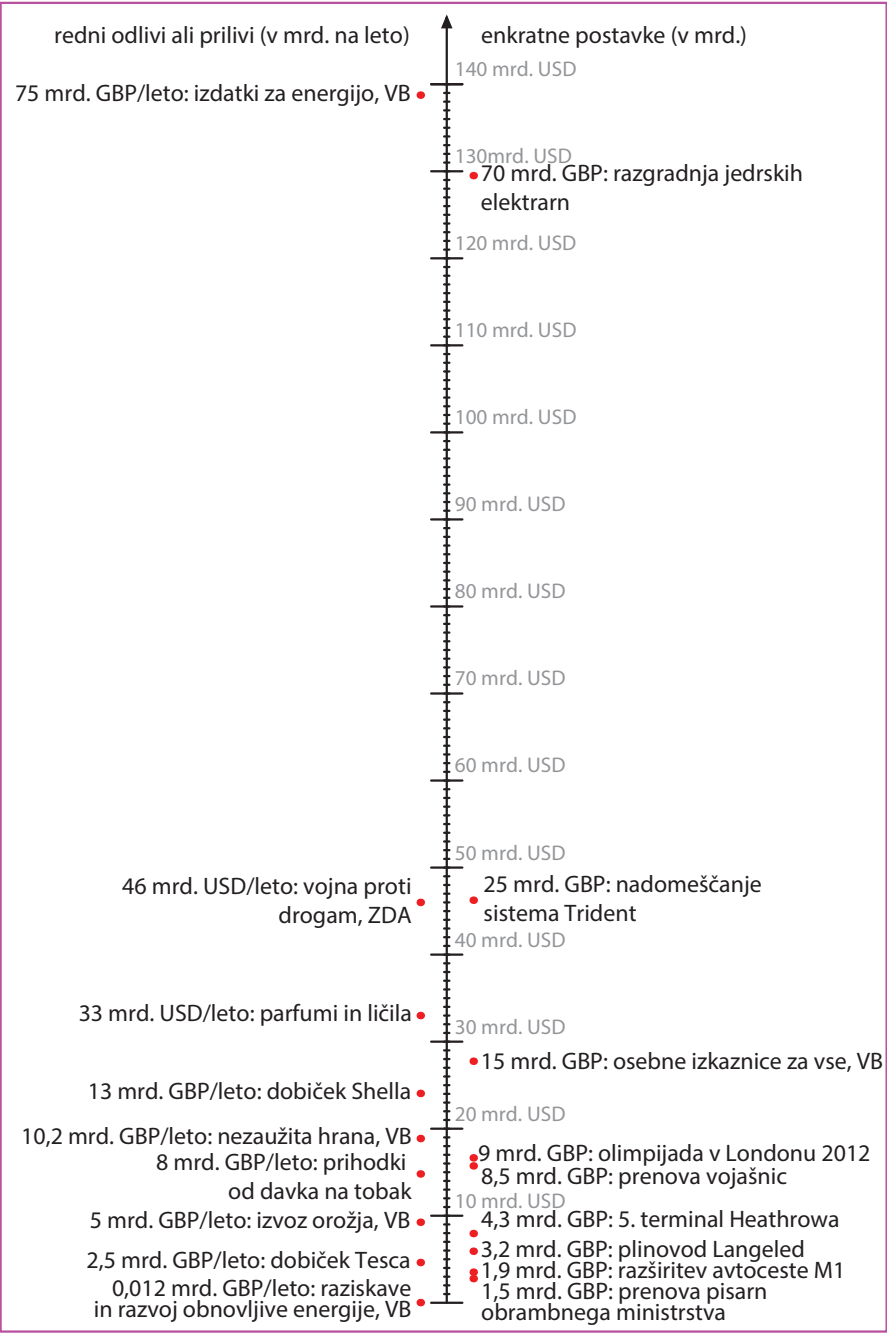
Smiselna je tudi primerjava z našim letnim izdatkom za zavarovanja, saj nekatere potrebne naložbe nimajo zagotovljenega vračila – prav tako kot zavarovanje. Britanski posamezniki in podjetja za zavarovanja namenijo 90 mrd. GBP na leto.

Subvencije

56 milijard GBP v 25 letih: stroški razgradnje britanskih jedrskih elektrarn in tovarn atomskega orožja. Podatek je iz leta 2004, leta 2008 so narasli na 73 milijard GBP (1200 GBP na prebivalca VB). [6eoyhg].



Slika 28.4 Avtocesta M1 med razcepoma 21 in 30.



Slika 28.5 Kaj vse gre v milijarde. Interval med daljšima prečkama na skali predstavlja 10 milijard USD, med krajšima pa milijardo USD.

Promet

4,3 milijarde GBP: stroški 5. terminala londonskega letališča Heathrow. (72 GBP na prebivalca VB.)

1,9 milijarde GBP: stroški razširitve 91 km avtoceste M1 (med razcepoma 21 in 30, slika 28.4). [yu8em5]. (32 GBP na prebivalca VB.)

Posebne priložnosti

Stroški olimpijskih iger v Londonu leta 2012: 2,4 milijarde GBP. Ne, oprostite, 5 milijard GBP [3x2cr4]. Ali morda 9 milijard GBP [2dd4mz]. (150 GBP na prebivalca VB.)

Običajna praksa

2,5 milijarde GBP/leto: dobiček podjetja Tesco (po objavah iz leta 2007). (42 GBP na leto na prebivalca VB.)

10,2 milijarde GBP/leto: toliko Britanci potrošijo za hrano, ki je nato ne pojejo. (170 GBP na leto na prebivalca VB.)

11 milijard GBP/leto: dobiček podjetja BP (2006).

13 milijard GBP/leto: dobiček podjetja Royal Dutch Shell (2006).

40 milijard USD/leto: dobiček podjetja Exxon (2006).

33 milijard USD /leto: globalni izdatki za parfume in ličila.

700 milijard USD /leto: ameriški izdatki za uvoženo nafto (2008). (2300 USD na leto na prebivalca ZDA.)

Vladna običajna praksa

1,5 milijarde GBP: stroški prenove pisarn britanskega Ministrstva za obrambo. (Private Eye, št. 1176, 19. januar 2007, str. 5.) (25 GBP na prebivalca VB.)

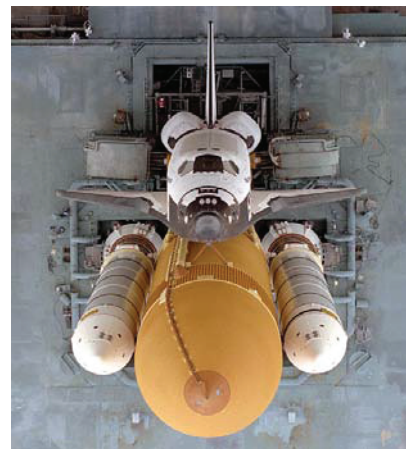
15 milijard GBP: stroški uvedbe britanskih osebnih izkaznic [7v1xp]. (250 GBP na prebivalca VB.)

Načrtovanje prihodnosti

3,2 milijarde GBP: strošek plinovoda Langeled, ki v Veliko Britanijo dobavlja plin norveških proizvajalcev. Njegova zmogljivost je 20 milijard m³ na leto, kar ustreza moči 25 GW. [6x4nvu] [39g2wz] [3ac8sj]. (53 GBP na prebivalca VB.)

Davek na tobak in podobne igrice

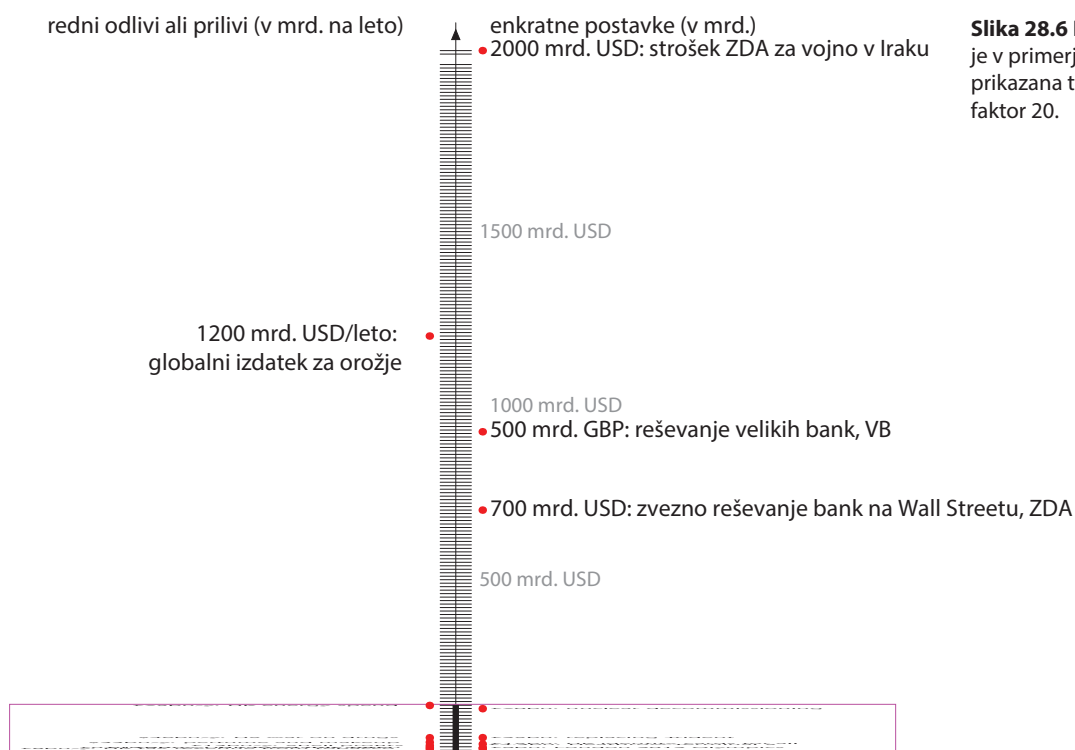
8 milijard GBP/leto: letni prihodek od davkov na tobačne izdelke v Veliki Britaniji [y7kg26]. (130 GBP na leto na prebivalca VB.) Evropska unija subvencionira gojenje tobaka s skoraj milijardo evrov na leto. www.ash.org.uk



46 milijard USD/leto: letni strošek ameriške »vojne proti drogam«.
[r9f cf]. (150 USD na leto na prebivalca ZDA.)

Vesolje

1,7 milijarde USD: strošek enega raketoplana. (6 USD na prebivalca ZDA.)



Slika 28.6 Kaj še gre v milijarde. Vertikalna skala je v primerjavi s tisto na sliki 28.5., ki je v merilu prikazana tudi v rožnatem okvirju, stisnjena za faktor 20.

Banke

700 milijard USD: oktobra 2008 je ameriška vlada namenila 700 milijard USD za reševanje Wall Streeta in ...

500 milijard GBP: britanska vlada je namenila 500 milijard GBP za reševanje britanskih bank.

Vojska

5 milijard GBP na leto: britanski izvoz orožja (83 GBP na leto na prebivalca VB), pri čemer ga gre za 2,5 milijarde GBP na Bližnji vzhod in za milijardo GBP v Savdsko Arabijo. Vir: Observer, 3. december 2006.

8,5 milijarde GBP: strošek prenove vojašnic Aldershot in Salisbury Plain. (140 GBP na prebivalca VB.)

3,8 milijarde GBP: strošek dveh novih letalonosilk (63 GBP na prebivalca VB). news.bbc.co.uk/1/low/scotland/6914788.stm

4,5 milijarde USD na leto: strošek vzdrževanja atomskega orožja – ameriško ministrstvo za energijo v svojem proračunu letno namenja najmanj 4,5 milijarde USD za »nadzor nad zalogami«, kar pomeni vzdrževanje zalog atomskega orožja *brez* jedrskih testov in *brez* obsežne proizvodnje novega orožja. (15 USD na leto na prebivalca ZDA.)

10–25 milijard GBP: strošek zamenjave britanskega sistema atomskega orožja Trident. (170–420 GBP na prebivalca VB.) [ysncks].

63 milijard USD: »vojaška pomoč« (tj. orožje), ki so jo ZDA v 10 letih podarile Bližnjemu vzhodu – približno polovico Izraelu, drugo polovico pa arabskim državam. [2vq59t]. (210 USD na prebivalca ZDA.)

1200 milijard USD na leto: globalni izdatek za orožje [ym46a9]. (200 USD na leto na prebivalca sveta.)

2000 milijard USD ali več: strošek ZDA za vojno v Iraku [99bpt] po izračunih Nobelovega nagrajenca, ekonomista Josepha Stiglitzja. (7000 USD na prebivalca ZDA.)

Po navedbah Sternovega poročila bi bil globalni strošek preprečitve hudih podnebnih sprememb (če ukrepamo takoj) 440 milijard USD na leto (440 USD na leto na prebivalca, če bi ga enakomerno porazdelili med milijardo najbogatejših ljudi). Samo ameriška vlada je leta 2005 namenila 480 milijard USD za vojne in priprave na vojne. Skupni vojaški izdatki 15 držav, ki za vojsko namenjajo največ, so bili 840 milijard USD.

Izdatki, ki ne grejo v milijarde

0,012 milijarde GBP na leto: najmanjša postavka na sliki 28.5 je letna naložba britanske vlade v raziskave in razvoj na področju obnovljive energije. (0,20 GBP na prebivalca VB na leto.)

Opombe in dodatno branje

215 *Slika 28.2*. Predpostavil sem, da je površinska specifična moč sončnih fotonapetostnih elektrarn 5 W/m², kot je moč bavarske elektrarne na str. 41, zato vse elektrarne na zemljevidu zagotavljajo v povprečju po 100 MW moči. Njihova skupna povprečna proizvodna moč bi bila 5 GW, kar zahteva približno 50 GW največje moči (to je 16-kratnik nemških FN zmogljivosti iz leta 2006). Povprečna moč rumenega šesterokotnika, ki predstavljajo sončno termoelektrarno, je 5 GW; z dvema bi zagotovili toliko kot en »krogec« v 25. poglavju.

217 *V Guardianu so avgusta 2007 razkrili poročilo vlade /.../*. V Guardianu so 13. avgusta 2007 zapisali [2bmuod]: »Vladni predstavniki so ministre skrivaj obvestili, da se Velika Britanija novemu cilju Evropske unije na področju obnovljive energije, ki se mu je Tony Blair zavezal pomladi, ne more niti približati –, zato so jim predlagali, naj se iz tega nekako izmažejo.« Zaupno poročilo, ki je pricurljalo v javnost, je na voljo na [3g8nn8].

219 */.../ parfume /.../*. Vir: Worldwatch Institute
www.worldwatch.org/press/news/2004/01/07/

221 */.../ vojne in priprave na vojne /.../*. www.conscienceonline.org.uk

– *Naložba britanske vlade v raziskave in razvoj na področju obnovljive energije*. V obdobju 2002–2003 je britanska vlada za raziskave in razvoj na področju obnovljive energije namenila 12,2 milijona GBP. Vir: Odbor za znanost in tehnologijo pri Lordski zbornici, 4. poročilo seje 2003–2004. [3jo7q2]

Vladnih sredstev za program nizkoogljičnih stavb je zato temu primerno malo – 0,018 mrd. GBP/leto se razdeli med vetrno energijo, biomaso, SSE/FN, toplotne črpalke zemlja/voda, mikrohidroenergijo in mikrosoproizvodnjo.

29 Kaj zdaj

Če ne ukrepamo takoj – ne nekoč v oddaljeni prihodnosti, ampak takoj –, bodo posledice, katastrofalne, kakršne že so, tudi nepovratne. Ni ga resnejšega, nujnejšega in za voditelje zahtevnejšega vprašanja.

Tony Blair, 30. oktober 2006

V bistvu rahlo nepraktično /.../

Tony Blair dva meseca pozneje v odgovoru na predlog, naj kot voditelj dá zgled in na dopust ne leti na Barbados.

Kaj bi morali storiti, je deloma odvisno od naših vzgibov. Spomnite se treh razlogov za opustitev fosilnih goriv, o katerih smo govorili na 5. strani: konec poceni fosilnih goriv, varnost oskrbe in podnebne spremembe. Najprej vzemimo, da nas motivira podnebni razlog – da hočemo drastično zmanjšati ogljikove izpuste. (Kdor v podnebne spremembe ne verjame, lahko ta del preskoči in se nam ponovno pridruži na strani 223.)

Kaj storiti glede onesnaženja z ogljikom

Danes nismo na poti v brezogljlično prihodnost. Dolgoročnih naložb ni. Podjetja za zajemanje in shranjevanje ogljika ne cvetijo, čeprav tako podnebni kot ekonomski strokovnjaki svarijo, da bomo zelo verjetno morali izsesavati ogljikov dioksid iz zraka, če se želimo izogniti hudim podnebnim spremembam. Ogljika ne zajemajo niti v termoelektrarnah (razen v majhnem prototipu v Nemčiji).

Zakaj ne?

Ključna težava je v tem, da onesnaženje z ogljikom nima ustrezne cene. In nobenega zagotovila ni, da bo ustrezno ceno dobilo v prihodnosti. Ko rečem »ustrezno«, s tem mislim, da bi morala biti cena povzročanja izpustov ogljikovega dioksida dovolj visoka, da bi vsaka delujoča elektrarna na premog namestila tehnologijo za zajemanje ogljika.

Reševanje podnebnih težav je zapletena tema, a tule je hitra enopotezna rešitev: cena ogljikovega dioksida mora biti tako visoka, da bodo ljudje *prenehali kuriti premog brez zajemanja*. V tej potezi je zajet velik del rešitve, saj je premog na dolgi rok najbolj razširjeno fosilno gorivo. (Poskusi zmanjševanja izpustov nafte in plina so drugotnega pomena, saj naj bi zaloge obojega v prihodnjih 50 letih upadle.)

Kaj torej morajo storiti politiki? Poskrbeti morajo, da bodo vse elektrarne na premog zajemale ogljik. Prvi korak k izpolnitvi tega cilja je, da vlada financira obsežen demonstracijski projekt, ki bo poskrbel za tehnologijo zajemanja in shranjevanja ogljika. Drugič, spremeniti morajo dolgoročne predpise za elektrarne, da se povsod uvede izboljšana tehnologija.

Pri tem koraku bi s kmečko logiko predlagal, da sprejmemo zakon, po katerem morajo po nekem datumu *vse elektrarne na premog zajemati ogljik*. A večina demokratičnih politikov očitno misli, da se ob toči zvoni tako, da vzpostaviš trg dovolilnic, ki zvonove utišajo. Kakšna je torej tržna pot do našega preprostega cilja – da vse elektrarne na premog zajemajo ogljik –, če priznamo dogmo, da je treba vprašanje podnebnih sprememb rešiti s trgi? Lahko mencamo in trgujemo z ogljikom – z dovolilnicami za izpuste in s certifikati o zajemanju ogljika, pri čemer se lahko certifikat o zajemu tone ogljika menja za dovolilnico za izpust tone ogljika. A lastniki elektrarn na premog bodo v zajemanje in shranjevanje ogljika investirali samo, če bodo prepričani, da bo cena ogljika dovolj dolgo tako visoka, da se bo naložba v tehnologijo povrnila. Strokovnjaki pravijo, da bi svoje opravila dolgoročno zagotovljena cena ogljika, ki bi bila približno 100 USD na tono CO₂.

Politiki se potemtakem morajo poenotiti o dovolj velikem dolgoročnem zmanjšanju izpustov CO₂, da bodo vlagatelji verjeli, da bo cena ogljika trajno narasla na najmanj 100 USD na tono CO₂. Druga možnost je izdajanje emisijskih kuponov s fiksno minimalno ceno na dražbi. Vlade bi lahko podprle naložbe v zajemanje ogljika tudi z zavezo, da bodo odkupile certifikate o zajetem ogljiku po ceni 100 USD na tono CO₂ ne glede na dogajanje na trgu dovolilnic za izpuste.

Še vedno se sprašujem, ali ne bi bilo najpametneje zagnati zvonov kar takoj, namesto da se igrakamo z mednarodnim trgov, ki *naj bi* spodbudil zvonjenje.

Britanska energetska politika ne stoji. Ne bo zagotovila varnosti. Ne bo zagotovila izpolnitve naših podnebnih zavez. Ne izpolnjuje potreb najrevnejših držav na svetu.

Lord Patten of Barnes, predsednik delovne skupine
za energijo in podnebne spremembe na Univerzi v Oxfordu,
4. junij 2007.

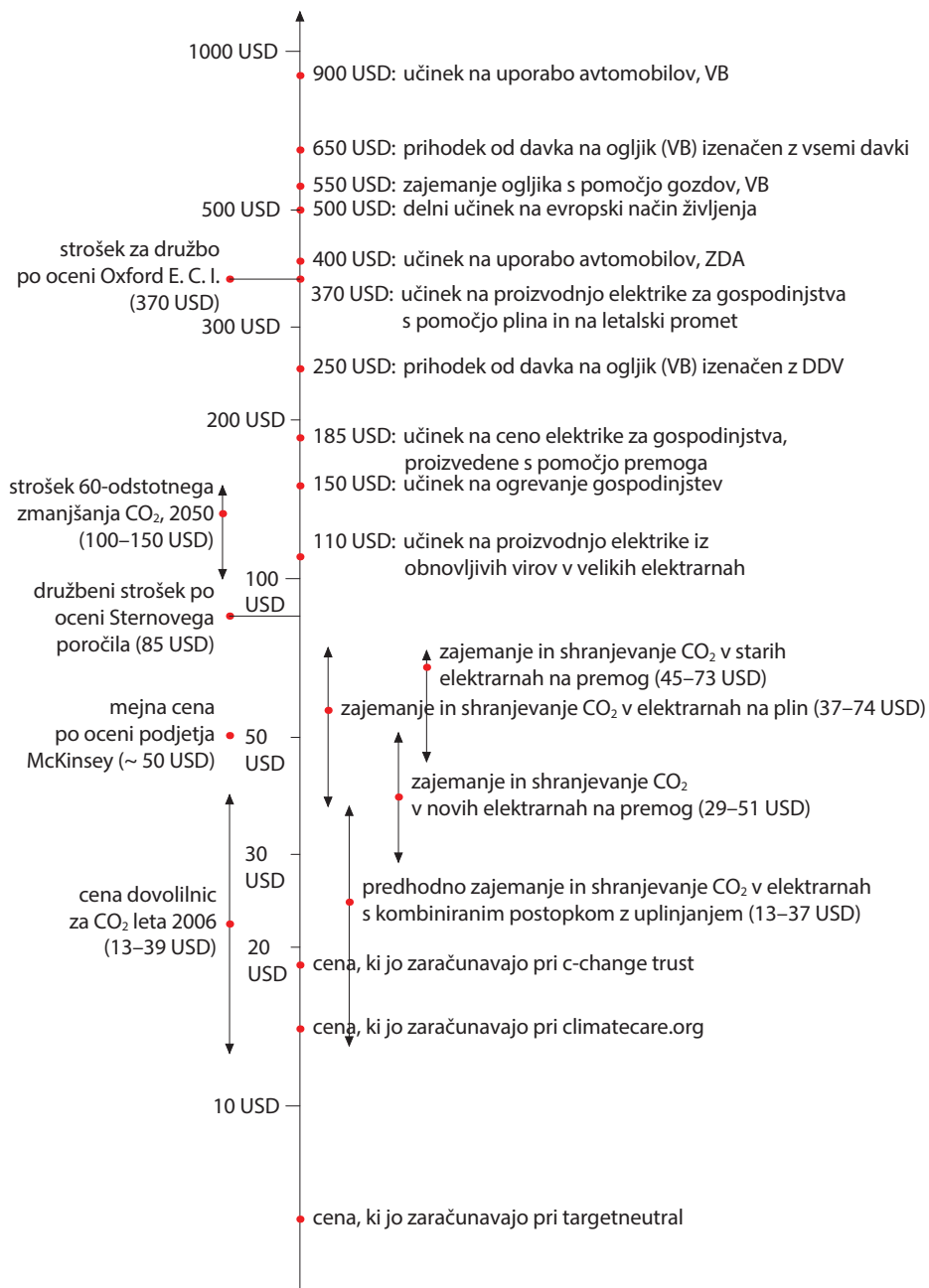
Kaj storiti glede zanesljive oskrbe z energijo

Razširimo naš seznam razlogov za ukrepanje in predpostavimo, da želimo prekiniti rabo fosilnih goriv zato, da zagotovimo varnost oskrbe z energijo.

Kaj bi morali storiti, da bi spodbudili razvoj nefosilne oskrbe z energijo in ukrepov za večjo učinkovitost? Eden od možnih pogledov je: »Trg bo sam poskrbel za to. Ko se fosilna goriva podražijo, bodo obnovljivi viri in jedrska energija v relativnem smislu cenejši in racionalni potrošnik bo izbral učinkovite tehnologije.« Čudim se, da ljudje tako zelo zaupajo trgom glede na to, kako pogosto nam ti servirajo razcvete in zlome, kreditne krče, propade bank. Trgom gre morda dobro pri odločanju na kratki rok – o naložbah, ki se povrnejo v kakšnih desetih letih. Toda ali res lahko pričakujemo, da se bodo dobro odrezali tudi pri odločitvah o energiji, učinki katerih bodo opazni več deset ali več sto let?



Slika 29.1 Res neizmerna korist! Cena (v evrih) tone CO₂ v prvem obdobju evropske sheme za trgovanje z emisijami. Vir: www.eex.com.



Slika 29.2 Kako visoka cena ogljikovega dioksida bi družbo spodbudila k večjim spremembam pri onesnaževanju s CO₂? Na diagramu so vrednosti cene ogljikovega dioksida (na tono), pri katerih navedene naložbe postanejo gospodarne ali pri katerih bo cena imela opazen učinek na navedena ravnanja, ob predpostavki, da do opaznega učinka na dejavnosti, kot sta potovanje z letalom ali vožnja avtomobila, pride, kadar se strošek dejavnosti zaradi cene ogljika podvoji. Ko bi cena naraščala od 20 do 70 USD na tono, bi CO₂ postal dovolj drag, da bi bilo gospodarno namestiti sisteme zajemanja in shranjevanja ogljika v nove in stare elektrarne. Pri ceni 110 USD na tono bi se projekti obsežne proizvodnje elektrike iz obnovljivih virov, ki sedaj stanejo 3 penije na kWh več kot plin, spremenili iz pobožnih želja v finančno izvedljive investicije. Predlagana zavezitev reke Severn bi na primer proizvajala energijo po ceni 6 penijev na kWh, kar je 3,3 penija nad tipično prodajno ceno (2,7 p na kWh). Če bi na vsakih 1000 kWh iz te naprave prihranili tono CO₂ z vrednostjo 60 GBP na tono, bi bila naprava več kot finančno samozadostna. Pri ceni 150 USD na tono bi gospodinjiski odjemalci plina ceno ogljika občutili na svojih računih za ogrevanje. Cena 250 USD na tono bi povečala efektivni strošek sodčka nafte za 100 USD. Pri ceni 370 USD na tono bi bilo onesnaževanje z ogljikom dovolj drago, da bi v veliki meri odvrglo ljudi od potovanja z letalom. Pri ceni 500 USD na tono bi povprečni Evropejci, ki ne bi spremenili svojih navad, porabili do 12 % svojih prihodkov za stroške ogljika, povezave z vožnjo z avtomobilom, potovanjem z letalom in ogrevanjem doma na plin. Pri ceni 900 USD na tono bi bil strošek ogljika opazen pri vožnji z avtomobilom.

Če prostemu trgu zaupamo gradnjo hiš, dobimo hiše, ki so slabo izolirane. Sodobne hiše so energijsko učinkovitejše samo po zaslugi zakonodaje.

Prosti trg ni zaslužen za gradnjo cest, železnic, posebnih pasov za mestne avtobuse, parkirišč ali kolesarskih poti. Vendar pa gradnja cest ter zagotavljanje parkirišč in kolesarskih poti pomembno vplivata na človekovo izbiro prevoznega sredstva. Podobno ima načrtovanje zakonov, ki določajo, *kje* smemo postavljati hiše in pisarne in *kako gosto* lahko hiše posejemo, izjemen vpliv na prihodnjo mobilnost ljudi. Če zgradimo novo mesto, ki nima železniške postaje, se njegovi prebivalci na dolge poti najverjetneje ne bodo odpravljali z vlakom. Če so spalna naselja več kot nekaj kilometrov oddaljena od delovnih mest, mnogi ne vidijo druge možnosti, kot da se v službo odpeljejo z avtom.

Med največjimi ponori energije je izdelovanje stvari. Na prostem trgu nas številni proizvajalci zalagajo s stvarmi, ki načrtno zastarajo, ki jih je treba zavreči in zamenjati, da si tako ustvarjajo posel.

Trgi sicer imajo neko vlogo, trapasto pa je reči: »Trg bo sam poskrbel za vse.« Prav gotovo se moramo pogovarjati tudi o zakonodaji, predpisih in davkih.

Ozelenitev davčnega sistema

Vse naše davke in dajatve moramo korenito revidirati.

Cilj je bolj obdavčiti onesnaževanje – predvsem fosilna goriva – in manj obdavčiti delo.

Nicolas Sarkozy, francoski predsednik

Danes je veliko ceneje kupiti novo mikrovalovno pečico, DVD-predvajalnik ali sesalnik, kot pokvarjen aparat popraviti. To je norost.

Norost deloma povzroča naš davčni sistem, ki obdavčuje delo popraviljavca mikrovalovnih pečic in njegov posel bremeni z zamudno birokracijo. Ko mi popravi mikrovalovno pečico, vendar stori nekaj *dobrega*! A davčni sistem ga pri poslu ovira.

Smisel »ozelenitve davčnega sistema« je davke od »dobrih reči«, kot je delo, preusmeriti k »slabim rečem«, kot je okoljska škoda. Zagovorniki okoljske davčne reforme predlagajo, da bi bilo znižanje davkov na »dobre reči« enako zvišanju davkov na »slabe reči« in tako reforma na prihodkovni strani ne bi prinesla sprememb.

Davek na ogljik

Najpomembnejši davek, ki ga je potrebno povečati, če želimo spodbujati razvoj tehnologij brez fosilnih goriv, je davek na ogljik. Cena ogljika mora biti dovolj visoka, da bo spodbujala naložbe v alternative fosilnim gorivom in v ukrepe za večjo učinkovitost. Če niste opazili – to je povsem enaka strategija, kot smo jo predlagali v prejšnjem podpoglavju. Izid je enak ne

glede na to, ali nas motivira reševanje podnebja ali zagotavljanje varnosti oskrbe: cena ogljika mora biti stabilna in visoka. Slika 29.2 okvirno nakaže, kolikšne vrednosti bi spodbudile različne spremembe navad in naložbe ter kako nizke vrednosti zaračunavajo organizacije, ki po lastnih trditvah ponujajo »nadomestilo« za izpuste toplogrednih plinov. Katera je najboljša pot do visoke cene ogljika? Je evropska shema za trgovanje z emisijami (slika 29.1) prava pot? Vprašanje je v domeni ekonomistov in strokovnjakov za mednarodno politiko. Cambriška ekonomista Michael Grubb in David Newbery menita, da evropska shema ni kos nalogi in da »sedanji instrumenti ne bodo prinesli ustreznega investicijskega odgovora«.

Pri *Economistu* kot ključni mehanizem vladne podpore čistim virom energije predlagajo davek na ogljik. Tudi programska skupina Kakovost življenja pri britanski konservativni stranki predlaga zvišanje okoljskih davkov in znižanje drugih, »premik od ›plačaj, kolikor služiš‹ k ›plačaj, kolikor kuriš‹«. Uvedbo davka na ogljik v Veliki Britaniji zagovarja tudi Kraljeva komisija za onesnaženost okolja. »Veljati bi moral za začetek verige in zajeti vse sektorje.«

Visok davek na ogljik, skupaj z manjšo obdavčitvijo dela ter nižjim davkom od dobička pravnih oseb in nižjim davkom na dodano vrednost torej uživa nedvoumno podporo. A davki in trgi sami ne bodo prinesli vseh potrebnih ukrepov. Če se potrošniki občasno vedejo neracionalno, če jim je več do kratkoročne gotovine kot do dolgoročnih prihrankov ali če kupec ne krije vseh stroškov, povezanih z njegovo izbiro, pristop z davki in trgi zataji.

Veliko blagovnih znamk je v resnici »pomirjujoče dragih«. Potrošnikove izbire ne narekuje izključno cena. Mnogim je več do javne podobe ter vtisa in nekateri namerno kupujejo dražje.

Ko neučinkovito reč že kupimo, je prepozno. Bistvo je v tem, da neučinkovitih reči sploh ne bi smeli proizvajati ali pa bi morali na potrošnika vplivati, da neučinkovitih reči ne bi kupoval.

Poglejmo še nekaj drugih primerov, kjer prosti trg zataji.

Ovire za vstop

Zamislite si, da so davki na ogljik dovolj visoki, da bi nova superspecialna nizkoogljčna naprava stala 5 % manj od svojega dolgoletnega visokoogljčnega tekmeca, dino-naprave, če bi jo masovno proizvajali v enakih količinah. Po zaslugi pametne tehnologije so izpusti ogljika ekonaprave neverjetnih 90 % manjši od izpustov dino-naprave. Jasno je, da bi bilo za družbo dobro, če bi zdaj vsi kupili eko-napravo. A nova eko-naprava se slabo prodaja, zato so ekonomski stroški na kos višji kot pri dino-napravi. Kupi jo le nekaj vrtičkarjev ter znanstvenikov in podjetje Eko-naprava, d. o. o., gre v stečaj.

Mogoče kljub vsemu potrebujemo vladne posege, ki bodo olajšali preskok in dali inovacijam priložnost. Podporo za raziskave in razvoj. Davčne

spodbude za novi proizvod (kot so davčne spodbude olajšale prehod od osvinčenega bencina k neosvinčenemu).

Problem majhnih cenovnih razlik

Zamislite si, da se Eko-napravici, d. o. o., uspe iz paglavca razviti v žabo in da so davki na ogljik dovolj visoki, da eko-napravica prav zares stane 5 % manj od svojega dolgoletnega visokoogljirnega tekmeca, ki ga izdelujejo v podjetju Dino-aparati, d. o. o. Davki na ogljik bodo pa zdaj menda le opravili svoje in vsi potrošniki bodo kupili nizkoogljirno napravico. Kaj še! Prvič, potrošnikom je za 5-odstotno razliko v ceni precej vseeno. Videz je vse. Drugič, če se bodo pri Dino-aparatih, d. o. o., počutili ogrožene, bodo na trg poslali prenovljeno dino-napravico. Poudarjali bodo domovinska čustva, predstavili model v zeleni barvi in razkazovali odlične ljudi, ki so zvesti starim zanesljivim dino-napravicam. »Pravi moški kupujejo dino.« Če to ne bi pomagalo, bi spisali sporočila za javnost o tem, da znanstveniki ne izključujejo možnosti, da dolgoročna raba eko-napravice povzroča raka; o primeru stare gospe, ki jo je pokončala eko-napravica, ali o tem, da naj bi eko-napravica imela škodljiv učinek na redko vrsto leteče lisice. Strah, negotovost, dvom. Za vsak primer bi Dino-aparati, d. o. o., lahko kar kupili Eko-napravico, d. o. o. Če je ekonomska spodbuda za potrošnika samo 5-odstotna, med zmagovalnim izdelkom in potencialnim prihrankom energije ne bo prav nobene povezave.

Kako rešiti ta problem? Morda bi morala vlada preprosto prepovedati prodajo dino-napravice (kot je prepovedala prodajo avtomobilov na osvinčeni bencin)?

Problem Larryja in Tine

Zamislite si, da lastnik nepremičnine Larry oddaja stanovanje najemnici Tini. Larry mora stanovanje vzdrževati in zagotoviti aparate, Tina pa plačuje mesečne stroške ogrevanja in elektrike. Tu se skriva težava: Larry ni motiviran, da bi investiral v izboljšave, s katerimi bi se Tinini stroški zmanjšali. Lahko bi namestil učinkovitejše žarnice in priklopil gospodarnjši hladilnik. Te okolju prijazne naprave bi v svoji življenjski dobi zlahka povrnila začetni strošek, a to ne bi koristilo Larryju, temveč Tini. Larry prav tako ni motiviran, da bi izboljšal izolacijo ali namestil dvojno zasteklitev, še posebej zaradi tveganja, da Tinin fant Wayne v pijanosti razbije okno. Larry in Tina bi se na popolnem trgu navadno odločila »prav«: Larry bi izvedel vse izboljšave za prihranek energije in Tini nekoliko povečal mesečno najemnino, Tina pa bi videla, da je ceneje živeti v sodobnem in dobro opremljenem stanovanju, in bi zato z veseljem plačevala višjo najemnino. Larry bi zahteval višjo varščino za morebitno razbitje dragih novih oken in Tina bi se odzvala racionalno in postavila Wayna pred vrata. Mislim pa, da Larry in Tina ne bosta nikoli popoln trg. Tini gre na tesno,

zato težko plačuje visoko najemnino. Larry hoče stanovanje na vsak način oddati, zato Tina ne verjame njegovim zagotovitom o nizkih stroških energije in sumi, da Larry pretirava.

Da bi se Larry in Tina odločila prav, je treba nekako posredovati – vlada bi na primer lahko sprejela visok davek na neučinkovite aparate, prepovedala prodajo hladilnikov, ki ne dosegajo praga gospodarnosti, pri vseh stanovanjih zahtevala visoke izolacijske standarde ali uvedla sistem obveznega neodvisnega ocenjevanja stanovanj, da bi Tina pred najemom stanovanja lahko videla njegov energijski profil.

Naložbe v raziskave in razvoj

Obsojamo majhne zneske, ki jih vlada namenja raziskavam in razvoju na področju obnovljive energije (12,2 milijona v obdobju 2002–2003). /.../ Če v Veliki Britaniji želimo izkoriščati še kateri drugi vir kot veter, se to mora spremeniti. Ne moremo priti do drugačnega sklepa, kot da vlada energetskih težav ne jemlje dovolj resno.

Odbor za znanost in tehnologijo pri Lordski zbornici

Nerazumevanje znanosti pogosto vodi v površno odločanje. Bela knjiga o energiji iz leta 2003 je bila lep primer tega. Ne bi je rad javno označil za amatersko, vendar se problema ni lotila na realen način.

Sir David King, nekdanji glavni vladni svetovalec za znanost

Sedeti v Svetovalnem odboru za obnovljive vire /.../ je bilo kot v počasnem posnetku gledati nekaj deset delov serije Da, gospod minister. Mislim, da vlada z obnovljivimi viri nikoli ni mislila resno.

Jeremy Leggett, ustanovitelj podjetja Solarcentury

Mislim, da številke govorijo same zase. Poglejte samo sliko 28.5 (str. 218) in primerjajte milijarde, ki so šle za prenovo pisarn in vojaške igračke, in stokrat manjši znesek za raziskave in razvoj na področju obnovljive energije. Razvoj obnovljivih tehnologij, kot so elektrarne na plimski tok, sončne termoelektrarne in fotonapetostni moduli, traja več deset let. Enako je z jedrskim zlitjem. Vse te tehnologije za uspeh potrebujejo začetno podporo.

Kaj lahko stori vsak sam

Ljudje me sprašujejo: »Kaj naj pa jaz naredim?« V tabeli 29.3 je osem mojih preprostih osebnih priporočil za ukrepanje in zelo približna ocena, koliko bi s tem prihranili. Veljajo nekateri »pogoji uporabe«. Prihranek bo odvisen od vašega izhodišča. S številkami v tabeli predpostavljam izhodišče nadpovprečnega potrošnika.

preprost ukrep	možni prihranek
Oblecite volnen pulover in zmanjšajte temperaturo na termostatu (recimo na 15 ali 17 °C). Na vsak radiator namestite termostat. Pazite, da bo kurjava ugasnjena, kadar nikogar ni doma. Enako ravnajte v službi.	20 kWh/d
Vsak teden odčitavajte vse števec (plin, elektrika, voda), da boste ugotovili, kako s preprostimi spremembami lahko zmanjšate porabo (npr. izklapljanjem aparatov). Tekmujte s prijateljem. Števec odčitavajte tudi v službi in tako vzpostavite neprekinjen živ energetske nadzor.	4 kWh/d
Ne potujte več z letalom.	35 kWh/d
Manj uporabljajte avtomobil, vozite počasneje, vozite manj sunkovito, kombinirajte prevoze z drugimi, vozite električni avtomobil, včlanite se v klub za izposojlo avtomobilov, uporabljajte kolo, pešajte, vozite se z vlaki in avtobusi.	20 kWh/d
Zabavno elektroniko, ki jo imate (npr. računalnik), uporabljajte še naprej; ne zamenjajte je prezgodaj.	4 kWh/d
Namestite varčne fluorescentne ali LED sijalke.	4 kWh/d
Ne kupujte navlake. Izogibajte se embalaži.	20 kWh/d
Šest dni na teden jejte vegetarijansko hrano.	10 kWh/d

Teh ukrepov ni težko uvesti, tisti v tabeli 29.4 pa zahtevajo nekaj več načrtovanja, volje in denarja.

Tabela 29.3 Osem preprostih ukrepov na osebni ravni.

večji ukrep	možni prihranek
Odpravite prepih.	5 kWh/d
Dvojna zasteklitev.	10 kWh/d
Boljša izolacija sten, strehe in tal.	10 kWh/d
Toplotni sprejemniki sončne energije.	8 kWh/d
Fotonapetostne sončne elektrarne.	5 kWh/d
Porušite staro stavbo in zgradite novo.	35 kWh/d
Kurjavo na fosilna goriva zamenjajte s toplotnimi črpalkami zemlja/voda in zrak/voda ali zrak/zrak.	10 kWh/d

Tabela 29.4 Sedem trših ukrepov.

In nazadnje je v tabeli 29.5 še nekaj srečnih poražencev: preprostih ukrepov, ki prinašajo samo majhne prihranke.

ukrep	možni prihranek
Za pranje perila uporabljajte hladno vodo.	0,5 kWh/d
Ne uporabljajte sušilnega stroja, sušite perilo na vrvici.	0,5 kWh/d

Tabela 29.5 Še nekaj preprostih ukrepov, ki prinašajo majhne prihranke.

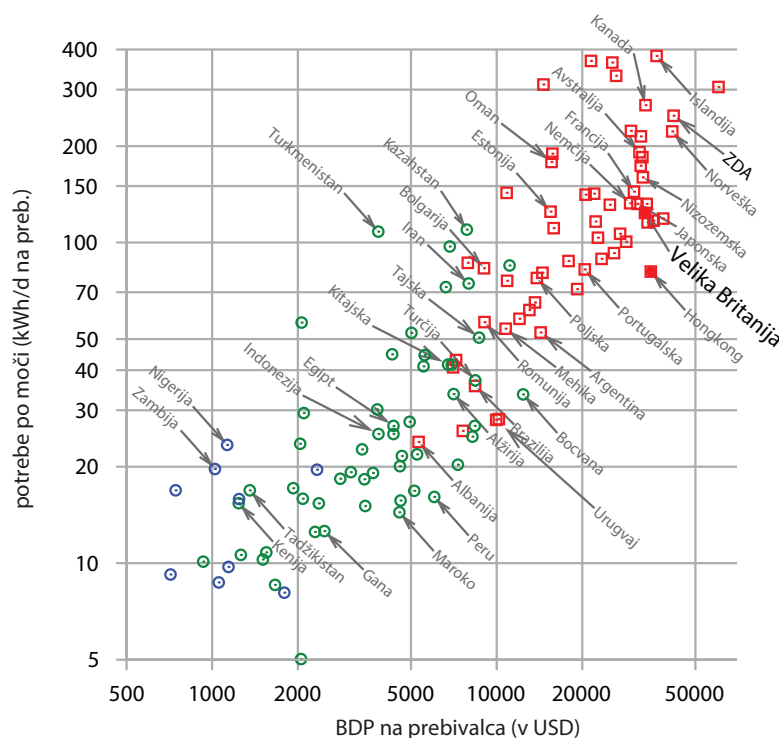
Opombe in dodatno branje

stran

222 »V bistvu rahlo nerealno /.../.« Transkripcija intervjuja s Tonyjem Blairom (9. januar 2007) je v celoti na voljo na [2ykfgw]. Tule je še nekaj odlomkov:
Spraševalec: Ste razmišljali o tem, da morda za dopust ne bi leteli na Barbados in bi se tako izognili dolgemu poletu?
Tony Blair: Po pravici povedano bi se težko odpovedal dopustu v tujini.
Spraševalec: Ampak če tega vélikega poleta v sončne kraje ne bi bilo, bi bilo to precej močno sporočilo, ni tako? /.../ – dopust v bližnjih krajih?
Tony Blair: No, ampak mislim, da je v bistvu rahlo nerealno, da bi od ljudi pričakovali kaj takšnega. Mislim, da je treba pogledati, kako bi povečali energijsko učinkovitost letalskega prometa, kako bi razvili nova goriva, s katerimi bi pokurili manj energije in povzročili manj izpustov. V novih letalih so na primer ta veliko učinkovitejša.
Vem, da vedno vsi – ljudje najbrž mislijo, da premier sploh ne bi smel na dopust, ampak če ljudem zastavimo nerealne cilje, če jim rečemo, da bomo ukinili vse nizkocenovne letalske prevoznike ... Še vedno čakam, da se bo našel politik, ki kandidira na volitvah in bo to rekel jasno in glasno – vendar ga ni.
Drugi citat: »Če ne ukrepamo takoj – ne nekoč v oddaljeni prihodnosti, ampak takoj –, bodo posledice, katastrofalne, kakršne so, nepovratne. Ni ga resnejšega, nujnejšega in za voditelje zahtevnejšega vprašanja.« Tony Blair v govoru ob predstavitvi Sternovega poročila, 30. oktober 2006 [2nsvx2]. Dodatni komentar na [yxq5xk].
225 *Okoljska davčna reforma.* Več podatkov pri Zeleni fiskalni komisiji, www.greenfiscalcommission.org.uk
226 *Pri Economistu /.../ predlagajo davek na ogljik.* »Nova doba jedrske energije«, *The Economist*, 8. september 2007.
– *Programska skupina Kakovost življenja pri britanski konservativni stranki.* Vir: Gummer in sod. (2007).

30 Energetski načrti za Evropo, Ameriko in svet

Na sliki 30.1 vidimo potrebe po moči različnih držav ali regij v primerjavi z njihovim bruto družbenim proizvodom (BDP). Splošno razširjeno mnenje je, da sta razvoj človeštva in rast nekaj dobrega, zato bom pri skiciranju svetovnih načrtov trajnostne energije predpostavil, da bodo vse države z nizkim BDP-jem na prebivalca napredovale proti desni, če gledamo sliko 30.1. Ko se bo njihov BDP povečeval, bo neizbežno rasla tudi njihova poraba. Ne vemo natančno, kolikšno vrednost bi morali v načrtih upoštevati, a povprečna evropska poraba (125 kWh na dan na prebivalca) se mi zdi smiselna predpostavka. Lahko bi predpostavili tudi, da bodo z ukrepi za večjo učinkovitost, kakršne smo predvideli v karikirani Britaniji v poglavjih 19–28, vse države dosegle evropski način življenja, in to z manjšo porabo. V načrtu na str. 204 je poraba karikirane Britanije upadla na približno **68 kWh/d na preb.** Če upoštevamo, da karikirana Britanija nima kaj dosti industrije, bi bilo pametno vzeti nekoliko višjo vrednost, na primer hongkonških **80 kWh/d na preb.**



Slika 30.1 Potrebe po moči na prebivalca v primerjavi z BDP na prebivalca v USD glede na pariteto kupne moči. Vir podatkov: Poročilo o človekovem razvoju Programa Združenih narodov za razvoj (UNDP), 2007. Kvadrati pomenijo države z »visoko stopnjo človekovega razvoja«, krogi pa države s »srednjo« ali z »nizko« stopnjo. Obe spremenljivki sta v logaritemski skali. Na sliki 18.4 so isti podatki prikazani v navadni skali.

Izračuni za Evropo

Lahko Evropa živi na račun obnovljivih virov?

Povprečna gostota prebivalstva v Evropi je približno za polovico britanske, zato je na voljo več zemlje, kamor lahko postavimo velikanske zmogljivosti za obnovljivo energijo. V Evropski uniji je približno 9000 m² površine na prebivalca. Vendar pa imajo mnogi obnovljivi viri manjšo gostoto moči kot v Veliki Britaniji: v večini Evrope je manj vetra, manj valovanja, manj plimovanja. V nekaterih delih je več hidroenergije (v Skandinaviji in srednji Evropi) in ponekod je več sonca. Izračunajmo nekaj okvirnih vrednosti.

Vetrna energija

Tipična hitrost vetra je v osrčju celinske Evrope manjša kot na Britanskem otočju – v velikem delu Italije na primer ne preseže 4 m/s. Ugibajmo, da je v petini Evrope dovolj velika za gospodarne vetrne elektrarne s specifično močjo 2 W/m², in nato predpostavimo, da ta območja obravnavamo tako kot Veliko Britanijo v 4. poglavju; 10 % jih napolnimo z vetrnimi elektrarnami. Površina Evropske unije je približno 9000 m² na prebivalca. Z vetrom torej dobimo

$$\frac{1}{5} \times 10 \% \times 9000 \text{ m}^2 \times 2 \text{ W/m}^2 = 360 \text{ W}$$

kar je 9 kWh/d na prebivalca.

Hidroenergija

Hidroelektrarne v Evropi zagotavljajo skupaj 590 TWh/leto oz. 67 GW, kar pri 500 milijonih ljudi pomeni 3,2 kWh/d na prebivalca. Vodilne pri proizvodnji hidroenergije so Norveška, Francija, Švedska, Italija, Avstrija in Švica. Če bi vse države svoje zmogljivosti za hidroenergijo podvojile – kar bi bilo po mojem mnenju težko –, potem bi zagotovile 6,4 kWh/d na prebivalca.

Energija valovanja

Če vzamemo vso atlantsko obalo (približno 4000 km) in jo pomnožimo s predvideno povprečno proizvodnjo 10 kW/m, dobimo 2 kWh/d na prebivalca. Energija valovanja ob baltski in sredozemski obali ni omembe vredna.

Energija plimovanja

Če podvojimo skupno ocenjeno moč plimovanja okrog Britanskega otočja (11 kWh/d na prebivalca, 14. poglavje), da zajamemo še francoske, irske

in norveške vire, potem pri 500 milijonih ljudi dobimo **2,6 kWh/d na prebivalca**. Energija plimovanja ob baltski in sredozemski obali ni omembe vredna.

Sončne elektrarne in toplotni sprejemniki sončne energije na strehah

Precej krajev v celinski Evropi vidi več sonca kot Velika Britanija, zato bi s sončnimi napravami dobili več energije. 10 m² strešnih sončnih fotonapetostnih modulov bi zagotavljalo približno **7 kWh/d** na vseh območjih, ki ležijo južneje od Velike Britanije. 2 m² sprejemnikov za toplo vodo pa bi v povprečju zagotavljala **3,6 kWh/d** toplote z majhno uporabno vrednostjo. (Mislim, da nima smisla predlagati več kot 2 m² sprejemnikov sončne energije na prebivalca, saj bi s to količino že izpolnili tipične potrebe po topli vodi.)

Kaj še?

Doslej smo nabrali $9 + 6,4 + 2 + 2,6 + 7 + 3,6 = 30,6$ kWh/d na prebivalca. Edina vira, ki ju nismo omenili, sta geotermalna energija in obsežno izkoriščanje sončne energije (s pomočjo zrcal, fotonapetostnih modulov ali biomase).

Z geotermalno energijo bi morda šlo, vendar je še na stopnji raziskav. Predlagam, da jo obravnavamo enako kot jedrsko zlitje: dobra naložba, a se nanjo ne gre zanašati.

Kaj pa obsežno izkoriščanje sonca? Lahko si zamislimo, da bi 5 % Evrope (450 m² na prebivalca) namenili sončnim elektrarnam, kakršna je bavarska na sliki 6.7 (njena specifična moč je 5 W/m²). To bi zagotavljalo povprečno moč

$$5 \text{ W/m}^2 \times 450 \text{ m}^2 = \mathbf{54 \text{ kWh/d na prebivalca.}}$$

Velike sončne elektrarne bi torej prispevale precej. Njihova glavna težava pa je strošek, poleg tega pa me skrbi, kako bi energijo proizvajali pozimi!

Energijske rastline? Te zajamejo samo 0,5 W/m² (slika 6.11). Glede na to, da se Evropa mora tudi nahraniti, energijski prispevek rastlin, ki ne bo namenjen prehrani, v Evropi nikoli ne more biti ogromen. Res je, tu in tam bo nekaj oljne ogrščice, pa malo gozdov, ne morem pa si zamisliti, da bi bilo neprehranskega prispevka rastlin za več kot **12 kWh/d na prebivalca**.

Pod črto

Bodimo realni. Tako kot Velika Britanija tudi *Evropa ne more preživeti z lastnimi obnovljivimi viri*. Če je torej naš cilj prekiniti rabo fosilnih goriv, mora Evropa uporabljati jedrsko energijo ali sončno energijo v oddaljenih puščavah (o čemer smo govorili na str. 179) ali pa oboje.



Slika 30.2 Toplotni sprejemnik sončne energije, ki zagotavlja toplo vodo družini v Michiganu. Njegovo črpalko poganja mali fotonapetostni modul na levi.

Izračuni za Severno Ameriko

Poraba povprečnega Američana je 250 kWh na dan. Lahko številko dosežemo z obnovljivimi viri? Kaj če bi uvedli tako nezaslišane ukrepe za večjo učinkovitost (kot so učinkoviti avtomobili in hitri električni vlaki), da bi Američane obsodili na životarjenje z bornimi 125 kWh/d, kolikor porabita povprečni Evropejec ali Japonec?

Vetrna energija

Elliott in sod. (1991) so v raziskavi ocenili vetrni potencial ZDA. Najbolj vetrovna mesta so v Severni Dakoti, Wyomingu in Montani. Po njihovi presoji bi lahko po vsej državi izkoriščali 435.000 km² vetrovnih območij, ne da bi pri tem povzročali preveč slabe volje, na ta način pa bi proizvedli 4600 TWh elektrike na leto, kar pri 300 milijonih ljudi pomeni **42 kWh na dan na prebivalca**. Povprečna specifična moč, ki so jo v izračunih predpostavili, je 1,2 W/m², kar je, mimogrede, manj od naše predpostavke v 4. poglavju (2 W/m²). Površina teh vetrnih elektrarn, 435.000 km², je približno enaka površini Kalifornije. Vetrna oprema, ki bi jo za to potrebovali (pri 20-odstotnem faktorju izkoriščenosti), bi imela moč 2600 GW, kar pomeni 200-kratno povečanje ameriških vetrnih zmogljivosti.

Vetrna energija na morju

Če predpostavimo, da z vetrnimi elektrarnami s specifično močjo 3 W/m² napolnimo plitve vode s takšno površino, kot jo imata skupaj Delaware in Connecticut (20.000 km², to je precejšen kos vseh plitvih voda ob vzhodni obali ZDA), je njihova povprečna moč 60 GW. Pri 300 milijonih ljudi to pomeni **4,8 kWh/d na prebivalca**. Potrebne vetrne opreme bi bilo 15-krat več, kot je v ZDA danes.

Geotermalna energija

V 16. poglavju sem omenil študijo o geotermalni energiji, ki so jo pripravili na univerzi MIT (2006). Avtorji vzneseno govorijo o potencialu geotermalne energije v Severni Ameriki, predvsem v zahodnih zveznih državah, kjer je več vroče kamnine. »Z ustrezno naložbo v raziskave in razvoj bi lahko izboljšani geotermalni sistemi v prihodnjih 50 letih predstavljali vsaj 100 GW(e) konkurenčnih zmogljivosti za proizvodnjo električne energije. Obenem so ti zanesljiv vir energije na dolgi rok.« Predpostavimo, da imajo prav. 100 GW električne moči pri 300 milijonih ljudi pomeni **8 kWh/d na prebivalca**.

Hidroenergija

Hidroelektrarne v Kanadi, ZDA in Mehiki proizvedejo približno 660 TWh na leto. Če količino razdelimo med 500 milijonov ljudi, dobimo 3,6 kWh/d na prebivalca. Bi lahko proizvodnjo hidroenergije v Severni Ameriki podvojili? V tem primeru bi elektrarne zagotavljale **7,2 kWh/d na prebivalca**.

Kaj še?

Doslej smo zbrali $42 + 4,8 + 8 + 7,2 = 62$ kWh/d na prebivalca. Kar ni dovolj niti za evropsko eksistenco! Lahko bi razglabljal o številnih drugih možnostih, kot je trajnostno kurjenje kanadskih gozdov v elektrarnah, a prekinimo to agonijo in se kar takoj oklenimo tehnologije, ki se izide: sončnih termoelektarn.

Na sliki 30.3 vidimo, kolikšen del Severne Amerike bi vsem njenim prebivalcem (500 milijonom ljudi) zagotavljalo povprečno moč **250 kWh/d**.

Pod črto

Severnoameriških *nesončnih* virov za porabo Severne Amerike ni dovolj. Dovolj pa jih je, če vključimo izdatno rast proizvodnje elektrike s pomočjo sončne energije. Severna Amerika torej potrebuje sončne elektrarne v lastnih puščavah ali jedrsko energijo ali oboje.

Izračuni za svet

Kako naj 6 milijard ljudi pridobi dovolj energije za evropski življenjski standard – recimo 80 kWh na dan na prebivalca?

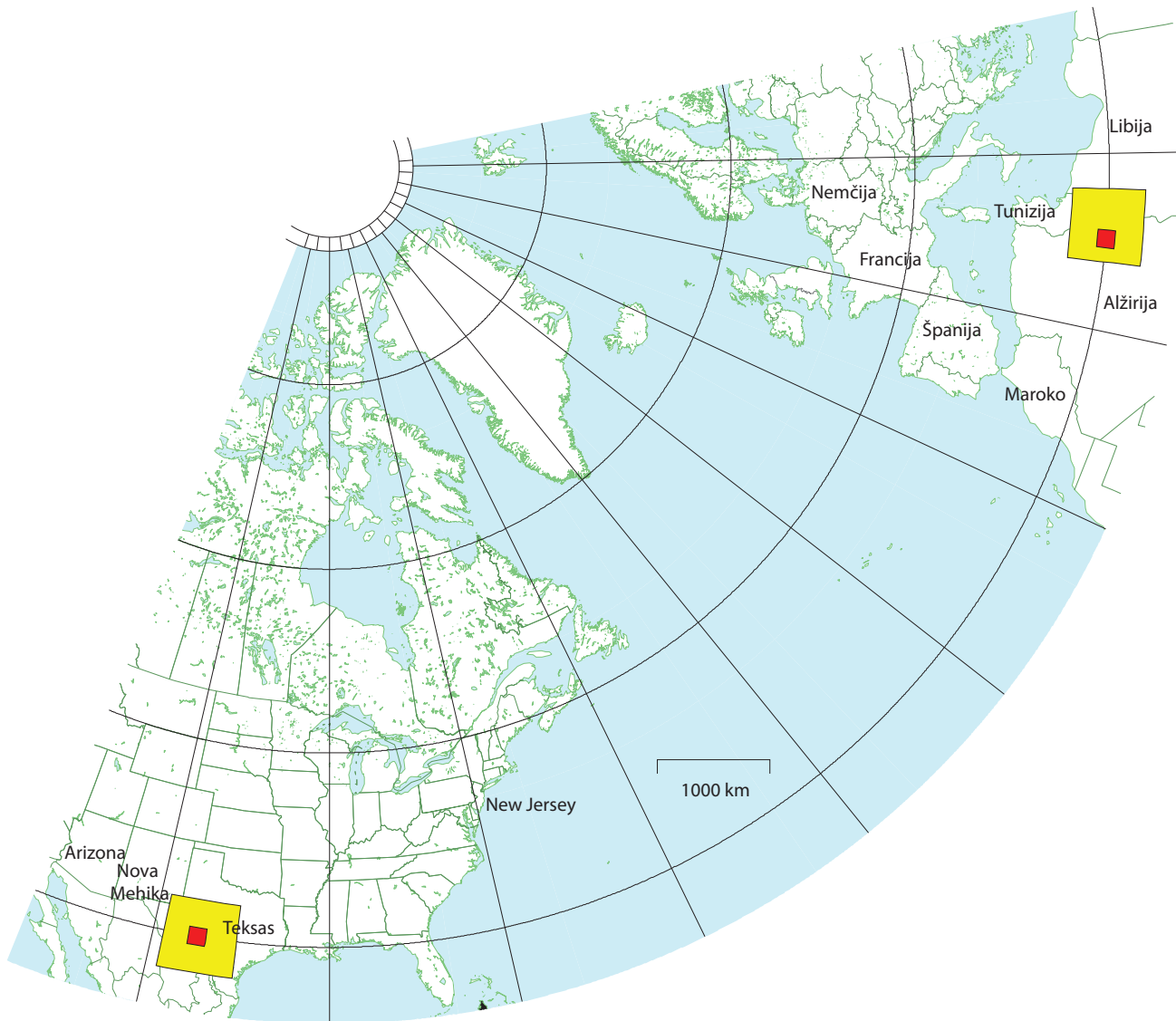
Vetrna energija

Območja, ki na svetu izstopajo po močnem stalnem vetru, so zvezne države osrednjega dela ZDA (Kansas, Oklahoma), Saskatchewan v Kanadi, skrajni jug Argentine in Čila, severovzhod Avstralije, severovzhod in severozahod Kitajske, severozahod Sudana, jugozahod Južne Afrike, Somalija, Iran in Afganistan. In vsa obalna morska območja razen tropskega pasu ob ekvatorju, širokega 60 stopinj.

Za globalno oceno pogledajmo številke Greenpeacea in Evropske zveze za vetrno energijo: »skupne razpoložljive vetrne vire ocenjujejo na 53.000 TWh na leto.« To pomeni **24 kWh/d na prebivalca**.

Hidroenergija

Hidroelektrarne po svetu zdaj prispevajo približno 1,4 kWh/d na prebivalca.



Slika 30.3 Kvadraterk spet na delu. Če bi kvadrat s površino 600-krat 600 km v celoti napolnili s sončnimi termoelektrarnami, bi 500 milijonom ljudi v Severni Ameriki omogočili povprečno ameriško porabo 250 kWh/d.

Na sliki je tudi kvadrat z enako površino v Afriki, o katerem smo že govorili. Predpostavil sem enako specifično moč, 15 W/m².

Rumeni kvadrat je po površini malenkost večji od Arizone in 16-krat večji od New Jerseyja. V obeh velikih kvadratih je še manjši s površino 145-krat 145 km – na takšni puščavski površini (za en New Jersey) bi proizvedli dovolj energije, da bi 30 milijonom ljudi zagotovili 250 kWh na dan na prebivalca.

S strani www.ieahydro.org: »Mednarodno združenje hidroelektrarn in Mednarodna agencija za energijo ocenjujeta skupni svetovni tehnično izvedljivi potencial hidroenergije na 14.000 TWh/leto [6,4 kWh/d na prebivalca sveta], pri čemer je zdaj ekonomsko izvedljivega razvojnega potenciala za približno 8000 TWh/leto [3,6 kWh/d na prebivalca]. Večina razvojnega potenciala je v Afriki, Aziji in Latinski Ameriki.«

Energija plimovanja

Na svetu je več krajev s primerljivim potencialom plimovanja kot ustje reke Severn (slika 14.8). Dve območji sta v Argentini – San José in Golfo Nuevo, Avstralija ima Walcott Inlet, ZDA in Kanada si delita zaliv Fundy, Kanada ima Cobequid, Indija zaliv Khambat, ZDA Turnagain Arm in Knik Arm, Rusija pa Tugur.

Potem pa imamo še svetovnega plimskega orjaka, Penzinsk v Rusiji z 22 GW, kar je desetkrat večji potencial kot pri reki Severn!

Kowalik (2004) ocenjuje, da bi lahko v svetovnem merilu s pomočjo plimovanja zagotovili med 40 in 80 GW moči. Pri 6 milijardah ljudi to pomeni 0,16–0,32 kWh/d na prebivalca.

Energija valovanja

Skupno moč, ki jo lahko zajamemo iz valov, ocenimo tako, da dolžino izpostavljenih obal (približno 300.000 km) pomnožimo s tipično močjo na enoto dolžine obale (10 kW na meter): surove moči je tako približno 3000 GW.

Če predpostavimo, da naprave s 50-odstotnim izkoristkom pretvorbe energije valovanja v elektriko prestrežejo 10 % te surove moči, bi te naprave zagotovile 0,5 kWh/d na prebivalca.

Geotermalna energija

Po navedbah D. H. Freestona z aucklandskega Geotermalnega inštituta je bila leta 1995 moč zmogljivosti za geotermalno energijo v svetovnem merilu v povprečju približno 4 GW, kar je 0,01 kWh/d na prebivalca.

Če predpostavimo, da so imeli avtorji z MIT, ki sem jih omenil na str. 234, prav in da ves svet lahko obravnavamo enako kot Ameriko, geotermalna energija nudi 8 kWh/d na prebivalca.

Sončna energija za energijske rastline

Ljudje se zelo hitro navdušijo za energijske rastline, kakršna je *jatropha*, ki naj ji za prostor ne bi bilo treba tekrovati s hrano, saj jo lahko gojimo na slabi opusteli zemlji. A preden se ljudje navdušijo, naj pogledajo številke. Tiste za *jatropha* so na str. 284. Tudi če bi vso Afriko prekrili z nasadi te

rastline, bi pri šestih milijardah ljudi pridobili povprečno moč 8 kWh/d na prebivalca (kar ustreza samo tretjini sedanje svetovne porabe nafte). Odvisnosti od nafte z jatropho ne morete ozdraviti!

Ocenimo meje energije, ki bi jo lahko pridobili z energijskimi rastlinami v svetovnem merilu, z enako metodo kot pri Veliki Britaniji v 6. poglavju: zamislimo si, da vso orno zemljo namenimo energijskim rastlinam. Orne ali kmetijske površine predstavljajo 18 % površine sveta, 27 milijonov km². To pri 6 milijardah ljudi pomeni 4500 m² na prebivalca. Če predpostavimo specifično moč 0,5 W/m² ter 33-odstotne izgube v predelavi in kmetijski obdelavi, ugotovimo, da bi energijske rastline zagotovile 36 kWh/d na prebivalca, če bi v celoti zavzele vso kmetijsko zemljo.

Toplotni sprejemniki, sončne FN-elektrarne in sončne termoelektrarne

O toplotnih sprejemnikih sončne energije za gretje vode ni kaj razglabljati. Delujejo skoraj kjerkoli na svetu. Vodilna sila v tej tehnologiji je Kitajska. Po svetu je za več kot 100 GW zmogljivosti, več kot polovica tega na Kitajskem.

Sončne fotonapetostne elektrarne so v Evropi tehnično izvedljive, sem jih pa ocenil kot predrage. Seveda upam, da se motim. Bilo bi krasno, če bi cena sončnih elektrarn padla enako, kot je v zadnjih štiridesetih letih cena računalnikov.

Predvidevam, da bodo sončne termoelektrarne, o katerih smo govorili na straneh 178 in 236, v številnih regijah najboljša na energiji sonca zasnovana tehnologija za proizvodnjo elektrike. Na teh straneh smo že ugotovili, da bi lahko z elektrarnami v puščavah ob Sredozemskem morju, ki bi bile reda velikosti držav, preskrbeli milijardo ljudi v Evropi in Severni Afriki, z elektrarnami velikosti Arizone v puščavah ZDA in Mehike pa pol milijarde ljudi v Severni Ameriki. Iskanje primernih puščav za preostalih 4,5 milijarde ljudi na svetu prepuščam bralcu.

Pod črto

Poglejmo seštevke nesončnih števil. Vetrna energija: 24 kWh/d na preb., hidroenergija: 3,6 kWh/d na preb., energija plimovanja: 0,3 kWh/d na preb., energija valovanja: 0,5 kWh/d na preb., geotermalna energija: 8 kWh/d na preb. Skupaj 36 kWh/d na preb. Naš cilj je bila postevropska poraba z 80 kWh/d na prebivalca. Sklep je jasen: morda je nesončnih virov res »veliko«, ne pa dovolj ogromno. Za načrt, ki se izide, se moramo zateči k eni ali več oblikam proizvodnje energije s pomočjo sonca. Ali uporabljati jedrsko energijo. Ali oboje.

Sheffield	28 %
Edinburg	30 %
Manchester	31 %
Cork	32 %
London	34 %
Köln	35 %
Köbenhavn	38 %
München	38 %
Pariz	39 %
Berlin	42 %
Wellington, NZ	43 %
Seattle	46 %
Toronto	46 %
Detroit	54 %
Winnipeg	55 %
Peking 2403	55 %
Sydney 2446	56 %
Pulj	57 %
Nica	58 %
Boston	58 %
Bangkok	60 %
Chicago	60 %
New York	61 %
Lizbona	61 %
Kingston, Jamajka	62 %
San Antonio	62 %
Sevilla	66 %
Nairobi	68 %
Johannesburg, JAR	71 %
Tel Aviv	74 %
Los Angeles	77 %
Uppington, JAR	91 %
Yuma, Arizona	93 %
Sahara	98 %

Tabela 30.4 Podatki o osončenosti krajev po svetu. [3doæg]

Opombe in dodatno branje

stran

234 Severnoameriška vetrna energija na morju.

www.ocean.udel.edu/windpower/ResourceMap/index-wn-dp.html

235 Severna Amerika torej potrebuje sončne elektrarne v lastnih puščavah ali jedrsko energijo ali oboje. Če vas zanima Googlov načrt iz leta 2008 za 40-odstotno defosilizacijo ZDA, preberite članek *Clean Energy 2030* Jefferyja Greenblatta [31cw9c]. Glavne točke načrta so ukrepi za večjo učinkovitost, elektrifikacija prometa in proizvodnja elektrike iz obnovljivih virov. Slednje vključuje

10,6 kWh/d na preb.	vetrne energije
2,7 kWh/d na preb.	sončnih FN elektrarn
1,9 kWh/d na preb.	sončnih termoelektrarn
1,7 kWh/d na preb.	biomase
in 5,8 kWh/d na preb.	geotermalne energije

do leta 2030. Skupaj je to 23 kWh/d na preb. iz obnovljivih virov. Predvidijo rahlo povečanje jedrskih zmogljivosti, s 7,2 kWh/d na preb. na 8,3 kWh/d na preb., ne pa tudi novih hidroelektrarn. Zemeljski plin bi še naprej prispeval 4 kWh/d na preb.

237 Skupni svetovni potencial hidroenergije /.../.

Vir: www.ieahydro.org/faq.htm.

– Skupno moč, ki jo lahko zajamemo iz valov, v svetovnem merilu ocenjujejo na 3000 GW. Glejte Quayle in Changery (1981).

– Moč zmogljivosti za geotermalno energijo leta 1995. Freeston (1996).

238 Energijske rastline. Ocene, podobne mojim, v Rogner (2003).

Dodatna literatura: V reviji *Nature* je osemstranski članek o tem, kako oskrbeti svet z energijo (Schiermeier in sod. 2008).

31 Poslednja možna razprava, zajemanje ogljika

Zajemanje ogljikovega dioksida iz zraka je pa res poslednja tema, o kateri bi morali razpravljati.

Pri tem namenoma želim izraziti dvojni pomen. Za zajemanje ogljika iz zraka potrebujemo tako velikanske količine energije, da o tem skoraj nima smisla govoriti (in če bi nakazali možnost, da lahko podnebje spravimo v red s to obliko geoinženiringa, obstaja nevarnost, da bi s tem zavrli takojšnje ukrepe). Mislim pa, da bi o tem vendarle morali govoriti, razmisliti o najboljšem načinu in financirati raziskave izboljšav teh načinov, saj bi zajemanje ogljika iz zraka utegnila biti naša zadnja obrambna črta, če bodo podnebne spremembe tako hude, kot pravijo klimatologi, in če se človeštvo ne bo odločilo za cenejše in razumnejše možnosti, ki so zdaj še na voljo.

Preden spregovorimo o zajemanju ogljika iz zraka, potrebujemo boljši globalni pogled na ogljik.

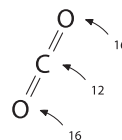
Kako razumeti CO₂

Ko sem začel snovati to knjigo, sem se nameraval popolnoma izogniti podnebnim spremembam. V nekaterih krogih je vprašanje »Se podnebje res spreminja?« sprožalo polemike. Enako tudi »Je za to kriv človek?« in »Je to sploh važno?«. Na koncu verige polemičnih vprašanj pa je obviselo: »Kaj bi morali ukreniti?« Zdelo se mi je, da je vprašanje trajnostne energije že samo po sebi dovolj tehtno in da se je polemiki najbolje ogniti. Moj argument naj bi bil: »Ni pomembno, kdaj bo zmanjkalo fosilnih goriv, ni pomembno, ali se podnebje spreminja; *kurjenje fosilnih goriv tako ali tako ni trajnostno*. Zamislimo si trajnosten način življenja in ugotovimo, koliko trajnostne energije je na voljo.«

A podnebne spremembe so se zasidrale v zavest javnosti in zdaj odpirajo najrazličnejša zanimiva vprašanja za hitre izračune, zato sem se odločil, da jih omenim v predgovoru in v tem sklepnem poglavju. To ne bo prava razprava, samo nekaj zanimivih števil.

Enote

Dajatve za onesnaževanje z ogljikom običajno merimo v dolarjih ali evrih na tono CO₂, zato bo *tona* CO₂ moja glavna enota, ko bom govoril o onesnaženju z ogljikom na prebivalca, *tona* CO₂ na leto pa enota za hitrost onesnaževanja. (Izpusti toplogrednih plinov vsakega povprečnega prebivalca Evrope so ekvivalentni 11 tonam CO₂ na leto oz. 30 kg CO₂ na dan.) Pri ogljiku v fosilnih gorivih, rastju, zemlji in vodi pa bom govoril o tonah ogljika. V toni CO₂ je 12/44 tone ogljika, nekaj več kot četrtino tone. Na planetarni ravni bom govoril o gigatonah ogljika (GtC). Gigatona ogljika je milijarda ton.



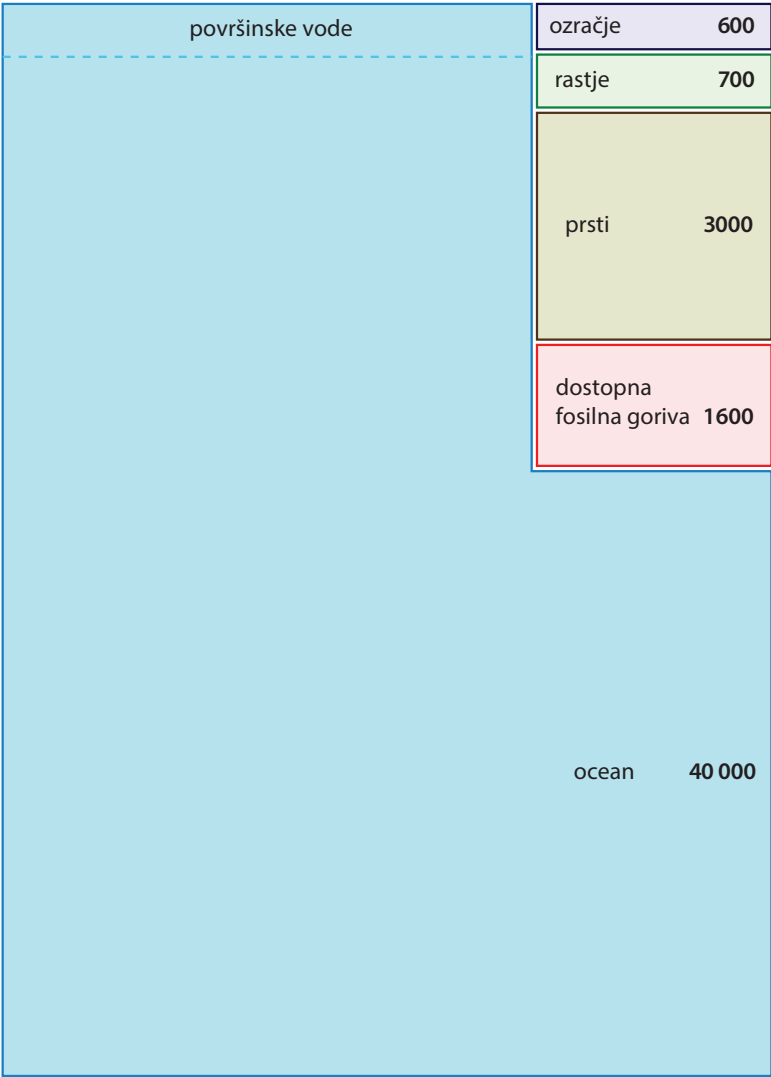
Slika 31.1 Masi atoma ogljika in molekule CO₂ sta v razmerju 12 proti 44, saj atom ogljika tehta 12 enot, atoma kisika pa po 16 enot. 12 + 16 + 16 = 44.

Gigatone si je težko predstavljati, zato si za človeku prilagojeno vrednost zamislite, da pokurite tono premoga (toliko bi ga morda v enem letu porabili za ogrevanje hiše). Zdaj si zamislite, da vsakdo na planetu pokuri tono premoga na leto: to pomeni 6 GtC na leto, saj na svetu živi 6 milijard ljudi.

Kje je ogljik?

Kje je ves ogljik? Če želimo razumeti posledice izpustov CO₂, moramo vedeti, koliko ogljika je v primerjavi z ozračjem v oceanih, zemlji in rastju.

Slika 31.2 ilustrira, kje je ogljik. Večina – 40.000 Gt – ga je v oceanih (v obliki raztopljenega plina CO₂, karbonatov, živega rastlinstva in živalstva ter razkrajajočih snovi). V zemlji in rastju ga je skupaj približno 3700 Gt. V dostopnih fosilnih gorivih – večinoma premogu – ga je približno 1600 Gt. Približno 600 Gt pa ga je v ozračju.



Slika 31.2 Ocenjena količina ogljika (v gigatonah) na dostopnih predelih Zemlje. (Veliko ogljika je še v kamninah. Njegovo kroženje merimo v milijonih let, pri tem pa se ohranja dolgoročno ravnoesje med ogljikom v sedimentih, ki na stikih spodrivajo pod tektonske plošče, in ogljikom, ki občasno privre iz vulkanov. Ta geološki ogljik sem zaradi večje razumljivosti zanemaril.) Pri ozračju gre za predindustrijsko vrednost (600 Gt), od leta 1850 se je količina ogljika v ozračju povzpela na približno 800 Gt.

Do nedavnega so bili vsi ti hrami ogljika vsaj v grobem ravnovesju: odtok ogljika iz nekega hrama (na primer prsti, rastja ali ozračja) je izravnal enako obsežen pritok v hram. Tokovi so bili v obeh smereh zanemarljivi. Potem pa so ljudje začeli kuriti fosilna goriva. To je prispevalo dva dodatna *neuravnoutežena* tokova, kot kaže slika 31.3.

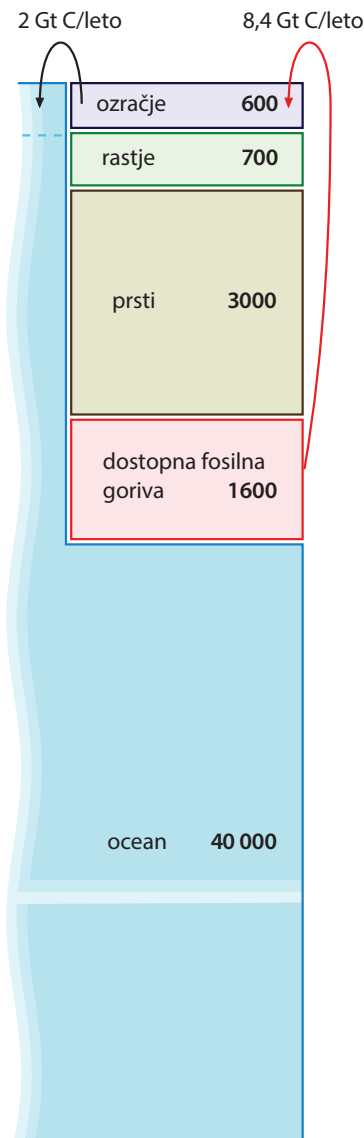
Leta 1920 so fosilna goriva kurili s hitrostjo 1 Gt C/leto, leta 1955 s hitrostjo 2 Gt C/leto, leta 2006 pa 8,4 Gt C. (V številko je vključen manjši prispevek proizvodnje cementa, pri kateri se CO₂ sprošča iz apnenca.)

Kako je ta pomemben dodatni tok ogljika spremenil razmere, ki jih vidimo na sliki 31.2? Pravzaprav ne vemo natančno. Na sliki 31.3 vidimo tisto glavno, kar vendarle vemo. Večina dodatnih 8,4 Gt C na leto, ki jih oddajamo v ozračje, tam tudi ostane in pri tem povečuje koncentracijo ogljikovega dioksida v njem. Ozračje se razmeroma hitro izravna s površinskimi vodami oceanov (izravnavanje traja samo pet to deset let), pri čemer je neto tok CO₂ iz ozračja v površinske vode 2 Gt C na leto. (Čeprav najnovejše raziskave nakazujejo, da oceani ogljik sprejemajo čedalje počasneje.) Nesorazmerni dotok v površinske vode povzroča zakisanje oceanov, kar je slabo za korale. Nekaj dodatnega ogljika gre tudi v rastje in zemljo, morda kakšnih 1,5 Gt C na leto, a ti tokovi niso tako dobro izmerjeni. Ker približno polovica ogljikovih izpustov ostane v ozračju, bo nadaljnje onesnaževanje s hitrostjo 8,4 Gt C na leto še naprej povečevalo raven CO₂ v ozračju in površinskih vodah.

Kam dodatni CO₂ potuje na dolgi rok? Glede na to, da je količina v fosilnih gorivih veliko manjša kot v oceanih, se bo dodatni ogljik »na dolgi rok« prebil v oceane, količine v ozračju, rastju in zemlji pa se bodo vrstile na normalno raven. A ta »dolgi rok« pomeni tisoče let. Kot sem rekel, izravnavanje med ozračjem in *površinskimi* vodami poteka hitro, a na slikah 31.2 in 31.3 vidimo, da površinske vode od preostalega dela oceana ločuje črtkana črta. V merilu 50 let je ta meja tako rekoč trden zid. Radioaktivni ogljik, ki se je razpršil po planetu ob testiranjih atomskega orožja v 60. in 70. letih 20. stoletja, je prodril komaj do globine 400 m. Za primerjavo: povprečna globina oceanov je približno 4000 m.

Oceani krožijo počasi: kos globokomorske vode na površje in spet nazaj zaokroži v približno 1000 letih. Kroženje globokih voda povzroča kombinacija gradientov temperature in slanosti, zato mu pravimo termohalinska cirkulacija (v primerjavi s kroženjem površinskih voda, ki ga povzroča veter).

Posledice počasnega obračanja oceanov so lahko usodne: fosilnih goriv je dovolj, da v prihodnjih 1000 letih resno vplivamo na podnebje.



Slika 31.3 Puščici predstavljata dodatna tokova ogljika, ki ju povzroča kurjenje fosilnih goriv. Izpusti v ozračje zaradi kurjenja fosilnih goriv (8,4 Gt C/leto) niso uravnouteženi s količino CO₂, ki jo sprejmejo oceani (2 Gt C/leto). Slabše izmerjeni tokovi med ozračjem, prstmi, rastlinstvom in tako dalje so na ilustraciji zanemarljivi.

Kje ogljik konča

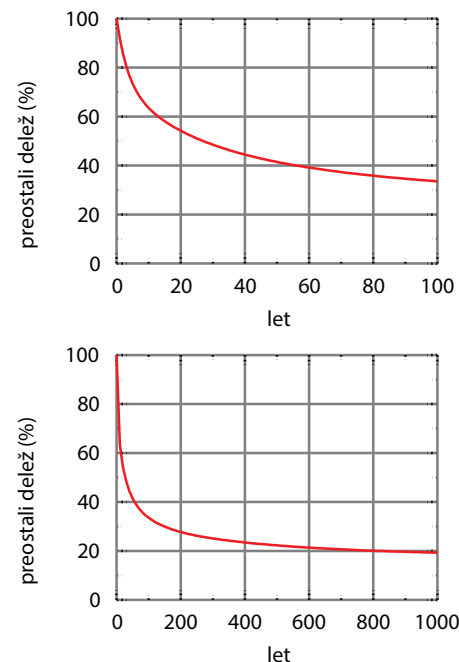
Slika 31.3. je močno poenostavljena. Človek na primer povzroča dodatne tokove, ki jih na diagramu ni: ob kurjenju šote in požiganju gozdov se je na Borneu samo leta 1997 sprostilo približno 0,7 Gt C. Ob nenamernih požarih v premogovnih plasteh se sprostijo približno 0,25 Gt C na leto.

Ilustracija pa nam kljub vsemu pomaga vsaj približno razumeti, kaj se bo na kratki in srednji rok zgodilo ob različnih strategijah. Če bo onesnaževanje z ogljikom šlo po poti »običajne prakse«, pri čemer bi v prihodnjih 50 letih prispevali še 500 Gt ogljika, lahko pričakujemo, da bo ta še naprej postopno, s hitrostjo 2 Gt C na leto, prehajal v površinske vode oceanov. Do leta 2055 bo tako v površinske vode prišlo že vsaj 100 od 500 Gt, koncentracija CO_2 v ozračju pa bi se povzpela na dvakratnik predindustrijske vrednosti.

Če bi kurjenje fosilnih goriv v 50. letih 21. stoletja zmanjšali na nič, bi se bistveno zmanjšal tudi 2-gigatonski tok iz ozračja v oceane. (Včasih sem mislil, da bi se nadaljeval še nekaj desetletij, a to bi držalo le v primeru, da koncentracija v površinskih vodah ne bi bila izravnana s tisto v ozračju – kot pa sem maloprej omenil, se vrednosti izravnata že v nekaj letih.) Večina od teh 500 Gt, ki bi jih sprostili v ozračje, pa bi v oceane postopno prešla šele v nekaj tisoč letih, ko bi se površinske vode odvalile navzdol in bi na površje iz globin prišle nove.

Koncentracije ogljika, ki smo jih vrgli iz ravnotežja, bi se torej lahko sčasoma spravile nazaj v red, vendar šele čez nekaj tisoč let. In še to ob predpostavki, da to izjemno iztirjanje ozračja ne bo drastično spremenilo ekosistema. Možno je namreč, da bi zakisanost površinskih voda povzročila tolikšno izumiranje oceanskega rastlinstva, da bi se ujeli v nov začaran krog: zakisanje pomeni izumiranje rastlinstva, zaradi česar rastlinstvo absorbira manj CO_2 iz oceanov, zaradi česar se zakisanost oceanov še poveča. Te začarane kroge (znanstveniki jim pravijo »pozitivna povratna zanka«) Zemlja že pozna: prevladuje na primer prepričanje, da so se ledene dobe razmeroma hitro končale prav zaradi pozitivne povratne zanke, saj sta se ob rastoči temperaturi talila površinski sneg in led, kar je zmanjšalo odboj sonca na Zemlji, zaradi česar je ta absorbirala več toplote, to pa je zviševalo temperaturo. (Staljen sneg – voda – je veliko temnejši od zamrznjenega.) Druga potencialna pozitivna povratna zanka, ki bi nam morala povzročati skrbi, pa je povezana z metan hidrati, ki jih v gigatonskih količinah zamrznjene najdemo denimo v arktični Siberiji, v 100-gigatonskih količinah pa v oceanih na kontinentalnih policah. Globalno segrevanje za več kot 1°C bi jih najverjetneje stalilo, ob tem bi se v ozračje sprostil metan, ta pa globalno segrevanje povečuje še bolj kot CO_2 .

V večje podrobnosti o negotovostih, povezanih s podnebnimi spremembami, se v tej knjigi ne bomo spuščali. V branje toplo priporočam knjigi *Avoiding Dangerous Climate Change* (Schellnhuber in sod. 2006) in *Global Climate Change* (Dessler in Parson 2006) ter članka, ki so ju napisali Hansen in sod. (2007) ter Charney in sod. (1979).



Slika 31.4 Razpadanje manjšega sunka CO_2 , ki danes vstopi v ozračje, po modelu ogljikovega cikla Bern. Vir: Hansen in sod. (2007).

Namen tega poglavja je spregovoriti o zamisli, da bi podnebje spravili v red s pomočjo izsesavanja ogljikovega dioksida iz zraka. Najprej o energijskem strošku tega izsesavanja.

Strošek izsesavanja

Danes črpanje ogljika iz zemlje terja lepe denarce. V prihodnosti bo mogoče lepe denarce prinašalo črpanje ogljika v zemljo. Glede na to, da so sedanji ukrepi za preprečevanje globalnega onesnaženja z ogljikom najverjetneje nezadostni, bo morda kakšna koalicija voljnih v nekaj deset letih plačala izdelavo orjaškega sesalnika in počistila vso to umazanijo.

Preden podrobno opišemo, kako bi zajemali ogljik iz zraka, se pogovorimo o neizogibnem energijskem strošku tega početja. Ne glede na izbrano tehnologijo je treba upoštevati zakone fizike: za nabiranje CO₂ iz zraka in njegovo zgoščanje žal potrebujemo energijo. Fizikalni zakoni pravijo, da moramo vložiti vsaj 0,2 kWh energije na kg CO₂ (tabela 31.5). Glede na to, da je tipičen izkoristek procesov v praksi največ 35 %, ne verjamem, da lahko energijsko porabo zajemanja ogljika kdaj zmanjšamo pod 0,55 kWh na kg.

Predpostavimo, da želimo nevtralizirati izpuste CO₂ tipičnega Evropejca, ki so 11 ton na leto, kar pomeni 30 kg na dan na prebivalca. Pri porabi 0,55 kWh na kg CO₂ za to potrebujemo **16,5 kWh** energije **na dan na prebivalca**. Prav takšna je **britanska poraba elektrike**. Za napajanje orjaškega sesalnika bi torej morali *podvojiti* proizvodnjo elektrike ali vsaj nekako dobiti toliko dodatne energije, kot je sedaj naša proizvodnja elektrike.

Če lahko porabo energije delovanja orjaškega sesalnika zmanjšamo – krasno, izdelajmo jih. A če se z raziskavami in razvojem še tako naprezamo, zakonov fizike ne bomo mogli zaobiti, ti pa pravijo, da za nabiranje CO₂ iz zraka in njegovo zgoščanje v tekočo obliko potrebujemo vsaj 0,2 kWh na kg CO₂.

Katera metoda izsesavanja CO₂ iz zraka je najboljša? Opisal bom štiri tehnologije izgradnje orjaškega sesalnika:

- A. kemične črpalke;
- B. drevesa;
- C. pospešeno preperevanje kamnin;
- D. gnojenje oceanov.

A. Kemijske tehnologije zajemanja ogljika

Kemijske tehnologije z ogljikovim dioksidom običajno opravijo v dveh korakih.



CO₂ najprej *zgostijo*, saj je v ozračju v manjši koncentraciji, potem pa ga *stisnejo* na majhno prostornino in tako pripravijo za shranjevanje (v zemljo ali globine oceana). Vsak korak ima svoj energijski strošek. Kolikšne stroške zahtevajo fizikalni zakoni, vidimo v tabeli 31.5.

Najboljše metode zajemanja CO₂ iz zraka, ki jih v literaturi najdemo do leta 2005, so precej neučinkovite: poraba energije je približno 3,3 kWh na kg, finančni stroški pa približno 140 USD na tono CO₂. Pri takšni porabi energije bi zajemanje Evropejčevih 30 kg na dan stalo **100 kWh na dan**, kar je skoraj enako njegovi dnevni porabi energije (125 kWh). Lahko izdelamo boljše sesalnike?

Klimatolog Wallace Broecker, »najbrž vodilni svetovni zagovornik delovanja Zemlje kot biološkega, kemijskega in fizikalnega sistema«, v zadnjem času veliko govori o še neobjavljeni tehnologiji zajemanja CO₂ iz zraka, ki jo je razvil fizik Klaus Lackner. Broecker meni, da bi svet še naprej lahko kuril fosilna goriva s takšno hitrostjo kot sedaj, CO₂ pa bi sesalo 60 milijonov pralnikov CO₂ (veliki kot pokonci postavljen ladijski kontejner). Koliko energije potrebuje Lacknerjev postopek? Junija 2007 mi je Lackner povedal, da so v laboratoriju dosegli 1,3 kWh na kg, vendar so odtlej razvili nov postopek s smolo, ki CO₂ absorbira, ko je suha, in ga sprošča, ko je vlažna. Junija 2008 mi je povedal, da so v suhem podnebjju porabo energije zgoščanja zmanjšali na približno 0,18–0,37 kWh toplote z majhno uporabno vrednostjo na kg CO₂. Poraba energije stiskanja je 0,11 kWh na kg. Skupna Lacknerjeva poraba energije je tako največ 0,48 kWh na kg. Z Evropejčevimi 30 kg CO₂ na dan smo še vedno pri **14 kWh na dan**, pri čemer je za **3,3 kWh na dan** elektrike, vse drugo pa je toplota.

Hura za napredek tehnike! A nikar ne mislite, da je ta poraba majhna. Samo za delovanje sesalnikov bi morali proizvodnjo energije v svetovnem merilu povečati za približno 20 %.

B. Kaj pa drevesa?

Drevesa so sistem za zajemanje ogljika: CO₂ sesajo iz zraka in pri tem ne kršijo nobenih fizikalnih zakonov. Za ceno enega stroja zmorejo dvoje: napravo za zajemanje ogljika napaja vgrajena sončna elektrarna. Ogljik zajemajo s pomočjo energije, ki jo pridobijo iz sončnega sevanja. Po tem postopku so nastala fosilna goriva, ki jih kurimo, in ob tem se ponuja misel: poskusimo postopek, ki bo nasproten kurjenju fosilnih goriv. Da bi

poraba energije (kWh/kg)	
zgoščanje	0,13
stiskanje	0,07
skupaj	0,20

Tabela 31.5 Neizbežna poraba energije zgoščanja in stiskanja CO₂ iz zraka.



ustvarjali les in ga zakopavali v tla, medtem ko pri sosedih še naprej izkopavajo fosilni les in ga sežigajo? Misel na ustvarjanje zakopanega lesa in sočasno izkopavanje zakopanega lesa je trapasta. A nič zato, izračunajmo, kolikšno površino bi potrebovali, da bi podnebni problem rešili z drevesi.

Največja hitrost, ki jo rastline v Evropi dosežejo pri zajemanju ogljika, je približno 10 ton suhega lesa na hektar na leto – kar je ekvivalentno približno 15 tonam CO₂ na hektar na leto. Če želimo počistiti Evropejčevih 11 ton CO₂ na leto, potrebujemo 7500 kvadratnih metrov gozda na prebivalca. To je *dvakrat več od površine Velike Britanije* na prebivalca. In potem bi morali najti še prostor za trajno hrambo 7,5 tone lesa na prebivalca na leto! Pri gostoti 500 kg na m³ bi bila letna prostornina lesa vsakega posameznika 15 m³. Vsakomur bi se v življenju nabralo 1000 m³ lesa – in ne pozabite, tega bi morali varno shraniti in ga ne bi smeli nikoli pokuriti. To je petkrat več od prostornine tipične hiše. Kdor predlaga, da bi podnebne spremembe odpravili z drevesi, mora vedeti, da potrebujemo zmogljivosti v velikosti države. Ne predstavljam si, kako bi to lahko izvedli.

1 hektar = 10.000 m²

C. Pospešeno preperevanje kamnin

Se lahko velikemu strošku kemičnega načina izsesavanja ogljika pretkano izognemo? Obstaja zanimiva ideja: zdrobimo kamnino, ki absorbira CO₂, in jo pustimo na odprtem. Zamisel bi lahko prodali kot pospeševanje naravnega geološkega procesa. Naj pojasnim.

Na sliki 31.3 sem izpustil dva tokova ogljika: tistega iz kamnin v oceane, kar je povezano z naravnim preperevanjem kamnin, in naravno usedanje v morske sedimente, ki se sčasoma spremenijo v kamnine. Tokova sta razmeroma majhna, vrednosti so približno 0,2 Gt C na leto (0,7 Gt CO₂ na leto). Torej nič v primerjavi s sedanjimi človekovimi 40-krat večjimi ogljikovimi izpusti. A po predlogu pospešenega preperevanja bi lahko podnebje spravili v red tako, da bi pospešili razpadanje kamnin in njeno absorpcijo CO₂. Za to primerni minerali so olivini ali magnezijevi silikati, ki so zelo pogosti. Rudnike bi morali urediti pri nahajališčih, ki so obdana z več kvadratnimi kilometri zemlje, kamor bi razprostrli zdrobljeno kamnino, ali pa bi to razprostrli neposredno po oceanih. V vsakem primeru bi absorbirala CO₂ in se spremenila v karbonate, te pa bi odplaknilo v oceane. Za dovolj fino drobljenje kamnine, da bi reakcija s CO₂ stekla, bi potrebovali samo 0,04 kWh na kg izsesanega CO₂. Trenutek, ni to manj od 0,20 kWh na kg, kolikor zahtevajo fizikalni zakoni? Res je, vendar je vse v najlepšem redu: kamnina je sama vir manjkajoče energije. Silikati vsebujejo več energije kot karbonati, zato rabo energije izsesavanja CO₂ iz zraka poravna kamnina.

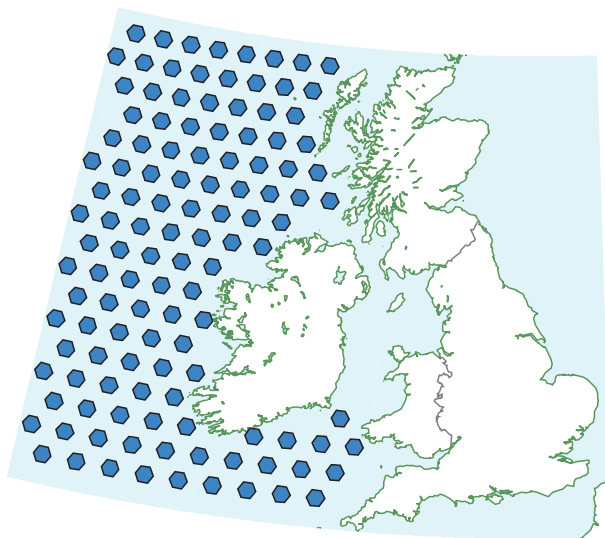
Majhna poraba energije tega načrta mi je všeč, zastavlja pa se zoprno vprašanje: kdo se javi, da bo svojo državo prekril z zdrobljeno kamnino?

D. Gnojenje oceanov

Težava s kemičnimi, drevesnimi in kamninskimi načini izsesavanja CO_2 iz zraka je ta, da bi bilo z njimi veliko dela, motivacije za takšno početje pa nima nihče – razen če financiranje zajemanja ogljika uredimo z mednarodno pogodbo. Cena ogljika je za zdaj prenizka.

Zadnja zamisel za izsesavanje ogljika bi se tej težavi izognila, glasi pa se takole: ocean bi prepričali, naj zajema ogljik nekoliko hitreje kot običajno, vse skupaj pa bi bil stranski produkt ribogojstva.

V nekaterih delih sveta primanjkuje hrane. Zaradi prekomernega ribolova v zadnjih 50 letih ponekod primanjkuje tudi rib. *Gnojenje oceanov* pomeni, da bi oceane pognojili in tako okrepili začetek prehranjevalne verige, s tem pa bi oceani lahko nahranili več rastlinstva in rib, mimogrede pa zajeli še več ogljika. Inženirji za gnojenje oceanov pod vodstvom avstralskega znanstvenika Iana Jonesa želijo v z ribami ustrezno osiromašen del oceana vbrizgati dušikovo gnojilo, kakršno je sečnina. Trdijo, da bi 900 km² oceana z gnojenjem zajelo približno 5 Mt CO_2 /leto. Po njihovem mnenju je postopek gnojenja oceanov primeren za katerokoli oceansko območje, kjer primanjkuje dušika, kar pomeni večino severnega Atlantika. Izrišimo to zamisel na zemljevidu. Britanski ogljikovi izpusti so približno 600 Mt CO_2 /leto. Za njihovo popolno izničenje bi torej potrebovali 120 takšnih oceanskih območij. Na sliki 31.6 so v merilu narisana ob Britanskem otočju. Kot običajno za načrt, ki se v resnici izide, potrebujemo zmogljivosti v velikosti države! Vprašanja, kako bi prišli do vse potrebne sečnine, pa se nismo niti lotili.



Slika 31.6 120 območij v Atlantskem oceanu po 900 km². Tolikšno skupno površino bi po ocenah potrebovali, da bi z gnojenjem oceanov odpravili britanske ogljikove izpuste.

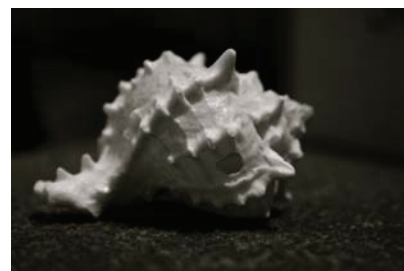
Zamisel o gnojenju oceanov je nepreverjena in za zdaj prepovedana, a se mi vendarle zdi zanimiva, saj bi jo v nasprotju z geološkim shranjevanjem ogljika lahko izvedli, tudi če mednarodna skupnost ne privoli v visok strošek odpravljanja onesnaženja z ogljikom. Ribiči bi lahko pognojili oceane tudi zato, da bi povečali ulov.

Ni težko napovedati, da bodo analitiki nasprotovali spreminjanju oceanov in se pri tem namesto na potencialne koristi osredotočili na neznanke. Igrali bodo na karto strahu javnosti pred neznanim. Ljudje so pripravljeni pasivno sprejemati stopnjevanje ustaljene prakse (npr. spuščanja CO₂ v ozračje), inovacije, ki bi jim lahko v prihodnosti povečale blaginjo, pa jih skrbijo. Njihov odpor do tveganja je nesorazmerno velik.

Ian Jones

Naše človeštvo v ozračje ne more sprostiti vsega CO₂ iz fosilnih goriv, niti večine ne. Takšno ravnanje bi zanesljivo povzročilo dramatične podnebne spremembe, ki bi prinesle drugačen planet ...

J. Hansen in sod. (2007)



*»Izognitev hudim podnebnim spremembam« ni mogoča – hude podnebne spremembe so že tu. Vprašanje je, ali se lahko izognemo **katastrofičnim** podnebnim spremembam.*

David King, glavni vladni svetovalec za znanost, 2007

Opombe

stran

240 /.../ je vprašanje »Se podnebje res spreminja?« sprožalo polemike. V resnici še vedno obstaja »prepad med prevladujočim mnenjem izobraženih elit o podnebnih spremembah v Evropi in tistim v Ameriki« [voxbz].

241 Kje je ogljik? Vira: Schellnhuber in sod. (2006), Davidson in Janssens (2006).

242 Hitrost kurjenja fosilnih goriv /.../. Vir: Marland in sod. (2007).

– Najnovejše raziskave nakazujejo, da oceani ogljik sprejemajo čedalje počasneje. www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece, www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188, [yofchc], Le Quéré in sod. (2007).

– /.../ približno polovica ogljikovih izpustov ostane v ozračju. Za povečanje koncentracije CO₂ v ozračju za en delec na milijon (1 ppm) potrebujemo v ozračju 2,1 milijarde ton ogljika (7,5 Gt CO₂). Če bi ves CO₂, ki ga spuščamo v ozračje, tam ostal, bi se koncentracija povečevala za več kot 3 ppm na leto, dejansko pa se za samo 1,5 ppm na leto.

– Radioaktivni ogljik /.../ je prodril do globine komaj 400 m. Srednja vrednost globine radioaktivnega C-14 je za vsa opazovana območja v poznih 70. letih 390 39 m (Broecker in sod. 1995). Iz [3e28ed].

244 Globalno segrevanje za več kot 1 °C bi metan hidrat najverjetneje stalilo. Vir: Hansen in sod. (2007, str. 1942).

245 Tabela 31.5. Neizbežni strošek zgoščanja in stiskanja CO₂ iz zraka. Energijske potrebe za zgostitev CO₂ z 0,03 % na 100 % pri atmosferskem tlaku so najmanj $kT \ln 100/0,003$ na molekulo, kar je **0,13 kWh na kg**. Idealna poraba energije

stiskanja CO₂ na 110 barov (tlak, ki ga omenjajo pri geološkem shranjevanju) je 0,067 kWh/kg. Skupna idealna poraba energije zajemanja in stiskanja CO₂ je tako 0,2 kWh/kg. Po navedbah posebnega poročila IPCC o zajemanju in shranjevanju ogljika je poraba energije drugega koraka, stiskanja CO₂ na 110 barov, v praksi 0,11 kWh na kg. (0,4 GJ na t CO₂, 18 kJ na mol CO₂, 7 kT na molekulo.)

245 *Shranjevanje CO₂ v zemljo ali globine oceana.* Več o tem v Williams (2000). »Da večji del vbrizganega CO₂ ostane v oceanu, je treba vbrizgavati v velike globine. Vzpostavlja se enotno stališče, da bi bila najboljša strategija za bližnjo prihodnost izpuščati CO₂ pri globini 1000–1500 metrov, kar je z obstoječimi tehnologijami izvedljivo.«

Glejte tudi posebno poročilo odbora IPCC: www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.

– *Najboljše metode zajemanja CO₂ iz zraka, ki jih v literaturi najdemo do leta 2005, so precej neučinkovite: poraba energije je približno 3,3 kWh na kg, finančni pa okoli 140 USD na tono CO₂.* Viri: Keith in sod. (2005), Lackner in sod. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David in Herzog (2000).

– *Klimatolog Wallace Broecker /.../.* www.af-info.or.jp/eng/honor/hot/enrbro.html. O njegovi knjigi o umetnih drevesih: Broecker in Kunzig (2008).

246 *Največja hitrost, ki jo rastline v Evropi dosežejo pri zajemanju ogljika, je približno 10 ton suhega lesa na hektar na leto.* Vir: Ožji odbor za znanost in tehnologijo pri britanskem parlamentu.

– *Pospešeno preperevanje kamnine.* Glejte Schuiling in Krijgsman (2006).

247 *Gnojenje oceanov.* Glejte Judd in sod. (2008). Glejte tudi Chisholm in sod. (2001). O nevarnostih gnojenja oceanov govori Jones (2008).

32 Odgovarjati z da

Velika Britanija pridobi 90 % energije s pomočjo fosilnih goriv, zato je jasno, da bi morali za prekinitev njihove rabe uvesti velike, velike spremembe – popolnoma spremeniti vozni park, v celoti zamenjati veličino ogrevalnih sistemov in 10- do 20-krat povečati količino okolju prijazne energije.

Glede na splošno nagnjenost javnosti, da reče »ne« vetrnim elektrarnam, »ne« jedrski energiji, »ne« plimskim pregradam – »ne« vsemu, kar ni elektrarna na fosilna goriva –, me skrbi, da rabe fosilnih goriv ne bomo zares prekinili, ko bo to potrebno. Ubrali bomo polovičarsko pot: malenkost večja učinkovitost elektrarn na fosilna goriva, avtomobilov in ogrevalnih sistemov, za mišji rep trgovanja z ogljikom, ščepec vetrnic in nezadostno število jedrskih elektrarn.

Odločiti se moramo za načrt, ki se izide. Takšen načrt *je* mogoče narediti, ne bo pa preprosto.

Prenehajmo govoriti »ne« in začnimo odgovarjati z »da«. Ustavimo ves ta cirkus in začnimo graditi.

Če želite pošteno, realno energetska strategijo, ki se izide, prosim, povejte to svojim političnim predstavnikom in kandidatom za njihove naslednike.

Zahvale

Za uvajanje v okoljevarstvo se zahvaljujem Robertu MacKayu, Gale Ryba in Mary Archer.

Za več deset let intenzivnih pogovorov o vsaki najmanjši podrobnosti hvala Matthewu Bramleyju, Miku Catesu in Timu Jervisu.

Za dobre ideje, navdih, dobre predlagane ubeseditve, koristno kritiko in spodbudo imajo zasluge naslednji posamezniki, ki so vsi po vrsti sooblikovali to knjigo: 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 in 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, Tadashi 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 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 Hart-Davis, 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 Dунand, Nick Cook, Leon di Marco, Dave Fisher, John Cox, Jonathan Lee, Richard Procter, Matt Taylor, Carl Scheffler, Chris Burgoyne, Francisco Monteiro, Ian McChesney in Liz Moyer. Hvala vsem.

Za pomoč pri iskanju podnebnih podatkov se zahvaljujem Emily Shuckburgh. Neizmerno sem hvaležen Kele Baker za zbrane podatke o električnih avtomobilih na sliki 20.21. Zahvaljujem se tudi Davidu Sterrattu za znanstvene prispevke ter Niallu Mansfieldu, Jonathanu Zwartu in Anni Jones za izvrstne uredniške nasvete.

Napake, ki so še ostale, so seveda moje.

Veliko dolgujem predvsem Sebu Willsu, Philu Cowansu, Oliverju Steglu, Patricku Welchu in Carlu Schefflerju, ki so skrbeli za nemoteno delovanje mojih računalnikov.

Zahvaljujem se Afriškemu inštitutu za matematične znanosti iz Cape Towna in Inštitutu za matematične znanosti Isaac Newton iz Cambridgea za njuno gostoljubje.

Lepa hvala skupini za digitalno tehnologijo pri Računalniškem laboratoriju iz Cambridgea in oddelku za fiziko Univerze Heriot-Watt za spletno dostopnost vremenskih podatkov. Hvala Jersey Water in Guernsey Electricity za voden ogled njihovih objektov.

Hvala Gilby Productions za storitev TinyURL. TinyURL je blagovna znamka Gilby Productions. Hvala Ericu Johnstonu in Satellite Signals Limited za lep vmesnik za zemljevide [www.satsig.net].

Hvala Davidu Sternu za portret, Becky Smith za legendarne ilustracije in Claire Jervis za fotografije na straneh ix, 31, 90, 95, 153, 245, 289 in 325. Za vse druge fotografije so zaslužni Robert MacKay, Eric LeVin, Marcus Frean, Rosie Ward, Harry Bhadesia, Catherine Huang, Yaan de Carlan, Pippa Swannell, Corinne Le Quéré, David Faiman, Kele Baker, Tim Jervis in neimenovani avtorji Wikipedie. Hvaležen sem uradu londonskega župana za kopije oglasov.

Avtor umetniških del na straneh 240, ›*Maid in London*‹, in 288, ›*Sunflowers*‹, je Banksy, www.banksy.co.uk. Hvala, Banksy!

Nadomestila so nudili pri cheatneutral.com.

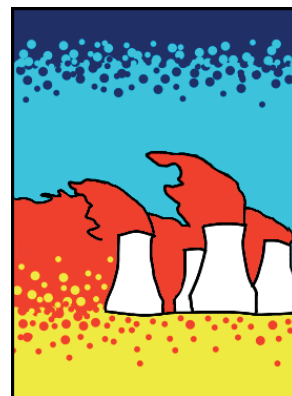
Knjiga je napisana v zapisu LaTeX v operacijskem sistemu Ubuntu GNU/Linux s prosto dostopno programsko opremo. Slike so izrisane z orodji gnuplot in metapost. Veliko zemljevidov je nastalo s pomočjo programa gmt Paula Wessla in Walterja Smitha. Hvala tudi Martinu Weineltu in OMC. Hvala Donaldu Knuthu, Leslieju Lamportu, Richardu Stallmanu, Linusu Torvaldsu in vsem, ki so zaslužni za prosto dostopno programsko opremo.*

In ne nazadnje, največja zahvala gre Gatsby Charitable Foundation, ki so podpirali mojo raziskovalno skupino in mene v času pisanja te knjige ter pred in po tem.

* Zahvale avtorja se nanašajo na britansko izdajo knjige.

3. del

Tehnična poglavja



A Avtomobili II

Ocenili smo, da avtomobil na 100-kilometrski vožnji porabi približno 80 kWh energije.

Kam gre ta energija? Kako je odvisna od lastnosti avtomobila? Ali bi lahko izdelali avtomobile, ki so stokrat bolj učinkoviti? Pomagajmo si s preprosto risbico vožnje avtomobila in poskusimo razložiti, kam gre energija. Pri tipičnem avtomobilu na fosilna goriva se energija porazdeli na štiri dele, ki si jih bomo pogledali podrobneje, in sicer:

1. pospeševanje in zaviranje s pomočjo zavor;
2. zračni upor;
3. kotalni upor;
4. toplota – 75 % energije se izgubi kot toplota, saj je energijska veriga neučinkovita.

Za začetek bomo na risbi zanemarili kotalni upor in ga dodali pozneje v poglavju.

Domnevajmo, da voznik hitro pospešuje do potovalne hitrosti v in ohranja to hitrost na dolžini d , ki predstavlja razdaljo med semaforji, stop znaki ali zamaški v prometu. Na tej točki voznik pritisne na zavoro in s tem se vsa kinetična energija pretvori preko trenja v toploto na zavorah. (Naš avtomobil nima imenitnega regenerativnega zaviranja.) Ko se želi ponovno premakniti, voznik spet pospeši do potovalne hitrosti v . To pospeševanje povečuje avtomobilu kinetično energijo, zaviranje pa mu jo odvzame.

Energija pa ne gre samo v zavore. Ko se avtomobil premika, se okrog njega vrtinči zrak. Avtomobil tako za sabo pušča zračni kanal, v katerem je hitrost zraka približno enaka hitrosti avtomobila v . Katera od dveh energij je večja: kinetična energija zraka v zračnem kanalu ali toplota na zavorah? Pa poglejmo.

- Avtomobil pospeši in upočasni le enkrat na razdalji d . Energijski tok v zavore je:

$$\frac{\text{kinetična energija}}{\text{čas med dvema zaviranjem}} = \frac{\frac{1}{2}m_c v^2}{d/v} = \frac{\frac{1}{2}m_c v^3}{d}, \quad (\text{A.1})$$

pri čemer je m_a masa avtomobila.



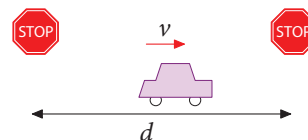
Slika A.1 Koeficient zračnega upora pri avtomobilu znamke Peugeot 206 je 0,33. Avtor fotografije: Christopher Batt.

Ključna formula za večino izračunov v knjigi je:

$$\text{kinetična energija} = \frac{1}{2}mv^2$$

Na primer: avto z maso $m_a = 1000$ kg, ki se giblje s hitrostjo 100 km/h oziroma 28 m/s (v), ima naslednjo energijo:

$$\frac{1}{2}m_a v^2 \simeq 390\,000 \text{ J} \simeq 0,1 \text{ kWh.}$$



Slika A.2 Naša risba: avtomobil se premika s hitrostjo v med stop znakoma, ki ju razmejuje razdalja d .

Slika A.3 Avtomobil, ki se premika s hitrostjo v , ustvarja za seboj zračni kanal, pri čemer je presek tega kanala enak čelni površini avtomobila, hitrost, s katero se vrtinči zrak, pa je približno enaka v .

- Prostornina zračne cevi, ki se ustvari v času t , je enaka Avt , pri čemer A označuje površino prečnega preseka zračnega kanala, ki je zelo podobna čelni površini avtomobila. (Pri aerodinamično oblikovanih avtomobilih je A nekoliko manjši kot čelna površina avtomobila A_{avto} , razmerju med efektivnim prečnim presekom zračnega kanala in čelno površino avtomobila pa rečemo koeficient zračnega upora c_d . V vseh naslednjih enačbah bo enota A označevala efektivni prečni presek avtomobila $c_d A_{\text{avto}}$.) Masa zraka v cevi je $m_z = \rho Avt$ (kjer ρ označuje gostoto zraka), zrak pa se vrtinči s hitrostjo v , kar pomeni, da je njegova kinetična energija naslednja:

$$\frac{1}{2} m_z v^2 = \frac{1}{2} \rho Avt v^2,$$

Hitrost prenosa kinetične energije v vrtince v zračnem kanalu pa je:

$$\frac{\frac{1}{2} \rho Avt v^2}{t} = \frac{1}{2} \rho A v^3.$$

Tako lahko skupni energijski tok, ki ga proizvede avtomobil, izračunamo kot:

$$\begin{aligned} \text{energijski tok v zavore} &+ \text{energijski tok v vrtince zraka} \\ = \frac{1}{2} m_c v^3 / d &+ \frac{1}{2} \rho A v^3. \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Obe obliki porabe energije sta sorazmerni s tretjo potenco hitrosti v^3 . Tako naša risba predvideva, da bo voznik, ki razpolovi svojo hitrost v , s tem osemkrat zmanjšal porabo energije. Če prevozi enako končno razdaljo, bo torej za pot porabil dvakrat toliko časa, skupna poraba energije pa bo štirikrat manjša.

Katera izguba energije - zaviranje ali vrtinčenje zraka - je večja? To je odvisno od razmerja:

$$(m_c / d) / (\rho A).$$

Če je razmerje bistveno večje od 1, potem se več energije prenese na zavore. Če je razmerje manjše, se več energije prenese v vrtinčenje zraka. Če zadevo obrnemo: razmerje je večje od 1, če velja:

$$m_c > \rho A d.$$

Torej, Ad predstavlja prostornino zračnega kanala med enim in drugim stop znakom, $\rho A d$ pa predstavlja njegovo maso. Situacija je pravzaprav zelo preprosta: če je masa avtomobila *večja* od mase zraka med obema stop znakoma, potem prevlada poraba energije zaradi pretvorbe kinetične energije v toploto na zavorah, če pa je masa avtomobila *manjša*, potem prevlada poraba zaradi tvorbe zračnih vrtincev v kanalu (slika A.4).

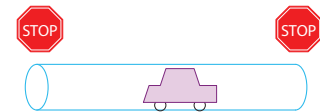
Določimo sedaj tisto mejno vrednost za razdaljo d^* med krajnima točkama, pod katero porabo energije narekuje zaviranje in nad katero porabo energije narekuje vrtinčenje zraka (premagovanje zračnega upora). Če je čelna projekcija avtomobila

$$A_{\text{avto}} = 2 \text{ m (širina)} \times 1,5 \text{ m (višina)} = 3 \text{ m}^2$$

Uporabljena je enačba:

$$\text{masa} = \text{gostota} \times \text{prostornina}$$

Simbol ρ (grška črka »rho«) označuje gostoto.



Slika A.4 Da bi ugotovili, ali se več energije porabi za zaviranje ali za premagovanje zračnega upora, kjer se ustvarja zračni kanal, primerjajmo maso avtomobila z maso zračnega kanala, ki se ustvari med stop znakoma.



Slika A.5 Energija, ki jo porabi avtomobil, je sorazmerna s prečnim presekom avtomobila med vožnjo po avtocesti ter z njegovo maso med vožnjo po mestu. Uganite, kdo prevozi daljšo razdaljo z enim rezervoarjem goriva – VW na levi ali vesoljska ladja na desni?

koeficient zračnega upora $c_d = 1/3$, masa pa je $m_a = 1000\text{ kg}$, potem je razdalja, ki jo iščemo:

$$d^* = \frac{m_c}{\rho c_d A_{avto}} = \frac{1000\text{ kg}}{1,3\text{ kg/m}^3 \times \frac{1}{3} \times 3\text{ m}^2} = 750\text{ m}.$$

Pri »mestni vožnji« porabo energije narekujejo kinetična energija in zaviranje, če je razdalja med krajnima točkama manjša od 750 m. Če želite v takih pogojih prihraniti energijo, je dobro upoštevati naslednja priporočila:

- 1. zmanjšajte maso vozila,
- 2. kupite avtomobil z regenerativnimi zavorami (ki skoraj razpolovijo izgubo energije pri zaviranju – glejte poglavje 20) ter
- 3. zmanjšajte hitrost vožnje.

Če gre za razdaljo, ki je bistveno večja od 750 m, potem se večina energije porabi zaradi premagovanja zračnega upora. V tem primeru ni bistvenega pomena, koliko tehta vaš avtomobil. Poraba energije bo približno enaka ne glede na to, ali v avtu sedi en sam človek ali jih sedi šest. Zmanjšamo jo lahko tako, da:

- 1. zmanjšamo koeficient zračnega upora avtomobila,
- 2. zmanjšamo prečni presek ali
- 3. vozimo počasneje.

Dejanska poraba energije pri avtomobilu je izguba energije iz enačbe (A.2), povečana za faktor neučinkovitosti motorja in prenosa. Izkoristek tipičnega bencinskega motorja je približno 25 %, kar pomeni, da se tri četrtine kemične energije, ki jo avto popije, izgubi v obliki toplote in le ena četrtina je pravzaprav »uporabna« energija:

$$\text{skupna moč avtomobila} \simeq 4 \left[\frac{1}{2} m_c v^3 / d + \frac{1}{2} \rho A v^3 \right].$$

Preverimo to teorijo z realnimi številkami pri vožnji po avtocesti. Denimo, da je hitrost $v = 110\text{ km/h} = 31\text{ m/s}$ in naj bo $A = c_d A_{avto} = 1\text{ m}^2$. Groba ocena moči delovanja motorja je:

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3 = 2 \times 1,3\text{ kg/m}^3 \times 1\text{ m}^2 \times (31\text{ m/s})^3 = 80\text{ kW}.$$

Če bi vsak dan eno uro vozili avto pri tej hitrosti, bi prevozili 110 km in porabili dnevno **80 kWh** energije. Če bi vozili dve uri dnevno pri polovični hitrosti, bi prevozili isto razdaljo in porabili **20 kWh** energije. Ta preprosta teorija se sklada s podatki o skupnem številu prevoženih kilometrov v 3. poglavju. Poleg tega pa pojasni tudi to, kako lahko zmanjšamo porabo energije našega avtomobila. Seveda pa ima nekaj pomanjkljivosti, ki se jim bomo posvetili v nadaljevanju.

PORABA ENERGIJE NA RAZDALJO	
Avtomobil pri 100 km/h	↔ 80 kWh/(100 km)
Kolo pri 21 km/h	↔ 2,4 kWh/(100 km)

LETALO PRI 900 km/h	
A380	27 kWh/100 sedež km*

* 1 letalski sedež, ki preleti 1 km. Ob polni zasedenosti kapacitet letala je 1 skm enak 1 pkm (op. prev.)

Tabela A.6 Podatki, ki si jih je vredno zapomniti: poraba energije pri avtomobilu.

Je mogoče izdelati avtomobil, ki bi porabil 100-krat manj energije in še vedno dosegel hitrost 110 km/h? **Ne.** Vsaj ne takega, ki bi bil enake oblike, kot so avtomobili dandanes. Na avtocesti se pri 110 km/h večina energije porabi za ustvarjanje zračnega kanala. Če bi izbrali drugačen material za avtomobil, ne bi dosegli nobene razlike. S čudežnim izboljšanjem motorja na fosilna goriva pa bi morda povečali njegov izkoristek za 25 do 50 %, s čimer bi se poraba energije avtomobila na fosilna goriva zmanjšala na približno 40 kWh na 100 km.

Električna vozila imajo nekatere prednosti: medtem ko je teža hranilnika energije na kWh uporabne energije približno 25-krat večja kot pri bencinu, je lahko teža električnega motorja približno osemkrat manjša. Poleg tega je energijska veriga pri električnem avtomobilu veliko bolj učinkovita, saj je lahko izkoristek električnega motorja kar 90-odstoten.

K električnim avtomobilom se bomo vrnili proti koncu poglavja, ko si jih bomo podrobneje pogledali.

Kolesa in trik s »skaliranjem«

Pozabavajmo se malce z naslednjim vprašanjem: kakšna je poraba energije (v kWh) kolesa na 100 km? Poganjanje na kolesu zahteva energijo iz istega razloga kot pri avtomobilu: okrog kolesa s kolesarjem se tvori zračni kanal. Na tem mestu bi lahko začeli z izračuni spet od začetka in pri tem samo zamenjali podatke za avtomobil s podatki za kolo. Lahko pa uporabimo preprost trik, s katerim dobimo rezultate za kolo iz rezultatov za avtomobil. Energija, ki jo porabi avtomobil na enoto razdalje, ki jo prevozi, je enaka energijskemu toku, ki je potreben za ustvarjanje vrtincev v zračnem kanalu

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3,$$

deljeno s hitrostjo v :

$$\text{energija na enoto razdalje} = 4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2.$$

Faktor »4« je zaradi izgub motorja, ρ je gostota zraka, $A = c_d A_{\text{avto}}$ je efektivni prečni presek avtomobila, v pa je njegova hitrost.

Kolo lahko primerjamo z avtomobilom tako, da vrednost $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2$ za kolo delimo s $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2$ za avtomobil. Vsi ulomki in ρ -ja se okrajšajo, če je učinkovitost motorja kolesa podobna učinkovitosti avtomobilskega motorja (kar je). Razmerje je:

$$\frac{\text{energija kolesa na enoto razdalje}}{\text{energija avtomobila na enoto razdalje}} = \frac{c_{d, \text{kolo}} A_{\text{kolo}} v_{\text{kolo}}^2}{c_{d, \text{avto}} A_{\text{avto}} v_{\text{avto}}^2}.$$

Trik, ki ga tu uporabimo, se imenuje »skaliranje«. Če vemo, kako se poraba energije spreminja v odvisnosti od hitrosti in površine, potem lahko napovemo porabo energije za predmete s popolnoma različnimi hitrostmi

KOEFIICIENTI ZRAČNEGA UPORA	
AVTOMOBILI	
Honda Insight	0,25
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
Kolesar	0,9
Medkrajevni avtobus	0,425
LETALA	
Cessna	0,027
Learjet	0,022
Boeing 747	0,031
EFEKTIVNI PREČNI PRESEK VOZILA (m²)	
Land Rover Discovery	1,6
Volvo 740	0,81
Tipični avtomobil	0,8
Honda Civic	0,68
VW Polo GTi	0,65
Honda Insight	0,47

Tabela A.7 Koeficienti zračnega upora in efektivni prečni preseki.

in prečnimi preseki. Oziroma bolj natančno: predpostavimo, da je razmerje med prečnima presekom kolesa in avtomobila naslednje:

$$\frac{A_{\text{kolo}}}{A_{\text{avto}}} = \frac{1}{4}.$$

(Štirje kolesarji lahko sedijo z ramo ob rami znotraj širine avtomobila.)
Predpostavimo, da kolo ni zelo aerodinamično:

$$\frac{c_{\text{d}}^{\text{kolo}}}{c_{\text{d}}^{\text{avto}}} = \frac{1}{1/3}$$

Predpostavimo še, da je hitrost kolesa 21 km/h, tako da je:

$$\frac{v_{\text{kolo}}}{v_{\text{avto}}} = \frac{1}{5}.$$

Iz tega sledi:

$$\begin{aligned} \frac{\text{energija kolesa na enoto razdalje}}{\text{energija avtomobila na enoto razdalje}} &= \left(\frac{c_{\text{d}}^{\text{kolo}}}{c_{\text{d}}^{\text{avto}}} \frac{A_{\text{kolo}}}{A_{\text{avto}}} \right) \left(\frac{v_{\text{kolo}}}{v_{\text{avto}}} \right)^2 \\ &= \left(\frac{3}{4} \right) \times \left(\frac{1}{5} \right)^2 \\ &= \frac{3}{100} \end{aligned}$$

Tako lahko vidimo, da kolesar pri 21 km/h porabi na kilometer približno 3 % energije, ki jo porabi avtomobil z enim potnikom na avtocesti, to pa je približno **2,4 kWh na 100 km**.

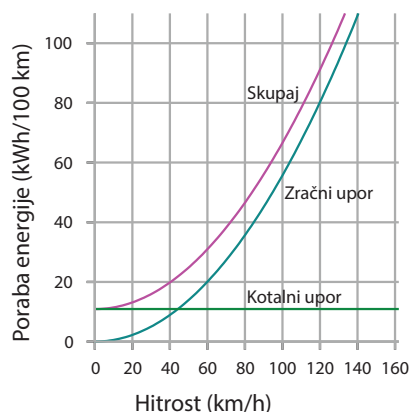
Če bi radi imeli vozilo, pri katerem je izkoristek goriva 30-krat večji od avtomobila, je odgovor preprost: vozite se s kolesom.

Kaj pa kotalni upor?

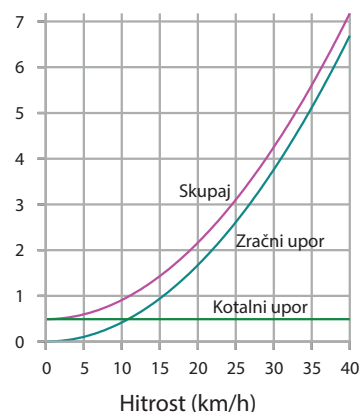
Nekatere stvari, ki smo jih do te točke popolnoma zanemarili, so: energija, ki se porablja na avtomobilskih pnevmatikah in ležajih, energija, ki gre v hrup, ki ga ustvarjajo kolesa na asfaltu, energija, ki gre v obrabljanje gume na avtomobilskih pnevmatikah, ter energija, s katero vozilo povzroči vibriranje vozišča oz. podlage. Skupno ime za te oblike porabljanja energije je *kotalni upor*. Standardni model kotalnega upora predvideva, da je sila kotalnega upora preprosto sorazmerna s težo vozila ne glede na hitrost.

Kolesa	C _{rr}
vlak (jeklo na jeklo)	0,002
kolesarska pnevmatika	0,005
kamionske pnevmatike	0,007
avtomobilske pnevmatike	0,010

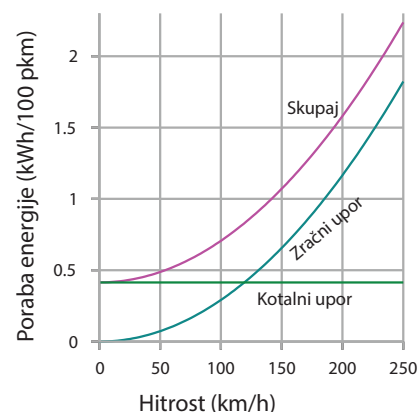
Tabela A.8 Kotalni upor je enak teži vozila, pomnoženi s koeficientom kotalnega upora, C_{rr}. Kotalni upor vključuje silo zaradi upogiba koles, izgube zaradi trenja v kolesnih ležajih, tresenje in vibracije tako podlage, tj. ceste kot tudi vozila (vključno z energijo, ki jo absorbirajo amortizerji), ter zdrsanje koles na cesti ali železniških tirih. Koeficient se spreminja glede na kakovost vozišča, material kolesa in temperature. Številke, navedene v tabeli, veljajo za gladke ceste oz. vozne površine. [2bhu35]



Slika A.9 Preprosta teorija porabe goriva pri avtomobilu (poraba energije na določeni razdalji) pri vožnji z enakomerno hitrostjo. Predpostavke: izkoristek pri avtomobilskem motorju je 0,25 ne glede na hitrost; $c_d A_{\text{avto}} = 1 \text{ m}^2$; $m_a = 1000 \text{ kg}$; in $C_{rr} = 0,01$.



Slika A.10 Preprosta teorija porabe goriva pri kolesu (poraba energije na določeni razdalji). Vertikalna os predstavlja porabo energije v kWh na razdalji 100 km. Predpostavke: izkoristek motorja kolesa (tj. kolesar!) je 0,25; efektivni prečni presek kolesarja je $0,75 \text{ m}^2$; masa kolesa s kolesarjem je 90 kg; koeficient kotalnega upora (C_{rr}) pa je 0,005.



Slika A.11 Preprosta teorija porabe energije na potnika pri vlaku z osmimi vagoni, ki prevaža skupno 584 potnikov. Vertikalna os predstavlja porabo energije v kWh na 100 pkm. Predpostavke: izkoristek motorja vlaka je 0,90; $c_d A_{\text{vlak}} = 11 \text{ m}^2$; $m_v = 400\,000 \text{ kg}$; in $C_{rr} = 0,002$.

Konstanto sorazmernosti imenujemo koeficient kotalnega upora (C_{rr}). Tabela A.8 prikazuje nekaj tipičnih vrednosti.

Koeficient kotalnega upora za avtomobil je približno 0,01. Učinek kotalnega upora je tak, kot da bi konstantno vozili navkreber po hribu z 1-odstotnim naklonom. Kotalni upor znaša torej neodvisno od hitrosti približno 100 newtonov na tono. To lahko potrdimo tako, da porivamo tipičen enotonski avtomobil po ravni cesti. Ko ga enkrat premaknemo, ga lahko porivamo zgolj z eno roko (100 newtonov je približno enako teži 100 jabolk). Moč, ki je potrebna za premagovanje kotalnega upora pri enotonskem vozilu s hitrostjo 31 m/s, izračunamo z naslednjo enačbo:

$$\text{sila} \times \text{hitrost} = (100 \text{ newtonov}) \times (31 \text{ m/s}) = 3100 \text{ W}.$$

Če predvidevamo, da je učinkovitost motorja 25-odstotna, porabi motor 12 kW moči; moč, potrebna za premagovanje zračnega upora, pa je na strani 256 ocenjena na 80 kW. Pri velikih hitrostih se tako približno 15 % moči porabi za premagovanje kotalnega upora.

Slika A.9 prikazuje teorijo porabe goriva (poraba energije na enoto razdalje) kot funkcijo stalne hitrosti ob upoštevanju zračnega in kotalnega upora.

Hitrost, pri kateri je kotalni upor avtomobila enak zračnemu upor, dobimo z naslednjim izračunom:

$$C_{rr} m_c g = \frac{1}{2} \rho c_d A_{avto} v^2,$$

To je:

$$v = \sqrt{2 \frac{C_{rr} m_c g}{\rho c_d A_{avto}}} = 7 \text{ m/s} = 13 \text{ m/s}$$

Kolo

Pri kolesu ($m = 90 \text{ kg}$, $A = 0,75 \text{ m}^2$) je mejna hitrost, kjer zračni upor prevlada nad kotalnim, približno 12 km/h . Raba energije pri vožnji s kolesom s konstantno hitrostjo 20 km/h je približno **2,2 kWh na 100 km**. V bolj aerodinamičnem, spuščnem položaju pa lahko kolesar zmanjša površino, na katero deluje zračni upor, in s tem porabo energije na približno $1,6 \text{ kWh}$ na 100 km .

Vlak

Pri vlaku z osmimi vagoni, kakršen je prikazan na sliki 20.4 ($m = 400.000 \text{ kg}$, $A = 11 \text{ m}^2$), je mejna hitrost, nad katero je zračni upor večji kot kotalni upor,

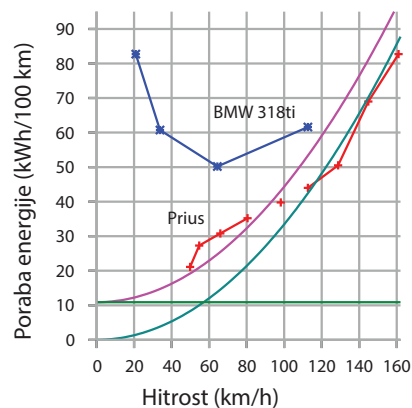
$$v = 33 \text{ m/s}.$$

Pri vlaku z enim vagonom ($m = 50.000 \text{ kg}$, $A = 11 \text{ m}^2$) pa je mejna hitrost, nad katero je zračni upor večji kot kotalni upor,

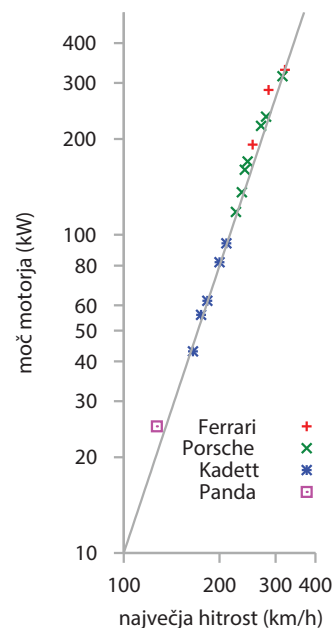
$$v = 12 \text{ m/s}.$$

Odkritje med močjo in hitrostjo

Ko ljudem povem, da naj bi vožnja pri polovični hitrosti zmanjšala porabo goriva (v kilometrih na liter) na četrtno običajne porabe, se jih večina odzove z dvomom. In po svoje imajo prav: večina avtomobilskih motorjev ima optimalno nastavitve obratov ter nabor prestav, ki določajo hitrosti, pri katerih dosegamo najoptimalnejši izkoristek motorja. Če torej predlagani preizkus, pri katerem vozimo pri polovični hitrosti, pomeni, da avtomobil vozi zunaj predvidenih hitrostnih okvirov, se njegova poraba mogoče le ne bo zmanjšala na četrtno. Moja tiha predpostavka, da je motor enako učinkovit pri vseh hitrostih in obremenitvah, je pripeljala do zaključka, da je vedno dobro (v smislu porabe goriva na kilometer) voziti počasneje. Vendar pa če učinkovitost motorja odpove pri nizkih hitrostih, je verjetno najoptimalnejša hitrost za čim manjšo porabo goriva neka vmesna hitrost, ki je pravzaprav kompromis med počasno vožnjo in ohranjanjem optimalne učinkovitosti motorja. Optimalna hitrost avtomobila BMW 318ti na sliki A.12 je na primer približno 60 km/h . A če bi se družba nenadoma odločila, da je treba splošno omejiti hitrosti avtomobilov, ne bi bilo nikakršne ovire



Slika A.12 Poraba goriva pri današnjih vozilih ni sorazmerna s kvadratom hitrosti. Podatke za Prius je priskrbel B. Z. Wilson, podatke za BMW pa Phil C. Stuart. Gladka krivulja prikazuje primer, ko poraba goriva narašča kot kvadrat hitrosti pri efektivnem prečnem preseku $0,6 \text{ m}^2$.



Slika A.13 Razmerje med močjo avtomobila (kW) in največjo doseženo hitrostjo (km/h). Obe skali sta logaritemski. Moč narašča s tretjo potenco hitrosti. Da bi podvojili hitrost, mora biti moč motorja osemkrat večja. Vir: Tennekes (1997).

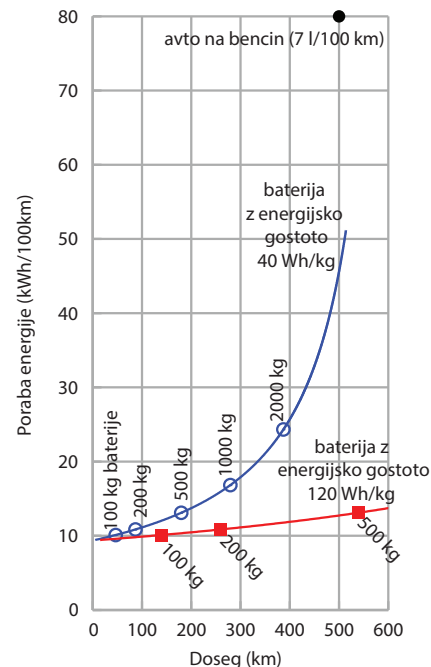
za predelavo motorjev in prestavnih sistemov tako, da bi bil izkoristek motorja največji ravno pri pravi hitrosti. Še en dokaz, da moč avtomobila narašča s tretjo potenco hitrosti, je slika A.13, ki prikazuje moč motorja v odvisnosti od maksimalne dosežene hitrosti nekaterih avtomobilov. Premica prikazuje moč v sorazmerju s tretjo potenco hitrosti v^3 .

Električni avtomobili: predstavlja njihov doseg problem?

Ljudje pogosto trdijo, da je težava električnih avtomobilov v premajhnem dosegu. Zagovorniki električnih avtomobilov pa po drugi strani govorijo: »Ni problema, bomo pač dodali več baterij.« To je sicer možno, vendar je treba ugotoviti, kako te dodatne baterije vplivajo na porabo energije. Odgovor je v veliki meri odvisen od tega, kakšno energijsko gostoto baterij predvidimo. Pri baterijah z energijsko gostoto 40 Wh/kg (običajne svinčeno-kislinske baterije) bi bilo težko izboljšati doseg avtomobila nad 200 ali 300 km, medtem ko pri baterijah z energijsko gostoto 120 Wh/kg (običajna vrednost pri raznih litijevih baterijah) z lahkoto dosežemo doseg 500 km.

Predpostavimo, da je masa avtomobila skupaj s potniki, vendar brez baterij, 740 kg. Postopno bomo dodajali 100, 200, 500 ali morda celo 1000 kg baterij. Predpostavimo še, da je normalna hitrost avtomobila 50 km/h, efektivni prečni presek 0,8 m², kotalni upor 0,01, razdalja med krajnima točkama 500 m, izkoristek motorja 85 %, poleg tega pa med zaustavljanjem in zaganjanjem sistem za regenerativno zaviranje regenerira polovico kinetične energije avtomobila. Predpostavimo, da je učinkovitost polnjenja avtomobila prek napajanja 85-odstotna. Slika A.14 prikazuje porabo energije avtomobila glede na njegov doseg, pri čemer se količina baterij v avtomobilu spreminja. Zgornja krivulja prikazuje rezultat za baterije z energijsko gostoto 40 Wh/kg (starejše svinčeno-kislinske baterije). Doseg omejuje stena, oddaljena približno 500 km. Da bi se približali tej razdalji, moramo imeti smešno velike baterije. Na primer, da bi prevozili razdaljo 400 km, bi potrebovali 2000 kg baterij, poraba avtomobila pri taki vožnji pa bi bila 25 kWh na 100 km. Če se zadovoljimo z dosegom 180 km, je dovolj že 500 kg baterij. Še boljši so rezultati, če uporabimo lažje litij-ionske baterije. Električni avtomobil s 500 kg baterij z energijsko gostoto 120 Wh/kg zlahka doseže doseg 500 km. Poraba v tem primeru je ocenjena na približno 13 kWh na 100 km.

Zdi se mi, da je bilo vprašanje dosega rešeno s prihodom sodobnih baterij. Lepo bi bilo imeti še boljše baterije, vendar je 120 Wh/kg že precej zadovoljiva energijska gostota, seveda če nas ne moti, da s seboj vlačimo poltonsko baterijo. Mislim, da bi bila večina ljudi v resnici zadovoljna z dosegom 300 km, ki ga zagotavljajo baterije s skupno maso 250 kg. Če bi baterije razdelili v deset 25-kilogramskih enot, ki se jih lahko posamezno odstrani, potem bi lahko uporabnik avtomobila med dnevnimi vožnjami (100 kg baterij omogoča doseg 140 km) obdržal le na primer štiri take



Slika A.14 Doseg električnega avtomobila (vodoravna os) in poraba energije za transport (navpična os) v odvisnosti od količine (mase) baterij, prikazani za dva različna tipa baterij. Doseg avtomobila s 500 kg starih baterij z energijsko gostoto 40 Wh/kg je 180 km. Z enako količino (maso) sodobnih baterij z energijsko gostoto 120 Wh/kg pa lahko električni avtomobil prevozi tudi več kot 500 km. Poraba bi bila v obeh primerih približno 13 kWh na 100 km. Navedene številke predvidevajo 85-odstotni izkoristek baterije pri polnjenju.

enote, preostalih šest pa bi vzel iz električne polnilne postaje le takrat, ko se odpravi na daljšo pot. Med daljšo vožnjo bi lahko na vsakih recimo 300 km zamenjal baterije za nove, ki so na posebnih, temu namenjenih postajah.

Opombe in dodatno branje

stran

256 Izkoristek tipičnega bencinskega motorja je približno 25 %. Tudi spletna enciklopedija Encarta [6by8x] navaja, da so izkoristki dobrih sodobnih Ottovih motorjev med 20 in 25 %. Bencinski motor avtomobila Toyota Prius, ki velja za enega od motorjev z največjim izkoristkom, deluje po načelu Atkinsonovega in ne Ottovega cikla. Maksimalna izhodna moč je 52 kW, izkoristek pa 34 % pri 10 kW [348whs]. Najbolj učinkovit dizelski motor na svetu ima 52-odstotni izkoristek, vendar pa ni primeren za avtomobile, saj tehta 2300 ton. Gre za dizelski motor na turbo pogon Wartsila-Sulzer RTA96-C (slika A.15), ki je namenjen za tovarne ladje. Njegova izhodna moč je 80 MW.

- *Regenerativne zavore približno razpolovijo količino energije, ki se porabi za zaviranje. Vir: E4tech (2007).*

257 Električni motorji so lahko približno osemkrat lažji od bencinskih motorjev.

Specifična moč štiritaktnega bencinskega motorja je približno 0,75 kW/kg. Izkoristek najboljših električnih motorjev je 90-odstoten, specifična moč pa 6 kW/kg. Torej, če zamenjamo 75-kW bencinski motor s 75-kW električnim motorjem, zmanjšamo skupno maso avtomobila za 85 kg. Žal pa je specifična moč pri baterijah približno 1 kW/kg, kar pomeni, da, kar avtomobil pridobi na račun motorja, izgubi na račun baterij.

259 Izkoristek energije pri »motorju« kolesa je 25-odstoten. Te in druge predpostavke glede vožnje s kolesom potrjujejo di Prampero in sod. (1979). Efektivni prečni presek kolesarja v dirkalnem položaju je $c_d A = 0,3 \text{ m}^2$. Kotalni upor kolesarja na visokokvalitetnem dirkalnem kolesu (skupna masa 73 kg) je 3,2 N.

260 Slika A.12

Podatki za Prius: B. Z. Wilson [home.hiwaay.net/~bzwilson/prius/].

Podatki za BMW:

Phil C. Stuart [www.randomuseless.info/318ti/economy.html].

Dodatno branje: Gabrielli in von Karman (1950).

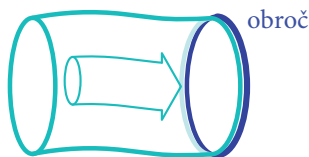


Slika A.15 Dvotaktni dizelski motor Wartsila-Sulzer RTA96-C s 14 valji je dolg 27 m in visok 13,5 m. www.wartsila.com

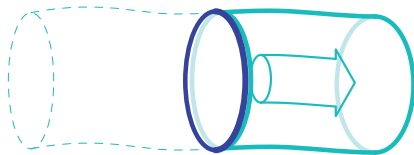
B Vetrna energija II

Fizika vetrne energije

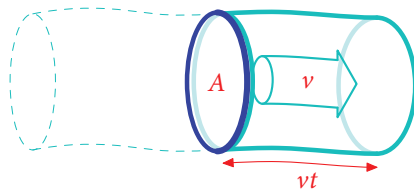
Da bi lažje ocenili energijo vetra, si predstavljajmo, da v zraku držimo obroč s površino A v smeri proti vetru s hitrostjo v . Zamislite si količino zraka, ki gre skozi obroč v sekundi. Tu lahko vidite zračno maso, tik preden gre skozi obroč:



In tu lahko vidite prav to zračno maso le sekundo pozneje:



Masa tega zraka je produkt njegove gostote ρ , preseka A in dolžine, ki je v krat t , pri čemer je t ena sekunda.



Kinetična energija tega zraka je:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho A v t v^2 = \frac{1}{2}\rho A t v^3. \tag{B.1}$$

Torej je moč vetra na površini A , tj. kinetična energija, ki preteče skozi to površino v enoti časa

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho A v^3. \tag{B.2}$$

Ta formula se vam mogoče zdi znana. Do enakega izraza smo prišli na str. 255, ko smo obravnavali porabo energije vožečega avtomobila.

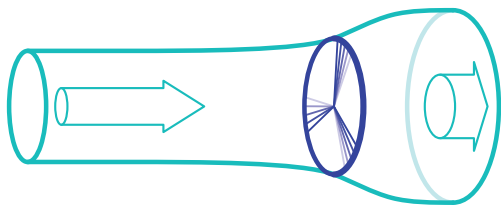
Kakšna je običajna hitrost vetra? Na vetroven dan kolesar zlahka ugotovi smer vetra. Če ima veter v hrbet, lahko vozi veliko hitreje kot običajno.



Ponovno uporabljam tole enačbo:
masa = gostota $\times$ prostornina

mph	km/h	m/s	Beaufortova lestvica
2,2	3,6	1	stopnja 1
7	11	3	stopnja 2
11	18	5	stopnja 3
13	21	6	stopnja 4
16	25	7	stopnja 5
22	36	10	stopnja 6
29	47	13	stopnja 7
36	58	16	stopnja 8
42	68	19	stopnja 9
49	79	22	stopnja 10
60	97	27	stopnja 11
69	112	31	stopnja 12
78	126	35	stopnja 12

Slika B.1 Hitrosti.



Hitrost takega vetra je torej primerljiva z običajno hitrostjo kolesarja, ki je denimo 21 kilometrov na uro (6 m/s). V Cambridgeu veter le redko piha s tako hitrostjo. Vseeno pa vzemimo to za običajno hitrost vetra v Veliki Britaniji (in ne pozabimo, da bo morda treba naše ocene popraviti).

Gostota zraka je približno $1,3 \text{ kg/m}^3$. (Običajno to zaokrožim kar na 1 kg/m^3 , ker si je to lažje zapomniti, vendar tu tega ne bom storil.) Običajna energija vetra na kvadratni meter obroča je tako

$$\frac{1}{2} \rho v^3 = \frac{1}{2} 1,3 \text{ kg/m}^3 \times (6 \text{ m/s})^3 = 140 \text{ W/m}^2. \quad (\text{B.3})$$

Vetrnica pa ne more izkoristiti vse te energije. Vetrnice sicer bistveno upočasnijo zrak, vendar mu morajo pustiti *nekaj* kinetične energije, sicer bi jim bil ta upočasnjeni zrak v napoto. Slika B.2 je shematičen prikaz zračnega toka skozi vetrnico. Maksimalen delež energije vetra, ki ga lahko izkoristi ploščata vetrnica, je izračunal nemški fizik Albert Betz leta 1919. Če je hitrost vetra za vetrnico enaka tretjini hitrosti vetra pred vetrnico, je moč, ki jo odvzema vetrnica, enaka $16/27$ celotne moči vetra. $16/27$ je enako 0,59. V praksi ocenimo, da je učinkovitost vetrnice 50 %. Pravzaprav so v resnici vetrnice zasnovane za natančno določene hitrosti vetra. Če je hitrost vetra mnogo večja od idealne hitrosti za neko turbino, je le-to treba izključiti.

Kot primer vzemimo premer $d = 25 \text{ m}$ ter višino do osi 32 m, kar je približna velikost vetrne turbine nad mestom Wellington na Novi Zelandiji (slika B.3). Moč samostojne vetrnice je

$$\begin{aligned} & \text{faktor izkoristka} \times \text{moč na enoto površine} \times \text{površina} \\ &= 50 \% \times \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2 \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

$$= 50 \% \times 140 \text{ W/m}^2 \times \frac{\pi}{4} (25 \text{ m})^2 \quad (\text{B.5})$$

$$= 34 \text{ kW}. \quad (\text{B.6})$$

Prav zares, ko sem obiskal to vetrnico na precej vetroven dan, je merilec kazal, da zagotavlja 60 kW električne moči.

Da bi ocenili, koliko moči lahko pridobimo iz vetra, se moramo najprej odločiti, kako velike bodo naše vetrnice in kako tesno skupaj jih lahko postavimo.

Slika B.2 Tok zraka skozi vetrnico. Vetrnica zračni tok upočasni in ga razširi.



Slika B.3 Vetrnica Brooklyn nad mestom Wellington na Novi Zelandiji z ljudmi ob vznožju za lažjo predstavbo razmerij. Na vetroven dan je ta vetrnica zagotavljala 60 kW električne moči (skupno 1400 kWh na dan). Avtor fotografije: Philip Banks.

Kako gosto so lahko take vetrnice posejane? Če so preblizu, bodo čelne vetrnice metale vetrno senco na hrbtne vetrnice. Po mnenju strokovnjakov razmak med vetrnicami ne bi smel biti manjši od 5-kratnika njihovega premera, če ne želimo izgubljati velikega dela moči. S takim razmakom je moč, ki jo lahko zagotavljajo vetrnice na enoto površine tal, enaka

$$\frac{\text{moč na vetrnico (B.4)}}{\text{površina tal na vetrnico}} = \frac{\frac{1}{2}\rho v^3 \frac{\pi}{8}d^2}{(5d)^2} \quad (\text{B.7})$$

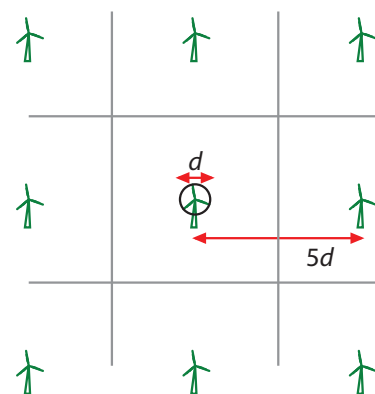
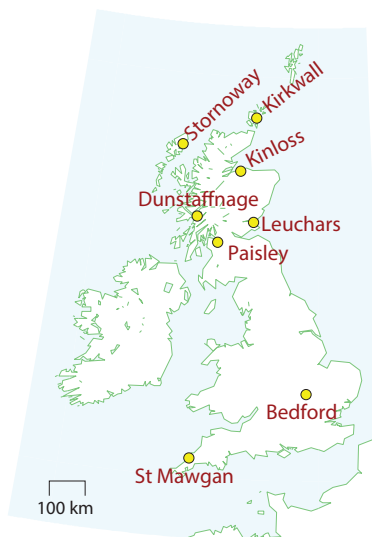
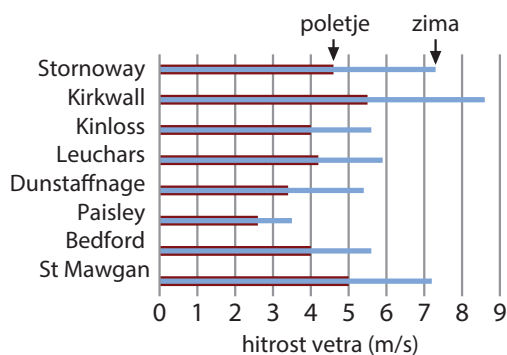
$$= \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{B.8})$$

$$= 0,016 \times 140 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.9})$$

$$= 2,2 \text{ W/m}^2. \quad (\text{B.10})$$

To številko si je vredno zapomniti: vetrna elektrarna pri hitrosti vetra 6 m/s zagotavlja 2 W električne moči na m² površine. Kot vidite, naš rezultat ni odvisen od premera vetrnice. Premera d se okrajšata, saj mora biti razmak med večjimi vetrnicami večji. Večje vetrnice so primerne za lovljenje hitrejšega vetra, ki se običajno pojavlja na večjih višinah (višja kot je vetrnica, hitrejšemu vetru je izpostavljena), ali zaradi ekonomije obsega, vendar sta to edina dva razloga, zakaj izbrati večje vetrnice.

Na ta izračun je občutno vplivala naša ocena hitrosti vetra. Je 6 m/s verjetna ocena za običajno hitrost vetra skozi daljše obdobje v vetrovnih delih Velike Britanije? Sliki 4.1 in 4.2 prikazujeta hitrosti vetra v Cambridgeu in Cairngormu, slika B.6 pa povprečne zimske in poletne hitrosti vetra na dodatnih osmih lokacijah v Veliki Britaniji. Bojim se, da je 6 m/s prevelika številka glede na dejansko povprečno hitrost vetra v večini države. Če bi namesto 6 m/s za oceno hitrosti vetra uporabili oceno za Bedford, ki je 4 m/s, moramo rezultat sorazmerno zmanjšati, in sicer tako, da ga pomnožimo z $(4/6)^3 \approx 0,3$. (Ne pozabite, da moč vetra narašča s tretjo potenco hitrosti vetra.)



Slika B.4 Postavitev vetrnic vetrne elektrarne.

MOČ NA ENOTO POVRŠINE	
vetrna elektrarna	2 W/m ²
(hitrost 6 m/s)	

Tabela B.5 Podatki, ki si jih je vredno zapomniti: vetrne elektrarne (op. ur. tukaj velja opozoriti bralca na nujno razlikovanje med specifično močjo vetrnice glede na površino A zraka, ki teče skozi elipse vetrnice, in med močjo vetrne elektrarne glede na enoto površine zemlje, na kateri stoji. Obe vrednosti uporabljata iste enote. Za razmišljanje o potencialu vetrne energije v prvem delu smo uporabljali relevantno moč na enoto površine.).

Slika B.6 Povprečna hitrost vetra poleti (temni stolpec) in povprečna hitrost vetra pozimi (svetli stolpec) na osmih različnih lokacijah v Veliki Britaniji. Hitrosti so bile izmerjene na standardni merilni višini 10 metrov nad tlemi. Povprečja so bila izmerjena v obdobju 1971–2000.

Po drugi strani pa za oceno značilne moči ne bi smeli vzeti povprečja hitrosti vetra in nato uporabiti tretje potence te vrednosti, temveč bi morali najti povprečno vrednost tretje potence hitrosti vetra. Povprečje vrednosti tretje potence je večje kot tretja potenca povprečja. Vendar če gremo v take podrobnosti, postane zadeva še bolj zakomplicirana, saj dejanska moč vetrnih turbin v resnici ni sorazmerna s tretjo potenco hitrosti vetra. Pravzaprav velja, da imajo vetrnice neki obseg hitrosti vetra, znotraj katerega lahko zagotavljajo optimalno moč. Pri nižjih ali višjih hitrostih pa vetrnice ne bodo zagotavljale idealne proizvodne moči.

Spreminjanje hitrosti vetra z višino

Višje vetrnice so izpostavljene večjim hitrostim vetra. Zveza med hitrostjo vetra in višino je zapletena in odvisna od hrapavosti terena v okolici vetrnice ter od ure dneva. Na palec bi rekli, da se pri dvakratni višini hitrost vetra poveča za 10 %, moč vetra pa tako naraste za 30 %.

Nekatere standardne formule za hitrost v kot funkcije višine z so prikazane v nadaljevanju.

1. Po formuli striženja vetra po NREL [ydt7uk] se hitrost spreminja v odvisnosti od višine:

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^\alpha,$$

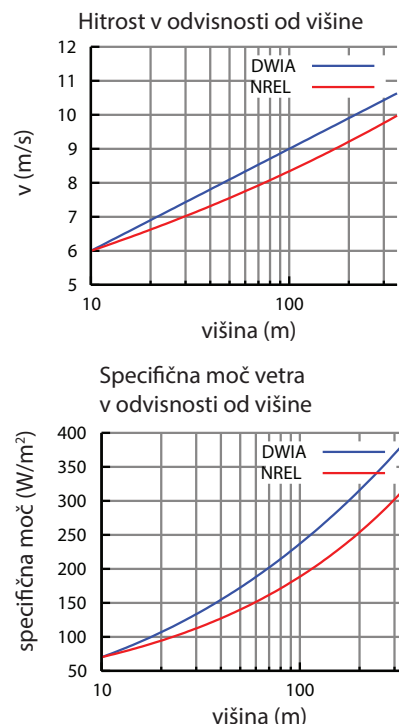
pri čemer je v_{10} hitrost na višini 10 m, tipična vrednost eksponenta α pa je 0,143 oziroma 1/7. Zakon ene sedmine ($v(z)$ je sorazmerna z $z^{1/7}$) uporabljajo na primer Elliott in sod. (1991).

2. Formula striženja vetra, vzeta po Danskem združenju za vetrno energijo [yaoonz], je

$$v(z) = v_{\text{ref}} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{\text{ref}}/z_0)},$$

pri čemer je z_0 parameter, imenovan dolžina hrapavosti, hitrost v_{ref} pa je hitrost na referenčni višini z_{ref} , ki je v našem primeru 10 m. Dolžina hrapavosti tipičnega podeželskega terena (kmetijska zemljišča z nekaj hišami in zaščitnimi živimi mejami na približno 500-metrskih intervalih, tj. »2. razred hrapavosti«) je $z_0 = 0,1$ m.

V praksi nam dasta obe formuli striženja vetra podobne numerične vrednosti. Seveda pa to ne pomeni, da sta točni v vsakem primeru. Van den Berg (2004) trdi, da se profili vetra ponoči in podnevi razlikujejo.



Slika B.7 Zgoraj: Dva modela hitrosti in moči vetra kot funkciji višine. DWIA = Danish Wind Industry Association (Dansko združenje za vetrno energijo); NREL = National Renewable Energy Laboratory (Laboratorij za obnovljive vire energije). Za vsak model je bila določena hitrost vetra na 10 m višine 6 m/s. Pri danskem modelu je dolžina hrapavosti $z_0 = 0,1$ m. Spodaj: specifična moč vetra (moč na enoto pokončne površine) po obeh modelih.



Slika B.8 Netipična vetrnica qr5 s strani quietrevolution.co.uk.

Standardne lastnosti vetrnice

Tipična sodobna vetrnica ima premer rotorja 54 metrov, ta pa je nameščen na višini 80 metrov. »Zmogljivost« take naprave je 1 MW. »Zmogljivost« oziroma »konična moč« je *maksimalna* električna moč, ki jo lahko zagotavlja vetrnica v optimalnih razmerah. Običajno so vetrne turbine zasnovane tako, da se zaženejo nekje pri hitrosti vetra med 3 in 5 m/s in zaustavijo pri vihnem vetru hitrosti 25 m/s. Dejanska povprečna moč vetrnice je »zmogljivost«, pomnožena s faktorjem, ki označuje delež časa, ko so vetrne razmere skoraj optimalne. Ta faktor, ki ga običajno poimenujemo »stopnja izkoriščenosti zmogljivosti«, je odvisen od lokacije. V Veliki Britaniji je tipična stopnja izkoriščenosti zmogljivosti *ugodne* lokacije 30 %. Na Nizozemskem je ta stopnja 22 %, v Nemčiji pa 19 %.

Druge ocene površinske specifične moči vetrne elektrarne

V okviru vladne študije [www.world-nuclear.org/policy/DTI-PIU.pdf] je bila ocena kopenskega vetrnega potenciala v Veliki Britaniji narejena na podlagi predpostavljene specifične moči vetrnih elektrarn na enoto površine, ki naj ne bi presegala 9 W/m^2 (zmogljivost, ne povprečna proizvodnja). Če je stopnja izkoriščenosti zmogljivosti 33 %, potem bo elektrarna v povprečju zagotavljala 3 W/m^2 .

Vetrna elektrarna London Array je vetrna elektrarna na morju, ki bo predvidoma postavljena v zunanjem delu ustja Temze. Z zmogljivostjo 1 GW naj bi bila največja vetrna elektrarna na morju v svetovnem merilu. Končana vetrna elektrarna, ki bo imela 271 vetrnih turbin na 245 km^2 [6086ec] površine, naj bi v povprečju proizvajala 3100 GWh električne energije na leto (to pomeni povprečno moč proizvodnje 350 MW). (Strošek: 1,5 milijarde angleških funtov.) Moč na enoto površine omenjene elektrarne je tako $350 \text{ MW}/245 \text{ km}^2 = 1,4 \text{ W/m}^2$. To je manj kot pri drugih vetrnih elektrarnah na morju, razlog pa je po mojem mnenju velik kanal na tem območju (Knock Deep), ki je preglobok (okrog 20 m) za ekonomično postavitev turbin.

Bolj me skrbi, kaj bodo ti načrti [za predvideno vetrno elektrarno London Array] pomenili za to pokrajino in naš način življenja, kot me je kdajkoli skrbela invazija nacistov na obalo.

Bill Boggia iz vasi Graveney, kjer bodo podvodni kabli vetrnih elektrarn speljani na kopno.

Vprašanja

Kaj pa mikroprodukcija? Če na svojo streho postavimo eno teh mini turbin, koliko energije lahko pričakujemo, da bo proizvedla?

Če predpostavljamo, da je hitrost vetra 6 m/s, kar je, kot sem že prej omenil, *nad* realnim povprečjem v večini Velike Britanije, in če vzamemo, da je premer vetrnice 1 m, potem bo taka mini elektrarna zagotavljala 50 W moči. To je 1,3 kWh na dan – ne prav veliko. Realno gledano bi mikroturbina na tipični urbani lokaciji v Angliji zagotavljala zgolj 0,2 kWh na dan (glejte str. 66).

Verjetno so najslabše vetrnice na svetu tiste v mestu Tsukuba na Japonskem, saj za svoje delovanje dejansko porabijo več energije, kot je lahko oddajo. Izvajalci so bili tako v zadregi zaradi stoječih vetrnic, da so pripeljali energijo do vetrnic zato, da bi se vetrnice obračale in dajale vtis, da vetrna elektrarna deluje. [6bkvbn]

Opombe in dodatno branje

stran

264 *Maksimalni delež vstopne energije vetra, ki ga lahko izkoristi ploščata vetrnica ...*

Na spletni strani Danskega združenja za vetrno energijo (Danish Wind Industry Association) obstaja dobra razlaga za tole. [yekdaa]

267 *Običajno so vetrne turbine zasnovane tako, da se zaženejo neke pri hitrosti vetra med 3 in 5 m/s.* [ymfbsn]

- *Tipična stopnja izkoriščenosti zmogljivosti za ugodno lokacijo je 30 %. Leta 2005 je bila povprečna stopnja izkoriščenosti zmogljivosti v vseh večjih vetrnih elektrarnah v Veliki Britaniji 28 % [ypvbvd]. Stopnja se je med letom spreminjala, pri čemer je najnižjo vrednost dosegla junija in julija, ko je bila 17 %. Na najugodnejšem območju v državi - Caithness, Orkney in Shetlandski otoki - je bila stopnja izkoriščenosti zmogljivosti 33 %. Stopnji za dve vetrni elektrarni na morju leta 2005 sta bili 36 % (elektrarna North Hoyle ob obali Severnega Walesa) in 29 % (elektrarna Scroby Sands v bližini mesta Great Yarmouth). Povprečne stopnje izkoriščenosti zmogljivosti za deset regij leta 2006 so bile naslednje: Cornwall 25 %, Mid-Wales 27 %, Cambridgeshire in Norfolk 25 %, Cumbria 25 %, Durham 16 %, Južna Škotska 28 %, Orkney in Shetlandski otoki 35 %, Severovzhodna Škotska 26 %, Severna Irska 31 %, vetrne kapacitete na morju 29 %.* [wbd8o]

Watson in sod. (2002) navajajo, da je po trenutnih podatkih za ekonomsko upravičenost vetrne energije potrebna povprečna hitrost vetra čez leto 7,0 m/s. V Veliki Britaniji je približno 33 % ozemlja, kjer veter dejansko dosega tako hitrost.



Slika B.9 Mikroturbina Ampair 600 W. Ta mikroturbina, postavljena v mestu Leamington Spa, proizvede v povprečju 0,037 kWh na dan (1,5 W).



Slika B.10 Turbina Iskra 5 kW [www.iskrawind.com] s premerom 5,5 m med letnim pregledom. Turbina, ki je postavljena v kraju Hertfordshire (ki ni ravno najbolj vetrovna lokacija v Veliki Britaniji) na višini 12 m, dnevno proizvede v povprečju 11 kWh energije. Pri vetrni elektrarni s takimi vetrnimi turbinami, ki bi bile postavljene na mrežo s kvadrati velikosti 30 × 30 m, bi bila moč na enoto površine 0,5 W/m².

C Letala II

Treba je pogledati, kako lahko naredimo potovanje z letali energijsko učinkovitejše in kako lahko razvijemo nova goriva, ki bodo omogočila manjšo porabo energije in manj emisij.

Tony Blair

Upati na najboljše ni politika, temveč zabloda.

Emily Armistead, Greenpeace

Katere so glavne omejitve pri potovanju po zraku? Ali fizika letenja zahteva neizogibno porabo neke količine energije – na tono ali na prepotovani kilometer? Kolikšna je maksimalna razdalja, ki jo lahko preleti 300-tonski Boeing 747? Kaj pa kilogramski progastorepi kljunač ali 100-gramska arktična čigra?

Kot je 3. poglavju, v katerem smo ocenjevali porabo pri avtomobilih, sledilo poglavje A, ki ponuja model, kam gre energija pri avtomobilih, to poglavje dopolnjuje 5. poglavje in se osredotoča na to, kam gre energija pri letalih. Edina fizika, ki jo pri tem potrebujemo, so Newtonovi zakoni gibanja, ki jih bom opisal tam, kjer jih bomo potrebovali.

S pomočjo te razprave bomo lahko odgovorili na vprašanja, kot je na primer: »Ali bi s potovanjem po zraku porabili bistveno manj energije, če bi potovali s počasnejšimi propelerskimi letali?« Kar nekaj enačb je pred nami. Upam, da se boste zabavali!

Kako leteti

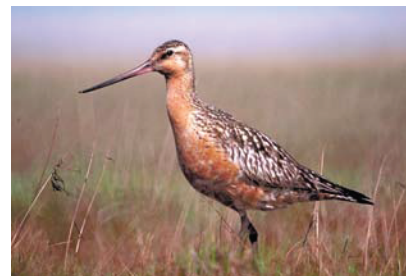
Letala (in ptice) se premikajo skozi zrak ter se tako kot avtomobili in vlaki srečajo z zračnim uporom. Velik del energije, ki jo žrejo letala, gre za premagovanje te sile. Poleg tega pa letala, za razliko od avtomobilov in vlakov, porabijo energijo tudi za to, da *ostanejo v zraku*.

Letala ostanejo v zraku tako, da potiskajo zrak navzdol. Ko letalo potiska zrak navzdol, prav ta zrak rine letalo navzgor (ker mu tako narekuje tretji Newtonov zakon). Dokler je ta navzgor delujoča sila, imenovana dinamični vzgon, dovolj velika, da je v ravnovesju s težo letala, se bo letalo obdržalo v zraku.

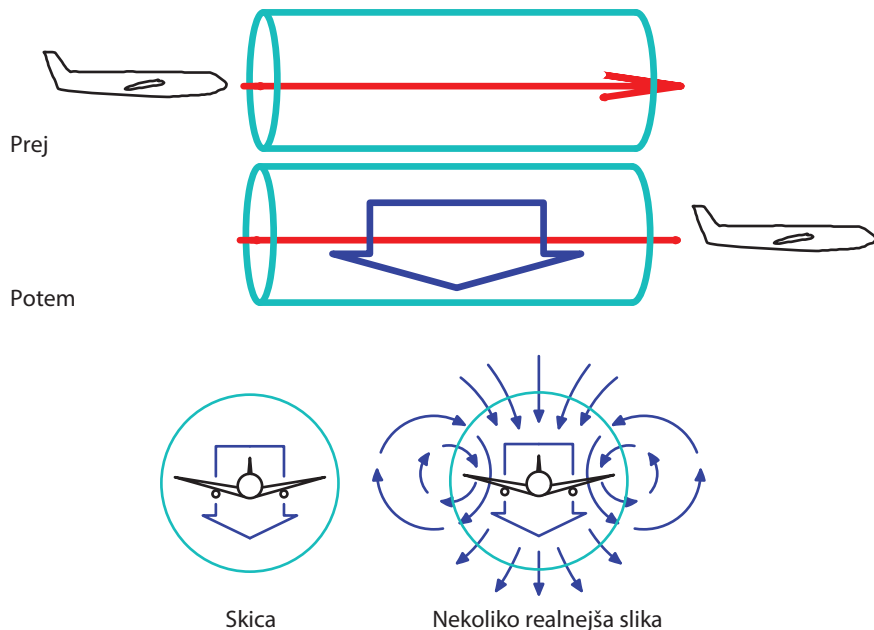
Ko letalo odriva zrak navzdol, mu daje kinetično energijo. Torej je za dviganje letala potrebna energija. Skupno moč, ki jo potrebuje letalo, torej sestavlja moč, ki jo letalo potrebuje za ustvarjanje vzgona, ter moč, ki jo letalo potrebuje za premagovanje zračnega upora. (Mimogrede, moč, ki je potrebna za ustvarjanje vzgona, se običajno imenuje »inducirani upor«. Tu bom uporabljal izraz moč vzgona P_{vzgon} .)

Dve enačbi, ki ju bomo potrebovali, da izpeljemo teorijo letenja, sta drugi Newtonov zakon:

$$\text{sila} = \text{sprememba gibalne količine v danem času} \quad (\text{C.1})$$



Slika C.1 Ptice: dve arktični čigri in progastorepi kljunač ter letalo Boeing 747.



Slika C.2 Letalo med letom naleti na mirujočo zračno cev. Ko gre skozenjo, potiska zrak navzdol. Sila, s katero letalo deluje na zrak, ko ga potiska navzdol, je enaka (po velikosti) in nasprotna (po smeri) sili, s katero zrak deluje na letalo.

Slika C.3 Naša skica predvideva, da letalo za sabo pušča zračno maso klobasaste oblike, ki se pomika navzdol po njegovi brazdi. Bolj realna slika prikazuje nekoliko bolj kompleksen zračni tok. Kako je to videti v resnici, pa si lahko pogledate na sliki C.4.

in tretji Newtonov zakon, ki sem ga pravkar omenil:

$$\text{sila, s katero B deluje na A} = - \text{sila, s katero A deluje na B.} \quad (\text{C.2})$$

Če ne marate enačb, vam lahko poanto povem kar sedaj: ugotovili bomo, da je moč, ki je potrebna za ohranjanje vzgona, *enaka* moči, ki je potrebna za premagovanje zračnega upora. Torej, če želi letalo ostati v zraku, potrebuje *dvojno* moč.

Narišimo skico vzgona, ki deluje na letalo s hitrostjo v . V času t letalo prepotuje razdaljo vt , za sabo pa pusti, recimo tako, klobaso zraka, ki potuje v smeri navzdol (slika C.2). Prečni presek klobase bomo označili z A_k . Premer naše klobase je približno enak razponu kril letala (w). (Znotraj te velike klobase je manjša klobasa oziroma zračni kanal s prečnim presekom, ki je skoraj enak čelni površini trupa letala.) Pravzaprav so podrobnosti zračnih tokov veliko bolj zanimive kot slika klobase: vsaka konica krila pušča za sabo vrtinec, pri čemer se zrak med konicama premika v smeri navzdol z veliko hitrostjo, zrak na drugi strani konic (zunaj njih) pa se premika navzgor (sliki C.3 in C.4). Ta zrak v smeri navzgor izkoriščajo ptice, ko letijo v formaciji: tik za konicami ptičjih kril se tvori mali vzgonski tok. Kakorkoli že, vrnimo se nazaj k naši klobasi.

Masa klobase je:

$$m_{\text{klobasa}} = \text{gostota} \times \text{prostornina} = \rho v t A_k \quad (\text{C.3})$$

Recimo, da se celotna klobasa pomika navzdol s hitrostjo u , in ugotovimo, kolikšna mora biti hitrost u , da bo vzgon letala enak njegovi teži mg . Navzdol usmerjena gibalna količina klobase v času t je



Slika C.4 Zračni tok za letalom.
Vir fotografije: NASA Langley Research Center.

$$\text{masa} \times \text{hitrost} = m_{\text{klobasa}} u = \rho v t A_k u \quad (\text{C.4})$$

Po Newtonovih zakonih mora biti enaka sunku sile teže letala v času t , torej:

$$mgt. \quad (\text{C.5})$$

Če enačbo uredimo v obliko

$$\rho v t A_k u = mgt, \quad (\text{C.6})$$

lahko izračunamo zahtevano hitrost klobase, ki se premika navzdol:

$$u = \frac{mg}{\rho v A_k}.$$

Zanimivo! Hitrost klobase je *obratno* sorazmerna s hitrostjo letala v . Letalo, ki se premika počasi, mora odrivati zrak močnejše kot hitrejše letalo, ker ima v enoti časa opravka z manj zraka. Iz tega razloga morajo pristajajoča letala, ki letijo počasneje, odpreti zakrilca. S tem se namreč povečata velikost in naklon krila, ki tako bolje odrivata zrak.

Kakšna pa je poraba energije pri odrivanju klobase s hitrostjo u ? Potrebna energija je:

$$P_{\text{vzgon}} = \frac{\text{kinetična energija klobase}}{\text{čas}} \quad (\text{C.7})$$

$$= \frac{1}{t} \frac{1}{2} m_{\text{klobasa}} u^2 \quad (\text{C.8})$$

$$= \frac{1}{2t} \rho v t A_k \left(\frac{mg}{\rho v A_k} \right)^2 \quad (\text{C.9})$$

$$= \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_k}. \quad (\text{C.10})$$

Skupna moč, ki jo letalo potrebuje za svoje gibanje, je enaka vsoti moči zaradi premagovanja upora in moči za vzdrževanje vzgona:

$$P_{\text{skupna}} = P_{\text{zrač. upor}} + P_{\text{vzgon}} \quad (\text{C.11})$$

$$= \frac{1}{2} c_d \rho A_1 v^3 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_k}, \quad (\text{C.12})$$

pri čemer je A_1 čelna površina letala, c_d pa koeficient zračnega upora (kot v poglavju A).

Izkoristek goriva pri letalu, izražen kot poraba energije na prepotovano razdaljo, je tako

$$\left. \frac{\text{energija}}{\text{razdalja}} \right|_{\text{idealno}} = \frac{P_{\text{skupna}}}{v} = \frac{1}{2} c_d \rho A_1 v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_k}, \quad (\text{C.13})$$

pod pogojem, da letalo pretvarja energijo goriva v energijo, ki se porablja za premagovanje zračnega upora, ter energijo, ki drži letalo v zraku, popolnoma učinkovito. (Mimogrede, drugo ime za »porabo energije na enoto prevožene razdalje« je »sila«, zgornja dva izraza pa predstavljata silo upora $\frac{1}{2}c_d\rho A_1 v^2$ in vzgon $\frac{1}{2}(mg)^2/(\rho v^2 A_k)$. Njuna vsota je »sila« oziroma »potisna sila«, ki natančno določa, kako močno morajo motorji potiskati naprej.)

Izkoristek dejanskih reaktivnih motorjev je približno $\varepsilon = 1/3$, tako da je poraba energije na enoto razdalje pri letalu s potovalno hitrostjo v

$$\frac{\text{energija}}{\text{razdalja}} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{1}{2}c_d\rho A_1 v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_k} \right). \quad (\text{C.14})$$

Ta izraz za porabo energije na enoto razdalje je precej zapleten, vendar se ga lahko močno poenostavi, če predpostavimo, da je letalo *zasnovano* za letenje pri hitrosti, ki *minimalizira* porabo energije na enoto razdalje. Slednja je namreč optimalna pri določeni hitrosti, torej je funkcija hitrosti v (slika C.5). Vsota obeh količin, $\frac{1}{2}c_d\rho A_1 v^2$ in $\frac{1}{2}(mg)^2/(\rho v^2 A_k)$, je najmanjša, ko sta obe količini enaki. Ta pojav je čudovito pogost v fiziki in mehaniki: dve stvari, ki nista *nujno* enaki, *sta* dejansko enaki oziroma enaki znotraj faktorja 2.

Tako nam ta princip enakosti pove, da za optimalno hitrost letala velja

$$c_d\rho A_1 v^2 = \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_k}, \quad (\text{C.15})$$

tj.

$$\rho v_{\text{opt}}^2 = \frac{mg}{\sqrt{c_d A_1 A_k}}, \quad (\text{C.16})$$

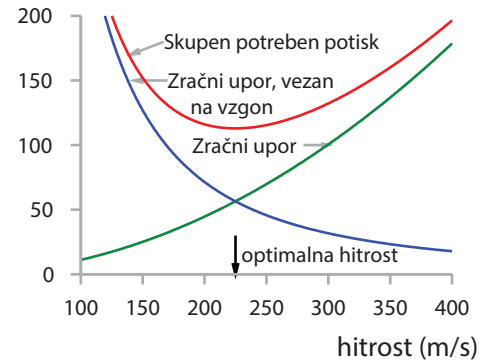
To določa optimalno hitrost, če je naš model leta točen. Model odpove takrat, ko je izkoristek motorja ε v veliki meri odvisen od hitrosti, ali pa v primeru, da hitrost letala preseže hitrost zvoka (330 m/s). Nad to hitrostjo bi potrebovali drug model za opis zračnega upora in vzgona.

Pa vzemimo naš model in preverimo, kakšni sta po njem optimalni hitrosti za Boeing 747 in za živega ptiča albatrosa. Paziti moramo, da uporabimo ustrezno gostoto zraka: če želimo oceniti optimalno potovalno hitrost za Boeing 747 na višini 10.000 m, ne smemo pozabiti, da gostota zraka pada z višino z kot $\exp(-mgz/kT)$, pri čemer je m masa molekul dušika in kisika, kT pa toplota (Boltzmanova konstanta krat absolutna temperatura). Gostota je pri tej višini približno trikrat manjša.

Predvidene optimalne hitrosti (tabela C.6) so bolj natančne, kot bi pričakovali! Predvidena optimalna hitrost za Boeing 747 je 869 km/h, hitrost albatrosa pa 50,4 km/h, kar je zelo blizu dejanskim potovalnim hitrostim obeh ptic (901 km/h in 48–88 km/h).

Poglejmo še nekatere predpostavke z naše skice. Preverimo lahko, ali se sila (C.13) ujema z znanim potiskom motorjev Boeinga 747.

potisk (kN)



Slika C.5 Velikost potisne sile reaktivnih motorjev, ki je potrebna, da letalo leti pri določeni hitrosti v , je vsota velikosti sile upora $\frac{1}{2}c_d\rho A_1 v^2$, ki narašča s hitrostjo, in velikosti vzgona (imenovanega tudi inducirani upor) $\frac{1}{2}(mg)^2/(\rho v^2 A_k)$, ki s hitrostjo pada. Obstaja optimalna hitrost v_{opt} pri kateri je potrebna najmanjša sila. Ker sila predstavlja porabo energije na enoto razdalje, to pomeni, da je pri najmanjši sili tudi najmanjša poraba goriva. Za optimalen izkoristek goriva je treba leteti pri optimalni hitrosti v_{opt} . Zgornji graf prikazuje oceno potrebnega potiska motorjev (v kilonewtonih – kN) glede na našo skico, in sicer za letalo Boeing 747 z maso 319 t, razponom kril 64,4 m, koeficientom zračnega upora 0,03 ter čelno površino 180 m², ki leti skozi zrak gostote $\rho = 0,41$ kg/m³ (gostota na višini 10 km), kot funkcijo njegove hitrosti v , izražene v m/s. Optimalna hitrost pri našem modelu je 241 m/s (869 km/h). Za model, ki sloni na klobasah, je to kar dobra primerjava z realnim stanjem!

»Ptič«		747	albatros
Oblikovalec		Boeing	naravna selekcija
Masa (polno naložen)	m	363.000 kg	8 kg
Razpon kril	w	64,4 m	3,3 m
Površina*	A_1	180 m ²	0,09 m ²
Gostota	ρ	0,4 kg/m ³	1,2 kg/m ³
Koeficient zračnega upora	c_d	0,03	0,1
Optimalna hitrost	v_{opt}	241 m/s = 869 km/h	14 m/s = 50,4 km/h

Upoštevajte, da sta pri optimalni hitrosti po velikosti obe sili enaki, vzamemo eno od njiju in jo podvojimo:

$$\text{sila} = \frac{\text{energija}}{\text{razdalja}} \Big|_{\text{idealno}} = \frac{1}{2} c_d \rho A_1 v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_k} \quad (\text{C.17})$$

$$= c_d \rho A_1 v_{opt}^2 \quad (\text{C.18})$$

$$= c_d \rho A_1 \frac{mg}{\rho (c_d A_1 A_k)^{1/2}} \quad (\text{C.19})$$

$$= \left(\frac{c_d A_1}{A_k} \right)^{1/2} mg. \quad (\text{C.20})$$

Definirajmo faktor napolnjenosti f_A kot razmerje med površinama:

$$f_A = \frac{A_1}{A_k}. \quad (\text{C.21})$$

(Predstavljajte si faktor f_A kot delček kvadrata, ki ga pokriva letalo na sliki C.7.) Potem velja:

$$\text{sila} = (c_d f_A)^{1/2} (mg). \quad (\text{C.22})$$

Zanimivo! Neodvisno od gostote tekočine, skozi katero leti letalo, je potreben potisk (za letalo, ki leti pri optimalni hitrosti), izražen kot brezdimenzijska konstanta $(c_d f_A)^{1/2}$, pomnožena s težo letala. Ta konstanta je sicer znana tudi kot razmerje med zračnim uporom in vzgonom letala. (Razmerje med vzgonom letala in celotnim zračnim uporom letala označujejo tudi naslednji izrazi: drsno število, drsno razmerje, aerodinamična učinkovitost ali finesa. Nekatere tipične vrednosti so prikazane v tabeli C.8.)

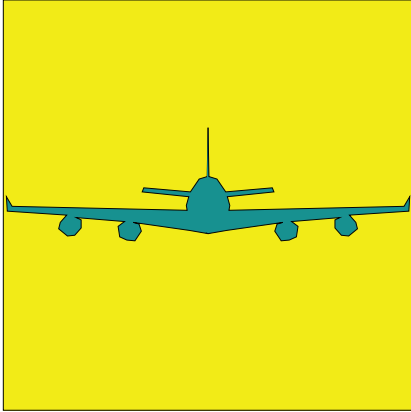
Če vzamemo vrednosti za jumbo jet ($c_d \cong 0,03$ in $f_A \cong 0,04$), lahko izračunamo potrebni potisk, ki je

$$(c_d f_A)^{1/2} mg = 0,036 mg = 130 \text{ kN}. \quad (\text{C.23})$$

Kako se to sklada s specifikacijami za Boeing 747? V bistvu lahko proizvede vsak od štirih motorjev približno 250 kN maksimalnega potiska, vendar je tolikšen potisk potreben le pri vzletu. Med letenjem je potisk bistveno manjši, tj. 200 kN, kar je le 50 % več, kot predvideva naš model. Napaka modela se pojavi, ker je bila naša ocena razmerja med vzgonom letala in celotnim zračnim uporom nekoliko prenizka.

Tabela C.6 Ocena optimalnih hitrosti za jumbo jet in za albatrosa.

* Čelna površina letala je ocenjena na podlagi širine kabine (6,1 m), pomnožene z ocenjeno višino trupa (10 m), dobljena vrednost pa je potrojena na račun čelne površine motorjev, kril in repa. Pri albatrosu je čelna površina 0,09 m² ocenjena na podlagi fotografije.



Slika C.7 Čelna projekcija letala Boeing 747, ki se uporablja za oceno čelne površine letala A_1 . Površina kvadrata je A_k (kvadrat razpona kril).

Airbus A320	17
Boeing 767-200	19
Boeing 747-100	18
navadna čigra	12
albatros	20

Tabela C.8 Razmerja med vzgonom letala in celotnim zračnim uporom.

Ta potisk lahko uporabimo za izpeljavo učinkovitosti prevoza s katerimkoli letalom. To učinkovitost pa lahko izrazimo na dva načina: kot strošek porabe energije glede na prevoženo *težo*, ki se meri v kWh na tonski kilometer, ali pa kot strošek porabe energije glede na prevožene osebe, ki se meri v kWh na 100 potniških kilometrov.

Učinkovitost z vidika prevoženega tovora

Potisk je sila in sila je vezana na porabo energije na enoto razdalje. Skupna poraba energije na enoto razdalje je večja za faktor $(1/\epsilon)$, pri čemer ϵ predstavlja izkoristek motorja, ki bo v našem primeru $1/3$.

Tu je izračun bruto prevoznih stroškov, ki se definirajo kot porabljena energija na enoto mase (celotnega letala) na enoto razdalje:

$$\text{prevozni strošek} = \frac{1}{\epsilon} \frac{\text{sila}}{\text{masa}} \quad (\text{C.24})$$

$$= \frac{1}{\epsilon} \frac{(c_d f_A)^{1/2} mg}{m} \quad (\text{C.25})$$

$$= \frac{(c_d f_A)^{1/2}}{\epsilon} g. \quad (\text{C.26})$$

Poraba energije pri prevozu je tako le brezdimenzijska količina (vezana na obliko letala in izkoristek motorjev), pomnožena z gravitacijskim pospeškom g . Kot lahko vidite, ta bruto poraba pri transportu velja za vsa letala, odvisna pa je le od treh preprostih lastnosti letala: koeficienta zračnega upora, oblike letala in izkoristka motorja. Nanje ne vpliva velikost letala, ne njegova masa, ne gostota zraka. Če vnesemo vrednost $\epsilon = 1/3$ in predpostavimo, da je razmerje med vzgonom in uporom enako 20, potem je bruto raba energije pri transportu *katereregakoli* letala glede na naš model naslednja:

$$0,15 g$$

oziroma

$$0,4 \text{ kWh/tonski km.}$$

Ali lahko letala izboljšamo?

Če lahko tehnološki napredek le minimalno vpliva na izboljšanje izkoristka motorja in če je oblika letala že sedaj kolikor toliko izpopolnjena, potem lahko le malo storimo v zvezi s to brezdimenzijsko količino. Učinkovitost prevoza je skoraj dosegla svojo fizično mejo. Aerodinamična stroka trdi, da bi lahko malce izboljšali aerodinamične lastnosti letal, in sicer tako, da bi začeli uporabljati hibridna letala, imenovana leteča krila (angl. »blended-wing body«), in zmanjšali koeficient zračnega upora z nadzorom laminarnega toka. To je tehnologija, s katero zmanjšamo turbulenco nad krilom z odsesavanjem majhne količine zraka skozi drobne luknjice na



Slika C.9 Cessna 310N: 60 kWh na 100 potniških kilometrov. Cessna 310 Turbo s šestimi potniki (vključno z enim pilotom) in hitrostjo 370 km/h. Avtor fotografije: Adrian Pingstone.

površini (Braslow, 1999). Če bi imela obstoječa letala sisteme za nadzor laminarnega toka, bi lahko dosegli 15-odstotno boljši koeficient zračnega upora, pri t. i. letečih krilih pa bi se ta izboljšal za približno 18 % (Green, 2006). Glede na enačbo (C.26) je poraba energije pri transportu sorazmerna s kvadratnim korenom koeficienta zračnega upora, tako da bi v primeru, če bi se slednji izboljšal za 15 % oziroma 18 %, to pomenilo zmanjšanje rabe energije za 7,5 % oziroma 9 %.

Ta bruto poraba vključuje porabo energije za premikanje mase, *vključno z maso samega letala*. Da bi ocenili energijo, ki je potrebna za prevoz tovora z letalom, na enoto mase tovora, moramo to deliti s sorazmernim deležem tovora. Na primer, če tovor pri polnem tovornem letalu Boeing 747 predstavlja približno 1/3 mase, potem so transportni stroški porabe energije

$$0,45 \text{ g,}$$

oziroma približno 1,2 kWh na tonski kilometer. To je le malenkost več kot pri tovornjaku, kjer je poraba 1 kWh na tonski kilometer.

Transportna učinkovitost z vidika potnikov

Podobno lahko ocenimo tudi transportno učinkovitost potniškega letala Boeing 747.

transportna učinkovitost (potniški kilometer, opravljen z litrom goriva)

$$= \text{število potnikov} \times \frac{\text{energija na liter}}{\text{potisk}_e} \quad (\text{C.27})$$

$$= \text{število potnikov} \times \frac{\epsilon \times \text{energija na liter}}{\text{potisk}} \quad (\text{C.28})$$

$$= 400 \times \frac{1}{3} \frac{38 \text{ MJ/liter}}{200.000 \text{ N}} \quad (\text{C.29})$$

$$= 25 \text{ potniških kilometrov na liter} \quad (\text{C.30})$$

To je malenkost bolj učinkovito kot pri tipičnem avtomobilu z enim potnikom (12 km na liter), kar pomeni, da je potovanje z letalom energijsko bolj učinkovito kot vožnja z avtom, če sta v avtomobilu ena ali dve osebi. Avtomobili so bolj učinkoviti le v primeru, ko so v njih trije potniki ali več.

Ključne točke

Pokrili smo kar nekaj tem! Povzemimo sedaj glavne ugotovitve. Polovica dela, ki ga opravi letalo, je namenjena temu, da letalo *ostane v zraku*, druga polovica pa je namenjena *gibanju naprej*. Izkoristek goriva pri optimalni hitrosti, izražen kot poraba energije na enoto prevožene razdalje, smo izrazili z velikostjo sile (C.22). Izkazalo se je, da je velikost te sile sorazmerna s težo letala; konstanta v sorazmerju pa je razmerje med vzgonom letala in njegovim zračnim uporom, ki ga določa oblika letala. Medtem ko bi nižje hitrostne omejitve za avtomobile prispevale k zmanjšanju porabe



Slika C.10 »Pripnite si manšetne gumbe.« Letalo Bombardier Learjet 60XR z 8 potniki in hitrostjo 780 km/h porabi 150 kWh na 100 potniških km. Avtor fotografije: Adrian Pingstone.

energije na enoto razdalje, kakšen tak ukrep pri letalih nima smisla. Vsako letalo ima v zraku svojo optimalno hitrost, ki je odvisna od njegove teže, in letala običajno že letijo pri optimalnih hitrostih. Če bi letalo prisilili, da leti počasneje, bi se njegova poraba energije *povečala*. Edini način, kako izboljšati izkoristek goriva pri letalih, je ta, da pristanejo in se ustavijo. Letala so že čudovito optimizirana in ni veliko verjetnosti, da bi se jih še nadalje bistveno izboljšalo z vidika učinkovitosti. (Poglejte si strani 37 in 132 za nadaljnje razprave o tem, da so nova »super jumbo« letala »daleč bolj učinkovita« od starih, ter o tem (stran 35), da so turbopropelerji »daleč bolj učinkoviti« kot reaktivni motorji.)

Doseg

Še ena predpostavka, ki jo lahko izpeljemo, je, kakšen je doseg letala ali ptice oziroma kolikšna je najdaljša razdalja, ki jo lahko preleti brez dodajanja goriva. Mogoče mislite, da imajo večja letala večji doseg, toda naša predpostavka je presenetljivo preprosta. Doseg letala oziroma maksimalna razdalja, ki jo lahko preleti brez dotakanja goriva, je sorazmerna z njegovo hitrostjo in skupno energijo goriva, ter obratno sorazmerna s tem, kako hitro letalo požira gorivo:

$$\text{doseg} = v_{\text{opt}} \frac{\text{energija}}{\text{moč}} = \frac{\text{energija} \times \epsilon}{\text{sila}}. \quad (\text{C.31})$$

Torej, skupna energija goriva je njegova kalorična vrednost C (v joulih na kilogram), pomnožena z maso; masa goriva pa predstavlja neki delež f_{gorivo} skupne mase letala. Tako je

$$\text{doseg} = \frac{\text{energija} \epsilon}{\text{sila}} = \frac{C m \epsilon f_{\text{gorivo}}}{(c_d f_A)^{1/2} (mg)} = \frac{\epsilon f_{\text{gorivo}}}{(c_d f_A)^{1/2}} \frac{C}{g}. \quad (\text{C.32})$$

Težko si je predstavljati bolj preprosto napoved: doseg katerekoli ptice ali letala je zmnožek brezdimenzijskega faktorja $\epsilon f_{\text{gorivo}} / (c_d f_A)^{1/2}$, ki upošteva izkoristek motorja, koeficient zračnega upora ter geometrijo ptice, z osnovno razdaljo

$$\frac{C}{g},$$

ki je odvisna od goriva ter gravitacije in ničesar drugega. Niti od velikosti ptice, niti njene mase, dolžine ali širine, odvisna ni niti od gostote tekočine.

Kolikšna je torej ta magična osnovna dolžina? Gre za enako razdaljo ne glede na to, ali je gorivo gosja maščoba ali reaktivno gorivo: v osnovi gre pri obeh tipih goriva za ogljikovodike $(\text{CH}_2)_n$. Kalorična vrednost goriva za reaktivne motorje je $C = 40 \text{ MJ/kg}$. Razdalja pri gorivu za reaktivne motorje je

$$d_{\text{gorivo}} = \frac{C}{g} = 4000 \text{ km}. \quad (\text{C.33})$$



Slika C.11 Boeing 737-700: 30 kWh na 100 potniških km. Fotografija © Tom Collins.

Doseg ptice je imanenten doseg goriva, 4000 km, pomnožen s faktorjem $\epsilon f_{\text{gorivo}} / (c_d f_A)^{1/2}$. Če je izkoristek motorja naše ptice enak $\epsilon = 1/3$, razmerje med vzgonom ter zračnim uporom $(c_d f_A)^{1/2} \cong 1/20$, gorivo pa predstavlja skoraj polovico ptice (pri polno naloženem letalu Boeing 747 predstavlja gorivo 46 %), pridemo do zaključka, da imajo vse ptice, žive in jeklene, enak doseg: približno trikratno vrednost dosega goriva, kar pomeni okrog 13.000 km.

Ta rezultat je ponovno zelo blizu realnim številkam. Zabeležena rekordna razdalja neprekinjenega leta Boeinga 747 (prelet med 23. in 24. marcem 1989) je 16.560 km.

Trditev, da je doseg neodvisen od velikosti ptice, je zasnovana na dejstvu, da ptice vseh velikosti, od velikih gosi do drobnih lastovk in arktičnih čiger, med selitvijo premagujejo ogromne razdalje med celinami. Najdaljši zabeležen neprekinjen polet ptice je bil dolg 11.000 km, lastnik tega naslova pa je progastorepi kljunač.

Kako dolg pa je bil polet Steva Fossetta v posebej izdelanem letalu Scaled Composites Model 311 Virgin Atlantic Global Flyer? 41.467 km. [33ptcg] Neobičajno letalo: gorivo je predstavljalo kar 83 % vzletne teže, med poletom pa je izkoriščalo vetrovne stržene, da bi lahko prepotovalo večjo razdaljo. Krhko letalo je imelo na poti kar nekaj okvar.

Zanimiv argument, ki ga poraja naš model, je: če nas zanima, kakšna je optimalna gostota zraka za letenje, ugotovimo, da je potreben *potisk* (C.20) pri optimalni hitrosti neodvisen od gostote. To pomeni, da bi letalo na osnovi našega modela z veseljem letelo na katerikoli višini. Optimalne gostote ni, torej bi letalo lahko doseglo enak izkoristek goriva ne glede na gostoto zraka. Toda optimalna *hitrost* je odvisna od gostote (spomnimo se enačbe $v^2 \sim 1/\rho$ (C.16)). Se pravi, če je vse ostalo enako, bi letalo v našem modelu imelo najkrajši čas poleta, če bi letelo pri najnižji gostoti zraka. Vendar pa v resnici izkoristek motorja ni neodvisen od hitrosti in gostote zraka. Ko letalo postaja lažje zaradi izgorevanja goriva, bi v našem modelu optimalna hitrost pri dani gostoti postajala čedalje manjša ($v^2 \sim mg/(\rho(c_{d1}A_1)^{1/2})$). Letalo, ki bi potovalo pri konstantni gostoti zraka, bi torej moralo nekoliko upočasniti glede na izgubo mase zaradi goriva. Toda letalo lahko leti naprej s *konstantno* hitrostjo ali pa nadaljuje polet z *optimalno* hitrostjo, če poveča višino letenja in s tem zmanjša gostoto zraka. Ko boste naslednjič na daljšem poletu, preverite, ali bo pilot proti koncu poleta res povečal višino letenja z recimo 10.000 na 12.000 m.

Kako bi se obneslo letalo na vodikove celice?

Navedli smo že, da je učinkovitost poleta v smislu porabe energije na tonski kilometer le preprosta brezdimenzijska številka krat g . Uporaba drugačnega goriva tega bistvenega argumenta ne spremeni. Letala na vodikove celice so vredna obravnave, če je naš cilj zmanjšati emisije, ki vplivajo na podnebne spremembe. Verjetno bi bil tudi doseg takih letal boljši. Ne pričakujte pa, da bodo mnogo učinkovitejša z energijskega vidika.

Doseg goriva d_{gorivo} si lahko predstavljate kot razdaljo, ki bi jo doseglo gorivo, če bi nenadoma pretvorilo vso svojo kemično energijo v kinetično energijo in se zalučalo po tirnici v obliki parabole brez upora zraka. [Če smo bolj natančni, je razdalja, ki jo dosežemo z optimalno parabolo, dvakratnik C/g .] Ta razdalja predstavlja tudi *vertikalno* višino, do katere bi se gorivo lahko zalučalo v odsotnosti upora zraka. Še ena zabavna zadeva, ki jo opazimo, je, da je kalorična vrednost goriva C , ki sem jo navedel v joulih na kilogram, kvadrat hitrosti (enako kot pri razmerju med energijo in maso E/m v Einsteinovi enačbi $E = mc^2$, kjer je uporabljen kvadrat hitrosti c^2): $40 \times 10^6 \text{ J/kg}$ je $(6000 \text{ m/s})^2$. Tako je eden od načinov, kako razmišljamo o maščobi, lahko tudi »maščoba je 6.000 m/s«. Če bi torej radi izgubili kilograme s tekom, je hitrost, ki jo morate doseči, če se želite znebiti vse maščobe naenkrat, 6.000 m/s.

Možnosti za izboljšanje učinkovitosti letal

Letenje v gosji formaciji bi lahko pomenilo približno 10-odstotno boljši izkoristek goriva (ker je razmerje med vzgonom in zračnim uporom v formaciji višje kot pri posameznem letalu), vendar ta trik seveda sloni na dejstvu, da se gosi odločijo za selitev na isto destinacijo ob istem času.

Optimizacija dolžine poletov: letala dolgega dosega (namenjena za razdalje okrog 15.000 km) niso tako učinkovita z vidika porabe goriva, kot so letala za krajše polete, saj morajo prevažati dodatno gorivo, kar pomeni, da ostane manj prostora za tovor in potnike. Z vidika porabe energije bi bili bolj učinkoviti krajši vmesni leti z letali za krajše razdalje. Optimalno učinkovitost dosežemo pri vmesnih letih na razdalji približno 5000 km, kar pomeni, da bi imeli pri tipičnem dolgem poletu od enega do dva postanka za dotakanje goriva (Green, 2006). Večstopenjski leti na dolge razdalje bi bili za približno 15 % bolj učinkoviti z vidika porabe goriva, vendar pa bi prinesli nekatere druge dodatne stroške.

Okolju prijazna letala

Občasno lahko slišimo novice o tem, da ljudje izdelujejo okolju prijazna letala. Vendar pa smo prej v tem poglavju na osnovi našega modela ocenili, da je poraba *kateregakoli* letala okrog

0,4 kWh/tonski kilometer.

Glede na naš model je edini način, kako bi lahko bistveno izboljšali to številko, ta, da bi zmanjšali upor zraka (mogoče s kako novostjo, ki vključuje sesalnike zraka v krilih) ali da bi spremenili geometrijo letala (tako da bi bilo videti bolj kot jadralno letalo z izredno širokimi krili v primerjavi s trupom ali pa da trupa sploh ne bi bilo).

Torej, pogledimo si zadnje novosti s področja »okolju prijaznega letalstva« in preverimo, če lahko katero od tovrstnih letal premaga vrednost 0,4 kWh na tonski kilometer. Če obstaja letalo, čigar poraba je manjša od 0,4 kWh na tonski kilometer, potem je naš model pomanjkljiv.

Electra, enosedežno letalo iz lesa in tkanine, je 23. decembra 2007 letelo 48 minut in preletelo razdaljo 50 km okrog južnih Alp [6r32hf]. Letalo z 9-metrskim razponom kril ima 18-kilovatni električni motor, ki se napaja prek litij-polimernih baterij s skupno maso 48 kg. Vzletna masa letala je 265 kg (od tega pade 134 kg na letalo, 47 kg na baterije in 84 kg na človeški tovor). Če predpostavimo, da je gostota energije pri bateriji 130 Wh/kg, pri poletu pa se je porabilo 90 % kapacitete baterije (5,5 kWh), je ocena porabe približno

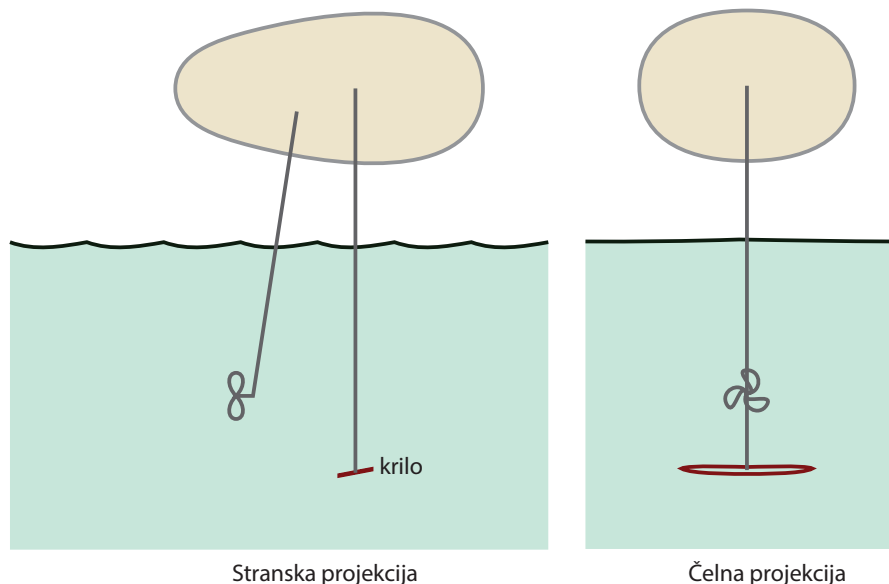
0,4 kWh/tonski kilometer,

kar je popolnoma v skladu z našim modelom. Tole električno letalo ne porablja nič manj energije kot običajno letalo, ki žre fosilna goriva.

Seveda pa to ne pomeni, da električna letala niso zanimiva. Če bi lahko klasična letala zamenjali z alternativnimi, ki porabijo enako količino



Slika C.12 Letalo Electra F-WMDJ: 11 kWh na 100 pkm. Avtor fotografije: Jean-Bernard Gache. www.apame.eu



Slika C.13 Hidrogliser. Avtor fotografije: Georgios Pazios.

energije, vendar ne povzročajo emisij ogljikovega dioksida, bi bila to vsekakor zelo koristna tehnologija. Kot potniško letalo pa dosega Elektra spoštljivih **11 kWh na 100 potniških kilometrov**, kar je podobno kot električni avtomobil iz našega diagrama na strani 128. Toda v tej knjigi je bistveno vprašanje, »od kod naj pride energija«.

Tudi mnoge ladje so ptice

Nekaj časa po tem, ko sem napisal ta grob model letenja, sem ugotovil, da pravzaprav ne drži samo za ptice v zraku, temveč tudi za hidrogliserje in druga hitra vodna vozila, za vsa tista torej, ki se dvignejo iz vode, ko se premikajo.

Slika C.13 prikazuje princip hidrogliserja. Težo plovila podpira poševno podvodno krilo, ki je lahko precej majhno v primerjavi z gliserjem. Krilo ustvarja dinamičen vzgon tako, da potiska tekočino v smeri navzdol, tako kot letalo na sliki C.2. Če predpostavimo, da se ustvarja upor predvsem na krilu in da so dimenzije krila ter hitrost plovila optimalne z namenom, da bi dosegli čim nižjo porabo energije na enoto razdalje, potem so najboljši možni transportni stroški, izraženi kot poraba energije na tonski kilometer, enaki kot v enačbi C.26, torej:

$$\frac{(c_d f_A)^{1/2}}{\epsilon} g, \quad (\text{C.34})$$

pri čemer c_d predstavlja koeficient upora podvodnega krila, f_A je brezdimenzijsko razmerje površin, ki smo ga definirali prej, ϵ je izkoristek motorja, g pa gravitacijski pospešek.

Mogoče c_d in f_A nista natančno taka kot pri optimiziranem letalu, vendar je izjemna lastnost te teorije ta, da ni odvisna od gostote tekočine,

skozi katero reže krilo. Tako ocenjujemo, da so prevozni stroški (poraba energije na enoto razdalje in enoto teže, vključno s težo vozila) hidrogliserja enaki prevoznim stroškom letala! To pomeni približno 0,4 kWh na tonski kilometer.

Za plovila, ki drsijo po vodni gladini, kot so hitri katamarani ali smučarji na vodi, bi bilo bolj pravilno, če bi na skico dodali še energijo, ki se porabi za ustvarjanje valov, vendar se nekako nagibam k temu, da je ta teorija za hidrogliserje še vedno nadvse točna.

Nisem še uspel najti podatkov o prevoznih stroških porabe energije za hidrogliser, vendar se mi zdi, da so podatki za potniški katamaran s potovalno hitrostjo 41 km/h kar ustrezni: ta porabi približno 1 kWh na tonski kilometer.

Zelo me preseneča podatek, da nekdo, ki potuje z otoka na otok z letalom, ne bo samo prišel tja hitreje kot tisti, ki potuje z ladjo, temveč bo po vsej verjetnosti porabil tudi manj energije.

Drugi načini letenja

Zrakoplovi (cepelin)

Nauk tega poglavja je bil v tem, da energijske učinkovitosti letala ne moremo povečati s tem, da zmanjšamo njegovo hitrost, ker bi kakršnokoli prednost na račun zmanjšane uporabe zraka več kot izgubili na račun tega, da mora letalo močnejše odrivati zrak v smeri navzdol. Lahko ta problem rešimo tako, da uporabimo drugačno strategijo, in sicer, da namesto odrievanja zraka navzdol naredimo letalo lahko kot zrak? Cepelin oziroma zrakoplov uporablja ogromen helijev balon, ki je lažji od zraka, kot protiutež mali kabini. Slabost te rešitve je ta, da se zaradi ogromnega balona močno poveča zračni upor plovila.

Način, kako bi lahko dosegli nizke stroške porabe energije (na enoto teže ali enoto razdalje) pri zračni ladji, je nizka hitrost zrakoplova, ki bi bil izdelan v obliki ribe, poleg tega pa bi bil izjemno velik ter dolg. No, pa izdelajmo model za izračun energije, potrebne pri idealni zračni ladji.

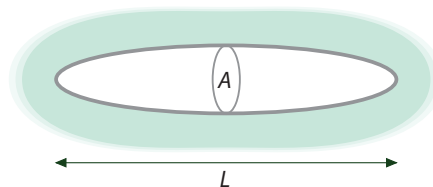
Predpostavil bom, da je balon elipsoidne oblike s prečnim presekom A in dolžino L . Njegova prostornina je $V = 2/3 AL$. Če zrakoplov lebdi stabilno v zraku z gostoto ρ , potem je njegova skupna masa, vključno s tovorom in helijem, enaka $m_{\text{skupna}} = \rho V$. Če se plovilo premika s hitrostjo v , je zračni upor

$$F = \frac{1}{2} c_d A \rho v^2, \quad (\text{C.35})$$

pri čemer je c_d koeficient zračnega upora, ki naj bi bil, sodeč po letalu, 0,03. Energija, ki se porabi na enoto razdalje, je enaka F , deljeno z izkoristkom motorjev ε . Tako so bruto transportni stroški, izraženi kot poraba energije na enoto razdalje, na enoto mase



Slika C.14 239 metrov dolg zrakoplov USS Akron (ZRS-4) nad Manhattnom. Tehtal je 100 t, njegova nosilnost pa je bila 83 t. Skupna moč motorja je bila 3,4 MW, prevažal pa je lahko 89 oseb in kup orožja s hitrostjo 93 km/h. Uporabljali so ga tudi kot »zračno« letalonosilko.



Slika C.15 Elipsoidna zračna ladja.

$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{skupna}}} = \frac{\frac{1}{2} c_d A \rho v^2}{\epsilon \rho \frac{2}{3} A L} \quad (\text{C.36})$$

$$= \frac{3}{4\epsilon} c_d \frac{v^2}{L} \quad (\text{C.37})$$

To je prav lep rezultat! Bruto raba energije pri transportu idealiziranega zrakoplova je odvisna le od njegove hitrosti v in dolžine L , ne pa od gostote zraka ρ ali preseka zrakoplova A .

Ta model brez kakršnihkoli popravkov velja tudi za podmornice. Bruto raba energije pri transportu (izražena v kWh na tonski kilometer) zrakoplova je enaka kot pri podmornici z enako dolžino in hitrostjo. Masa podmornice je sicer tisočkrat večja, ker je voda tisočkrat gostejša od zraka, a zato bo tudi poraba goriva pri takšnem transportu tisočkrat večja. Edina razlika med obema so prihodki od oglaševanja.

No, pa prevedimo tole v številke. Predpostavimo, da želimo potovati s hitrostjo 80 km/h (tako bo prečkanje Atlantika trajalo tri dni). V SI enotah je to 22 m/s. Recimo, da je izkoristek ϵ enak 1/4. Če želimo rabo energije pri transportu čim bolj zmanjšati, kolikšno dolžino zrakoplova potrebujemo? Dolžina Hindenburga je bila 245 m. Če je dolžina recimo $L = 400$ m, so potemtakem transportni stroški naslednji:

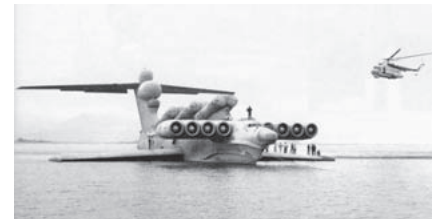
$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{skupna}}} = 3 \times 0,03 \frac{(22 \text{ m/s})^2}{400 \text{ m}} = 0,1 \text{ m/s}^2 = 0,03 \text{ kWh/tkm}.$$

Če uporabni tovor predstavlja polovico skupne mase plovila, potem znaša neto raba energije pri transportu pri tej pošastni zračni ladji **0,06 kWh/tonski kilometer**, kar je primerljivo z železnico.

Ekranoplani

Ekranoplan je hibrid med letalom in ladjo, ki deluje na principu učinka zračne blazine. Leti tik nad površino vode, pri čemer dvizna sila ne nastane kot posledica odrivanja zraka v smeri navzdol kot pri letalu niti kot posledica odrivanja vode navzdol kot pri hidrogliserju ali gliserju. Namesto tega plovilo sedi na blazini stisnjenega zraka, ki se ustvari med krili in površino pod njim. Efekt zračne blazine lahko prikažete tako, da frcnete košček kartona čez ravno mizo. Za ohranjanje te zračne blazine je potrebne zelo malo energije, tako da lahko z energetskega vidika rečemo, da je letalo, ki deluje na principu zračne blazine, zelo podobno kopenskemu vozilu brez kotalnega upora. Ne pozabite, da se pri letalu z optimalno hitrostjo polovica energije porabi za premagovanje zračnega upora, druga polovica pa za potiskanje zraka v smeri navzdol.

Sovjetska zveza je razvila ekranoplan kot vojaško vozilo in raketomet že v času Hruščova. Ekranoplan Lun je lahko dosegel hitrost 500 km/h, sila potiska, ki so jo ustvarili njegovi motorji, pa je bila 1000 kN, čeprav tak potisk ni bil več potreben, ko se je letalo enkrat odlepilo od vode.



Slika C.16 Ekranoplan Lun – malce daljši in težji od Boeinga 747. Fotografija: A. Belyaev.

Če predpostavimo, da je bil potisk med letom enak četrtini maksimalnega potiska, izkoristek motorjev pa 30 %, od 400 ton skupne mase pa je 100 ton odpadlo na tovor, je bila raba energije pri transportu za prevoz tovora **2 kWh na tonski km**. Verjamem, da bi bili ti stroški lahko dvakrat manjši kot pri običajnem letalu, če bi ekranoplan izpopolnili za transport tovora v nevojaške namene.

Miti in zmote

Letalo je na tej redni liniji tako in tako letelo, tako da je bila moja pot energijsko nevtralna.

Ta domneva je napačna iz dveh razlogov. Najprej, dodatna teža potnika na letalu zahteva dodatno energijo, da ga lahko vzdržuje v zraku. Kot drugo pa se letalske družbe na povpraševanje odzovejo s tem, da ponudijo še več letov.

Opombe in dodatno branje

stran

272 *Boeing 747*. Koefficient zračnega upora za Boeing 747 po www.aerospaceweb.org. Drugi podatki za Boeing 747 po [2af5gw]. Podatki za albatrosa po [32judd].

- *Izkoristek dejanskih reaktivnih motorjev je približno $\varepsilon = 1/3$* . Tipični izkoristki motorjev so med 23 in 36 % [adg.stanford.edu/aa241/propulsion/sfc.html]. Skupen izkoristek motorjev tipičnega letala je med 20 in 40 %, pri najboljših motorjih z obvodom pa se izkoristek med poletom giblje med 30 in 37 % [www.grida.no/climate/ipcc/aviation/097.htm]. Vendar pa ne moremo kar tako izbrati motorja z največjim izkoristkom, ker lahko to pomeni večjo maso (torej njegova masa na enoto potiska je lahko večja), kar pa zmanjša skupno učinkovitost letala.

277 *Najdaljši zabeležen neprekinjen polet ptice ...*

New Scientist 2492. »Progastorepi kljunač je kralj neba.« 26. marec 2005.

11. september 2007: Kljunač brez postanka preletel 11.500 km od Aljaske do Nove Zelandije. [2qbquv]

278 *Optimiziranje vmesnih poletov: optimalna dolžina poleta je približno 5000 km*. Vir: Green (2006).

280 *Podatki za potniški katamaran*. Po [5h6xph]: Izpodriv (pri polni obremenitvi) 26,3 tone. Na potovanju, dolgem 1050 navtičnih milj, je porabil le 4780 litrov goriva. Rekel bi, da je raba energije pri transportu tovora 0,93 kWh na tonski km. Upošteval sem tudi skupno maso samega plovila. Raba energije istega plovila glede na *potnike* pa je približno 35 kWh na 100 potniških km.

281 *Ekranoplan Lun*. Viri: www.fas.org [4p3yco], (Taylor, 2002a).

Dodatno branje: Tennekes (1997), Shyy in sod. (1999).

D Sončna energija II

Na strani 42 smo navedli štiri možnosti za izkoriščanje biomase »na sončni pogon«:

1. »nadomeščanje premoga«,
2. »nadomeščanje nafte«,
3. hrana za ljudi in druge živali,
4. sežiganje stranskih proizvodov kmetijskih dejavnosti.

Ocenili bomo maksimalni možni prispevek vsakega od teh procesov. V praksi veliko teh načinov pridobivanja energije potrebuje ogromen *vložek* dodatne energije v proces, tako da so njihovi prispevki v končni fazi dokaj borni (slika 6.14). Toda v nadaljevanju bom te dodatne stroške za vgrajeno energijo ignoriral.

Energetske rastline kot nadomestek za premog

Če bi v Veliki Britaniji gojili energetske rastline, kot so vrba, miskant ali topol (v povprečju znaša njihova moč na enoto površine $0,5 \text{ W/m}^2$), nato pa jih zmetali v elektrarno s 40-odstotnim izkoristkom, bi bila njihova moč na enoto površine $0,2 \text{ W/m}^2$. Če bi z nasadi teh dreves prekrili eno osmino Velike Britanije (500 m^2 na prebivalca), bi s tem zagotovili moč $2,5 \text{ kWh/d}$ na prebivalca.

Nadomeščanje nafte

Obstaja več načinov, kako rastline spremenimo v tekoča goriva. Potencial vsake metode bom izrazil kot moč na enoto površine (kot na sliki 6.11).

Glavna rastlina za pridobivanje biodizla v Veliki Britaniji – oljna ogrščica

Oljno ogrščico se običajno seje septembra in žanje avgusta naslednje leto. V Veliki Britaniji gojijo oljno ogrščico na 450.000 hektarih zemlje letno. (To predstavlja 2 % celotnega ozemlja Velike Britanije.) Iz oljne ogrščice letno pridelajo 1200 litrov biodizelskega goriva na hektar. Liter biodizla vsebuje $9,8 \text{ kWh}$ energije, kar pomeni moč na enoto površine $0,13 \text{ W/m}^2$.

Če bi četrtno Velike Britanije namenili za nasade oljne ogrščice, bi proizvedeni biodizel zagotovil moč $3,1 \text{ kWh/d}$ na prebivalca.

Sladkorna pesa za proizvodnjo etanola

Letni donos sladkorne pese v Veliki Britaniji je 53 ton na hektar. Iz tone sladkorne pese pa lahko proizvedemo 108 litrov bioetanola. Gostota energije bioetanola je 6 kWh na liter, tako da je moč na enoto površine pri tem procesu $0,4 \text{ W/m}^2$, če izvzamemo vloženo energijo.



Slika D.1 Dve drevesi.



Slika D.2 Oljna ogrščica. Moč na enoto površine pri pridobivanju biodizla iz te rastline je $0,13 \text{ W/m}^2$. Fotografija: Tim Dunne.

Bioetanol iz sladkornega trsa

Na območjih, kjer je mogoče pridelovati sladkorni trs (npr. Brazilija), je letni donos 80 ton na hektar, iz česar dobimo 17.600 litrov etanola. Gostota energije bioetanola je 6 kWh na liter, kar pomeni, da je moč na enoto površine pri tem procesu 1,2 W/m².

Bioetanol iz koruze (ZDA)

Moč na enoto površine (W/m²) pri bioetanolu, proizvedenem iz koruze, je presenetljivo nizka. Malce se pozabavajmo in si najprej poglejmo številke, izražene v arhaičnih enotah. Na enem akru pridelamo letno 122 mernikov koruze, kar pomeni 122 × 2,6 ameriških galon etanola s toploto 84.000 BTU, torej je moč na enoto površine pri koruzi 0,2 W/m². Vendar pa je vložek energije pri proizvodnji etanola iz koruze 83.000 BTU na galono, kar pomeni, da se kar 99 % proizvedene energije porabi za sam proces, tako da je neto moč na enoto površine le približno 0,002 W/m². Edini način, kako bi dosegli višji neto izkoristek procesa predelave koruze v bioetanol, je ta, da zagotovimo, da se izkoristi vse stranske produkte. Skupaj z energijo v slednjih znaša neto moč na enoto površine približno 0,05 W/m².

Celulozni etanol iz visoke prosene trave

Ali je celulozni etanol čudovito gorivo »naslednje generacije«? Schmer in sod. (2008) so ugotovili, da je neto letni prispevek visoke prosene trave, ki je rasla pet let na slabih obdelovalnih zemljiščih desetih farm v osrednjem delu ZDA, 60 GJ na hektar, kar je enako 0,2 W/m². »Gre za preliminarno študijo, kjer je bil uporabljen genetski material ter kmetijske tehnologije, ki so bile na voljo v letih 2000 in 2001, ko so bila polja zasajena. Izboljšana genetika in agronomija bosta morda še izboljšali energetske trajnost ter izkoristek biogoriva iz visoke prosene trave.«

Barbadoški oreh (jatropa) ima majhno moč na enoto površine

Jatropa je oljnica, ki najbolje uspeva v suhih tropskih regijah (300-1000 mm dežja na leto). Rada ima temperature med 20 in 28 °C. Pričakovan letni izkoristek v vročih območjih na ugodnih tleh je 1600 litrov biodizla na hektar. To pomeni moč na enoto površine 0,18 W/m². Na opustošeni zemlji bi bil izkoristek le 583 litrov na hektar, moč na enoto površine pa 0,065 W/m².

Kaj bi dobili, če bi 10 % ozemlja Afrike uporabili za proizvodnjo biodizla z močjo na enoto površine 0,065 W/m², nato pa to razdelili med šest milijard ljudi? Borih 0,8 kWh/d na prebivalca. Za primerjavo: svetovna poraba nafte je 80 milijonov sodčkov na dan, kar je enako 23 kWh/d na prebivalca, če to količino razdelimo med šest milijard ljudi. Tudi če bi

	Gostota energije (kWh/kg)
mehki les	
– sušen na zraku	4,4
– sušen v sušilnici	5,5
trdi les	
– sušen na zraku	3,75
– sušen v sušilnici	5,0
bel pisarniški papir	4,0
papir s sijajem	4,1
časopisni papir	4,9
lepenka	4,5
premog	8
slama	4,2
perutninski gnoj	2,4
splošni industrijski odpadki	4,4
bolnišnični odpadki	3,9
komunalni trdni odpadki	2,6
gorljivi sekundarni odpadki	5,1
pnevmatike	8,9

Tabela D.3 Kalorična vrednost lesa in podobnih materialov. Viri: Yaros (1997), Ucuncu (1993), Digest of UK Energy Statistics 2005.

celotno Afriko zasadili z jatropo, bi ta proizvodnja pokrila le tretjino svetovne porabe nafte.

Kaj pa alge?

Alge so v bistvu rastline, tako da vse, kar sem povedal do sedaj, velja tudi za njih. Sluzaste podvodne rastline niso nič bolj učinkovite pri fotosintezi kot njihovi kopenski sorodniki. Ta proizvodnja ima eno posebnost, ki je sicer še nisem omenil, je pa čisto nekaj običajnega med pridelovalci biodizla iz alg. Gre za to, da alge gojijo v vodi, močno obogateni z ogljikovim dioksidom, ki ga lahko dobijo iz elektrarn ali drugih industrijskih obratov. Rastline veliko lažje opravljajo fotosintezo, če imajo na voljo koncentriran ogljikov dioksid. Na sončni lokaciji v ZDA lahko v bazenih, v katere dovajajo koncentrirani CO_2 (10-odstotno koncentriran), alge, po besedah Rona Putta z Univerze Auburn, dnevno zrastejo do 30 g na kvadratni meter in dnevno proizvedejo 0,01 litra biodizla na kvadratni meter. To ustreza moči na enoto površine (bazena) 4 W/m^2 – podobno kot pri fotonapetostni elektrarni na Bavarskem. Če bi želeli s tipičnim avtomobilom (ki prevozi z litrom goriva približno 12 km) prevoziti 50 km na dan, bi samo za napajanje enega avtomobila potrebovali bazen z algami s skupno površino **420 kvadratnih metrov**. Za primerjavo, skupna površina na prebivalca v Veliki Britaniji je 4000 kvadratnih metrov, od tega je 69 m^2 vodnih površin (slika 6.8). Ne pozabimo, da je pri vsem tem ključno to, da se v bazene dovaja koncentrirani ogljikov dioksid. Ta tehnologija je v bistvu omejena tako s površino - vprašanje je, koliko ozemlja Velike Britanije bi lahko spremenili v bazene z algami - kot z dostopom do koncentriranega CO_2 , zajemanje katerega terja še dodatno rabo energije. Preverimo, kakšno omejitev nam predstavlja koncentrirani CO_2 . Da bi pridelali 30 g alg na m^2 na dan, potrebujemo vsaj 60 g CO_2 na m^2 na dan (ker ima molekula CO_2 večjo maso na en atom ogljika kot molekule v algah). Če bi zajeli ves CO_2 iz vseh elektrarn v Veliki Britaniji (približno 2,5 t na leto na prebivalca), bi ga lahko uporabili za 100 kvadratnih metrov prej opisanih bazenov na prebivalca, se pravi za približno 3 % države. Na taki površini bi proizvedli količino biodizla, ki bi zagotavljala moč 24 kWh/d na prebivalca, seveda pod pogojem, da bi bili podatki enaki kot za sončno Ameriko. Verjetna vizija? Mogoče desetino tega? Odgovor prepuščam vam.

Kaj pa alge v morju?

Spomnite se, kaj sem rekel malo prej: klapa, ki dela biodizel iz alg, vedno dovaja algam koncentrirani CO_2 . Na morju verjetno ne boste šli pihat CO_2 v vodo. Brez koncentriranega CO_2 pa storilnost alg upade 100-krat. Da bi bila pri morskih algah opazna razlika, bi potrebovali morsko gojišče v velikosti države.

Kaj pa alge, ki proizvajajo vodik?

Pripraviti sluz do tega, da na soncu proizvaja vodik, je pametna ideja, saj se tako izognemo mnogim kemičnim procesom, ki običajno potekajo pri rastlinah, ki proizvajajo ogljikovodike. Vsak kemični proces malenkost zmanjša izkoristek, vodik pa lahko proizvajamo neposredno pri prvi stopnji fotosinteze. Raziskava Državnega laboratorija za obnovljive vire (National Renewable Energy Laboratory) iz Kolorada je pokazala, da bi reaktor, napolnjen z gensko modificiranimi zelenimi algami, ki bi bil postavljen na 11 hektarih površine v puščavi Arizone, lahko proizvedel 300 kg vodika na dan. Energijska vrednost vodika je 39 kWh na kg, kar pomeni, da bi bila moč takega obrata za pridobivanje vodika iz alg na enoto površine enaka $4,4 \text{ W/m}^2$. Če upoštevamo ocenjeno količino električne energije, ki jo obrat porabi, bi bila neto moč na enoto površine nekoliko manjša, tj. $3,6 \text{ W/m}^2$. To se mi zdi kar precej obetavna številka, sploh če jo primerjamo recimo s fotonapetostno elektrarno na Bavarskem (5 W/m^2).

Hrana za ljudi ali druge živali

Gostota energije žit, kot so pšenica, oves, ječmen in koruza, je približno 4 kWh na kg. V Veliki Britaniji je običajni letni donos pšenice 7,7 tone na hektar. Če pšenico poje žival, je moč na enoto površine pri tem procesu $0,34 \text{ W/m}^2$. Če bi bilo 2800 m² ozemlja Velike Britanije na prebivalca (to predstavlja vse kmetijske površine) namenjeno gojenju tovrstnih kultur, bi kemična energija rastlin zagotavljala moč okrog 24 kWh/d na prebivalca.

Sežiganje stranskih kmetijskih pridelkov

Malo prej smo ugotovili, da je moč na enoto površine pri elektrarni na biomaso, ki sežiga najboljše energijske kulture, $0,2 \text{ W/m}^2$. Kolikšna bi bila moč na enoto kmetijske površine, če bi te kulturne rastline gojili za prehrano, v elektrarni pa porabili le ostanke, ki jih ne bi pojedli, oziroma če bi s to hrano krmili piščance, v elektrarnah pa uporabili zgolj tiste ostanke, ki prilezejo iz piščančjih zadnjic? Naredimo najprej grobo oceno, nato pa pogledjmo dejanske podatke. Ugibajmo na slepo in recimo, da stranske pridelke zbiramo v polovici Velike Britanije (2000 m² na prebivalca) in jih dovažamo do elektrarn s tovarnjaki. Predpostavimo še, da je moč na enoto površine pri splošnih odpadkih iz kmetijskih dejavnosti desetkrat manjša od moči na enoto površine pri najboljših energijskih rastlinah, torej $0,02 \text{ W/m}^2$. Če to pomnožimo z 2000 m², dobimo vrednost 1 kWh/d na prebivalca.

Sem bil s tem ugibanjem nepravilen do kmetijskih smeti? Ponovno lahko ocenimo verjetno proizvodnjo iz kmetijskih ostankov, in sicer tako, da podatke prototipne elektrarne za kurjenje slame v kraju Elean v regiji Vzhodna Anglija predstavimo v večjem merilu. Moč tega obrata je 36 MW, letno pa porabi 200.000 ton slame z zemljišč znotraj radija 50 milj.

Če predpostavimo, da taka gostota velja za celotno državo, potem znaša moč na enoto površine za model Elean $0,002 \text{ W/m}^2$. Če vzamemo površino 4000 m^2 na prebivalca, je to 8 W na prebivalca oz. $0,2 \text{ kWh/d}$ na prebivalca.

Izračunajmo to še drugače. Velika Britanija letno proizvede 10 milijonov ton slame oz. $0,46 \text{ kg}$ na dan na prebivalca. Pri gostoti energije $4,2 \text{ kWh}$ na kg bi lahko z njeno kemično energijo zagotavljali 2 kWh na dan na prebivalca. Če bi vso slamo sežigali v elektrarnah z izkoristkom 30% - te ideje živali na kmetijah, ki imajo pač drugačne namene s slamo, ne bi dobro sprejele -, bi lahko zagotovili proizvodno moč $0,6 \text{ kWh/d}$ na prebivalca.

Metan z deponij

Velik del metana z deponij predstavlja plin, ki se sprošča iz odpadnih bioloških materialov, še posebej odpadkov hrane. Metan z deponij bo predstavljal trajnostni vir energije dotlej, dokler bomo metali stran stvari, kot sta hrana in časopisni papir. Poleg tega je sežiganje tega plina koristno z vidika podnebnih sprememb, saj je metan toplogredni plin z večjim učinkom kot CO_2 . Deponija, ki letno sprejme $7,5$ milijona ton odpadkov iz gospodinjstva, lahko proizvede 50.000 m^3 metana na uro.

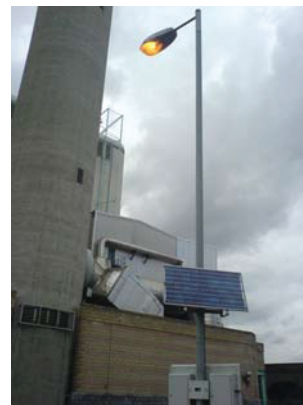
Leta 1994 so bile skupne emisije metana z deponij ocenjene na $0,05 \text{ m}^3$ na prebivalca na dan, kar pomeni, da bi lahko s kemično energijo tega metana zagotavljali $0,5 \text{ kWh/d}$ na prebivalca. Če bi vse pretvorili v električno energijo s 40 -odstotnim izkoristkom, bi lahko zagotovili $0,2 \text{ kWh}_e/\text{d}$ na prebivalca. Zaradi sprememb v zakonodaji pa količina emisij plinov z deponij pada in je zdaj že skoraj za 50% nižja.

Sežiganje odpadkov iz gospodinjstva

SELCHP (»South East London Combined Heat and Power«) [www.sel-chp.com] je elektrarna z močjo 35 MW , ki služi s tem, da letno sežge 420 kt črnih vreč odpadkov z območja Londona. Odpadke sežigajo v celoti, brez ločevanja. Po sežigu odstranijo material, ki vsebuje železo, in ga namenijo za reciklažo, prefiltrirajo pa tudi nevarne odpadke, ki jih pošljejo na posebne deponije. Preostali pepel predelajo v material za ponovno uporabo pri gradnji cest ali zgradb. Kalorična vrednost odpadkov je $2,5 \text{ kWh/kg}$, toplotni izkoristek obrata za proizvodnjo električne energije je približno 21% , kar pomeni, da se vsak kilogram odpadkov pretvori v $0,5 \text{ kWh}$ električne energije. Emisije ogljikovega dioksida so približno 1000 g na kWh . Od 35 MW so približno 4 MW potrebni za delovanje strojev in za filtrirne procese.

Če to idejo nekoliko razširimo: če bi imel vsak mestni okraj tak obrat in če bi vsak posameznik prispeval 1 kg odpadkov na dan, potem bi s sežiganjem odpadkov lahko zagotovili $0,5 \text{ kWh}_e/\text{d}$ na prebivalca.

Številka je podobna oceni za zajem deponijskega plina. Ne pozabite, da ne moremo imeti obojega. Več sežiganja odpadkov pomeni manj metana



Slika D.4 SELCHP – vaše smeti so njihov posel.

na deponijah. Če želite več informacij o sežiganju odpadkov, si pogledjte sliko 27.2 na strani 206 in sliko 27.3 na strani 207.

Opombe in dodatno branje

stran

283 *Moč na enoto površine pri proizvodnji električne energije iz vrbe, miskanta ali topola je $0,2 \text{ W/m}^2$.* Viri: Select Committee on Science and Technology Minutes of Evidence – Memorandum from the Biotechnology & Biological Sciences Research Council [www.publications.parliament.uk/pa/ld200304/ldselect/ldsctech/126/4032413.htm]. »Običajno se v Severni Evropi lahko letno proizvede 10 t suhe lesne biomase na hektar. ... Tako bo proizvodnja na območju 1 km^2 dosegla 1000 t suhe snovi na leto – dovolj za 150 kW_e pri nizkih izkoristkih električne pretvorbe ali 300 kW_e pri visokih izkoristkih električne pretvorbe.« To pomeni $0,15\text{--}0,3 \text{ W}_e/\text{m}^2$. Glej tudi Layzell in sod. (2006), [3ap71c].

283 *Oljna ogrščica.* Viri: Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), www.defra.gov.uk.

- *Sladkorna pesa.* Vir: statistics.defra.gov.uk/esg/default.asp

284 *Bioetanol iz koruze.* Vir: Shapouri in sod. (1995).

- *Bioetanol iz celuloze.* Glejte tudi Mabey in sod. (2006).

- *Jatropa.* Viri: Francis in sod. (2005), Asselbergs in sod. (2006).

285 *V Ameriki lahko alge v bazenih, v katere dovajajo koncentrirani CO_2 , dnevno zrastejo do 30 g na kvadratni meter in proizvedejo $0,01$ litra biodizla na kvadratni meter.* Vir: Putt (2007). Pri tem izračunu ni upoštevana raba energije, ki se porabi za vzdrževanje bazenov z algami in predelave alg v biodizel. Putt navede energijsko bilanco predlagane zasnove za farmo alg na 100 akrih (približno $40,5 \text{ ha}$ (op. prev.)) površine, ki jo napaja metan iz gnilišča živalske stelje. Opisana farma bi v resnici zagotavljala manj moči, kot bi je potrebovala (metan). Za farmo na taki površini bi potrebovali 2600 kW moči (metan), kar ustreza specifični vhodni moči $6,4 \text{ W/m}^2$. Če povzamem, moč proizvedenega biodizla na enoto površine bi bila le $4,2 \text{ W/m}^2$. Vse predloge za izdelovanje biogoriv je treba kritično ovrednotiti!

286 *Raziskava Državnega laboratorija za obnovljive vire iz Kolorada je pokazala, da bi gensko modificirane zelene alge, ki bi pokrivale 11 hektarjev površin, lahko proizvedle 300 kg vodika na dan.* Vir: Amos (2004).

- *Elektrarna Elean.* Vir: Vladna Bela knjiga (2003). Elektrarna Elean (36 MW) – prva britanska elektrarna na slamo. *Pridelava slame:* www.biomasse-energycentre.org.uk.

287 *Deponijski plin.* Viri: Matthew Chester, City University, London, osebni razgovor; Meadows (1996), Aitchison (1996); Alan Rosevear, predstavnik Velike Britanije v odboru Methane to Markets Landfill Gas Sub-Committee, maj 2005 [4hamks].



E Ogrevanje II

Popolnoma zatesnjena in izolirana stavba bi lahko zadržala toploto za vse večne čase in sploh ne bi potrebovala ogrevanja. Dva glavna razloga, zakaj zgradbe izgubljajo toploto, sta:

1. **prehod toplote** – prehod toplote neposredno skozi stene, okna in vrata;
2. **ventilacija in zračenje** – uhajanje toplega zraka skozi razpoke, luknje ali namensko postavljene prezračevalne vode.

Pri standardnem modelu toplotnih izgub sta obe sorazmerni s temperaturno razliko med zrakom znotraj in zunaj stavbe. Pri tipični britanski hiši se s prehodom izgubi več toplote, kar bomo videli v nadaljevanju.

Pri prehodu toplote iz stavb gre predvsem za dva fizikalna mehanizma kondukcija (prevajanje) in konvekcija (prehajanje), v manjši meri tudi sevanje. Vsi ti mehanizmi prispevajo svoj delež pri prenosu toplote iz notranjosti stavb ven, zato jih lahko skupaj opišemo kot prehod toplote (op.ur.).

Toplotne izgube zaradi prehoda

Izgube toplote z neposrednim prehodom skozi stene, strop, tla ali okna so odvisne od treh dejavnikov: površine stene, toplotne prehodnosti, ki je v stroki znana kot »U-vrednost«, ter temperaturne razlike –

toplotne izgube = površina $\times$ U $\times$ temperaturna razlika.

Običajna merska enota za U-vrednost je $W/m^2/K$. (En Kelvin (1 K) je enako velik kot ena stopinja Celzija (1 °C).) Večja U-vrednost pomeni večje toplotne izgube. Dvojna zasteklitev je približno enako dobra kot masiven opečnat zid. (Glejte tabelo E.2.)

U-vrednosti materialov, ki se uporabljajo skupaj, kot na primer stena in notranje obloge, se kombinirajo na enak način kot električne prevodnosti:

$$u_{\text{serija materialov}} = 1 / \left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} \right).$$

Primer, kako se to pravilo uporablja v praksi, je prikazan na strani 296.

Toplotne izgube zaradi ventilacije in zračenja

Da bi ugotovili, koliko toplote je potrebno za ogrevanje hladnega dovodnega zraka, potrebujemo specifično toploto zraka: $1,2 \text{ kJ/m}^3/K$.

V gradbeni stroki se izgube moči zaradi ventilacije in zračenja prostorov običajno izražajo kot produkt števila menjav zraka v prostoru na uro (N), prostornine prostora V , izražene v kubičnih metrih, specifične toplote C in temperaturne razlike ΔT med zrakom znotraj ter zunaj stavbe.



kuhinja	2
kopalnica	2
dnevna soba	1
spalnica	0,5

Tabela E.1 Kolikokrat v uri se zrak zamenja: tipične vrednosti N za prostore brez prepriha. Prostori, ki so najbolj izpostavljeni prepihu, imajo mogoče tri menjave zraka v uri ($N = 3$). Minimalno priporočeno število menjav zraka v uri je med 0,5 in 1, kar zagotavlja dovolj svežega zraka za zdravje oseb, varno izogrevanje goriv ter preprečevanje uničevanja tkanin, uporabljenih v stavbah, zaradi prekomerne vlage v zraku (EST 2003).

	U-vrednosti (W/m²/K)		
	Stare zgradbe	Moderni standardi	Najboljše metode
Stene		0,45-0,6	0,12
masivni zid	2,4		
zunanja stena: masivna opeka (23 cm)	2,2		
28 cm dvojni (sendvič) zid			
opeka-beton, brez vmesnega polnila	1,0		
28 cm dvojni (sendvič) zid			
opeka-beton, z vmesno izolacijo	0,6		
Tla		0,45	0,14
dvignjena lesena tla	0,7		
masivna betonska tla	0,8		
Strehe		0,25	0,12
ravna streha s 25 mm izolacije	0,9		
dvokapna streha s 100 mm izolacije	0,3		
Okna			1,5
enojna zasteklitev	5,0		
dvojna zasteklitev	2,9		
dvojna zasteklitev, 20 mm razmaka	1,7		
trojna zasteklitev	0,7–0,9		

Tabela E.2 U-vrednosti za stene, tla, strehe in okna.

moč
(vati)

=

$C \frac{N}{1h} V(m^3) \Delta T(K)$

(E.1)

=

$(1,2 \text{ kJ/m}^3 / K) \frac{N}{3600 \text{ s}} V(m^3) \Delta T(K)$

(E.2)

=

$\frac{1}{3} N V \Delta T.$

(E.3)

Energijske izgube in temperaturni primanjkljaj (stopinjski dnevi)

Ker je enačba za energijo moč × čas, lahko energijo, ki se izgubi zaradi *prehoda toplote* skozi določeno površino v kratkem obdobju, definiramo kot

izguba energije = površina × U × (ΔT × čas trajanja),

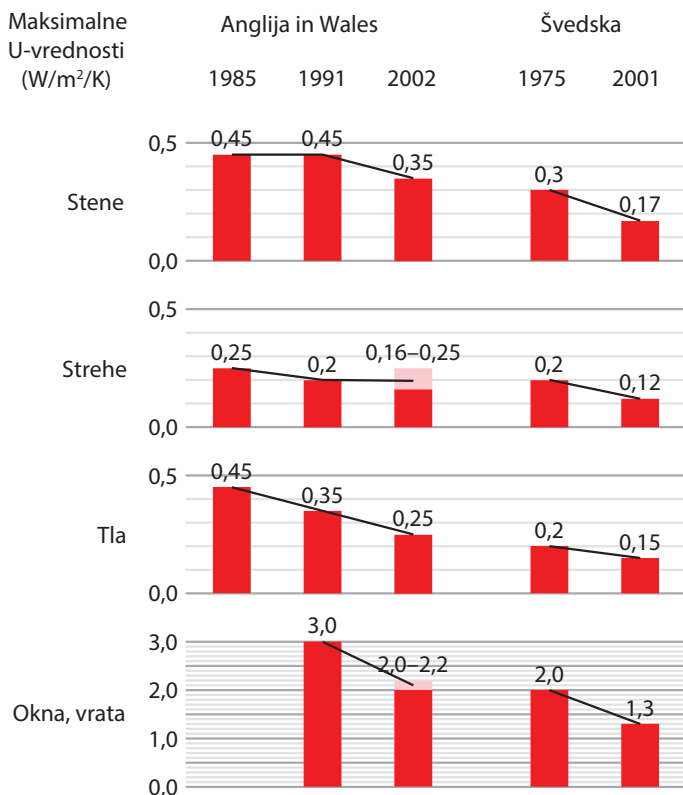
energijo, ki se izgublja z *ventilacijo in zračenjem* pa kot

$\frac{1}{3} NV \times (\Delta T \times \text{čas trajanja}).$

Vidimo, da imata oba tipa izgub obliko

$\text{nekaj} \times (\Delta T \times \text{čas trajanja}),$

pri čemer se naš »*nekaj*« meri v vatih na °C.

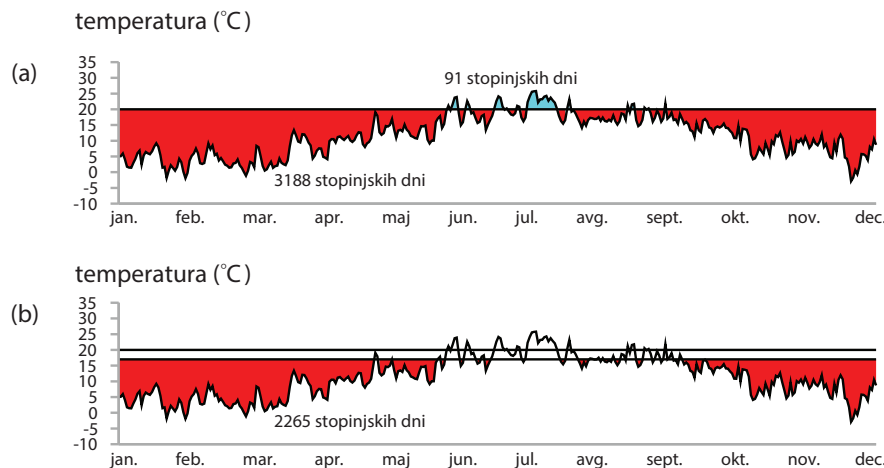


Slika E.3 U-vrednosti, ki so določene z gradbenimi predpisi v Veliki Britaniji in na Švedskem.

Temperaturna razlika ΔT se spreminja glede na dan in noč ter letne čase, vendar si lahko predstavljamo, da je daljše obdobje razdeljeno na veliko krajših dob, v katerih je temperaturna razlika bolj ali manj konstantna. Od dobe do dobe se temperaturne razlike spremenijo, naš »nekaj« pa ne. Pri ocenjevanju celotne izgube energije zaradi prehoda toplote ter ventilacije in zračenja prostora v daljšem časovnem obdobju moramo torej samo pomnožiti dvoje:

1. vsoto vseh »nekaj-ev« (dodamo zmnožek $\text{površina} \times U$ za vse stene, strehe, talne površine, vrata in okna ter $\frac{1}{3} NV$ za prostornino) in
2. vsoto vseh faktorjev »temperaturna razlika $\times$ čas trajanja« (za vse dobe).

Prvi faktor je lastnost stavbe, izmerjena v vatih na °C. Poimenoval ga bom *prepustnost* stavbe. (Prepustnost včasih poimenujemo *koeficient toplotnih izgub*.) Drugi faktor je lastnost vremena; pogosto se ga izrazi kot število »stopinjskih dni«, saj se temperaturna razlika meri v stopinjah, dnevi pa so primerna časovna enota. Na primer, če je ves teden temperatura v vaši hiši 18 °C, zunanja temperatura pa 8 °C, potem rečemo, da je teden prispeval $10 \times 7 = 70$ stopinjskih dni k skupnem rezultatu ($\Delta T \times \text{čas trajanja}$). Vsoto vseh takih faktorjev ($\Delta T \times \text{čas trajanja}$) bom poimenoval *temperaturni primanjkljaj* v določenem obdobju.



$$\text{izgubljena energija} = \text{koeficient toplotnih izgub} \times \text{temperaturni primanjkljaj.}$$

Izgube energije lahko zmanjšamo tako, da zmanjšamo koeficient toplotnih izgub zgradbe ali naš temperaturni primanjkljaj ali oboje. V naslednjih dveh podpoglavjih si bomo podrobneje ogledali ta dva faktorja na primeru hiše v Cambridgeu.

Obstaja še tretji faktor, ki ga ne smemo pozabiti. Izgubljeno energijo nadomestijo ogrevalni sistem v zgradbi ter drugi viri energije, kot so stanovanjci, njihove naprave, kuhalniki in sonce. Če se osredotočimo na ogrevalni sistem, vidimo, da energija, ki jo ogrevanje daje, ni enaka energiji, ki jo ogrevanje porablja. Obe količini povezuje učinkovitost ogrevalnega sistema.

$$\text{porabljena energija} = \text{dobavljena koristna energija} / \text{učinkovitost}$$

Pri kondenzacijskem plinskem kotlu je na primer učinkovitost 90 %, ker se 10 % energije izgubi v dimniku.

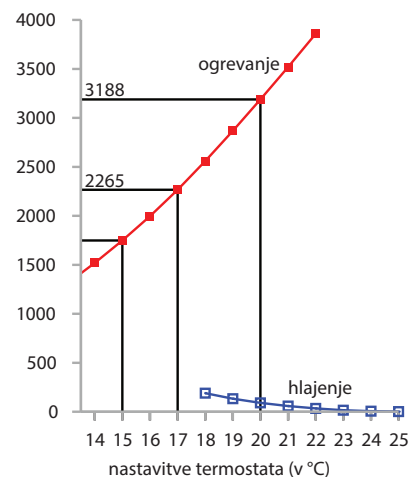
Če povzamem, obstajajo trije načini, kako lahko zmanjšamo porabo energije v zgradbi:

1. z zmanjšanjem temperaturnega primanjkljaja;
2. z zmanjšanjem koeficienta toplotnih izgub zgradbe ali
3. s povečanjem učinkovitosti naprav ali sistema.

Sedaj pa pretehtajmo potencial teh možnosti. (Četrta možnost - povečanje toplotnih dobitkov, posebej zaradi sonca - bi bila tudi koristna, vendar je na tem mestu ne bom izpostavil.)

Slika E.4 Temperaturni primanjkljaj v Cambridgeu leta 2006, prikazan kot obarvana površina na grafu povprečnih dnevnih temperatur. (a) Nastavitev termostata na 20 °C, vključno s hlajenjem v poletnem času; (b) zimska nastavitev termostata na 17 °C.

Temperaturni primanjkljaj
(število stopinjskih dni v letu)



Slika E.5 Temperaturne potrebe v Cambridgeu, izražene v stopinjskih dneh na leto v odvisnosti od nastavitve termostata (°C). Če v zimskem obdobju zmanjšamo nastavitev termostata z 20 na 17 °C, se temperaturni primanjkljaj za ogrevanje zmanjša za 30 odstotkov oziroma natančneje: s 3188 na 2265 stopinjskih dni. Če v poletnem času zvišamo nastavitev termostata z 20 °C na 23 °C, se temperaturni primanjkljaj za hlajenje zmanjša za 82 % oziroma z 91 na 16 stopinjskih dni.

Temperaturni primanjkljaj

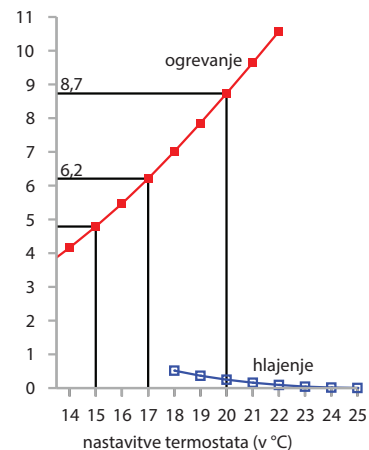
Temperaturni primanjkljaj lahko lepo prikažemo na grafu zunanjih temperatur v nekem časovnem obdobju (slika E.4). Za zgradbo, v kateri vzdržujemo notranjo temperaturo pri 20 °C, je skupni temperaturni primanjkljaj enak *površini*, ki jo omejujejo vodoravna premica pri 20 °C ter vrednosti zunanjih temperatur. Na sliki E.4 vidimo, da je bil celoletni temperaturni primanjkljaj zgradbe v Cambridgeu, v kateri se je vzdrževala temperatura 20 °C, 3188 stopinjskih dni ogrevanja in 91 stopinjskih dni hlajenja. Te slike nam omogočijo, da lahko enostavno ocenimo učinek znižanja temperaturne nastavitve termostata ter neuporabe klime. Če zimsko nastavitvev termostata znižamo na 17 °C, se temperaturni primanjkljaj zgradbe zmanjša s 3188 stopinjskih dni na 2265 stopinjskih dni (slika E.4(b)), kar pomeni kar 30-odstotno znižanje potrebe zgradbe po ogrevanju. Če termostat znižamo na 15 °C, se temperaturni primanjkljaj zmanjša za kar 45 % oziroma, natančneje, s 3188 na 1748 stopinjskih dni.

Ti izračuni so okviren prikaz koristi nižjih temperaturnih nastavitvev termostata, natančnejše napovedi pa lahko damo le, če upoštevamo dva podatka. Kot prvo, zgradbe same po sebi absorbirajo toploto sonca, kar prispeva k višji temperaturi v prostoru brez dodatnega ogrevanja. Kot drugo pa prebivalci in njihove ljube naprave oddajajo toploto, kar še dodatno zmanjša potrebo po dodatnem ogrevanju. Temperaturni primanjkljaj neke lokacije, ki je običajno izražen s stopinjskimi dnevi, je dokaj okoren podatek. Sam si težko zapomnim številke kot je na primer »3500 stopinjskih dni«. In enako lahko ta enota zmede tudi angleško govoreče akademike, saj ima zanje izraz »degree days« dva pomena, pri čemer eden pomeni slavnost, ki vključuje halje in diplomantske kape. Ta parameter lahko naredimo bolj pomenljiv in prijaznejši za uporabo, če ga delimo s 365, se pravi s številom dni v letu, kar nam dá temperaturni primanjkljaj v »stopinjskih dnevih na dan« oziroma, če vam je to ljubše, enostavno v »stopinjah«. Graf na sliki E.6 prikazuje temperaturni primanjkljaj s pretvorjeno skalo. Če temperaturni primanjkljaj izrazimo na ta način, ta v resnici prikazuje *povprečno* temperaturno razliko med zrakom znotraj in zunaj zgradbe. Obravnavani temperaturni primanjkljaj je naslednji: 8,7 °C za nastavitev termostata na 20 °C; 6,2 °C za nastavitev 17 °C in 4,8 °C za nastavitev 15 °C.

Prepustnost na primeru moje hiše

Moja hiša je trisobni dvojček, ki je bil zgrajen okrog leta 1940 (slika E.7). Do leta 2006 je bila kuhinja malce razširjena, večina oken pa je bila dvojno zastekljena. Vhodna in zadnja vrata so imela še vedno enojno zasteklitev.

Moja ocena koeficienta toplotnih izgub leta 2006 je prikazana v tabeli E.8. Celotni koeficient toplotnih izgub je bil 322 W/°C (oz. 7,7 kWh/d/°C), pri čemer koeficient zaradi prehoda toplote predstavlja 72 %, koeficient zaradi prezračevanja pa 28 % skupne vrednosti. Koeficient toplotnih izgub



Slika E.6 Temperaturni primanjkljaj v Cambridgeu leta 2006. Enote na vertikalni osi prikazujejo stopinjske dneve na dan oziroma stopinje. S temi enotami temperaturni primanjkljaj prikazuje povprečne temperaturnih razlik med notranjostjo zgradbe in okolico.



Slika E.7 Moja hiša.

zaradi prehoda toplote se skoraj enakomerno porazdeli na tri dele: okna, stene ter talne in stropne površine.

KOEFICIENT TOPLOTNIH IZGUB ZARADI PREHODA TOPLOTE	površina (m ²)	U-vrednost (W/m ² /°C)	koeficient toplotnih izgub (W/°C)
Horizontalne površine			
Dvokapna streha	48	0,6	28,8
Ravna streha	1,6	3	4,8
Tla	50	0,8	40
Vertikalne površine			
Stene prizidka	24,1	0,6	14,5
Glavne stene	50	1	50
Tanjše stene (13 cm)	2	3	6
Vrata in okna z enojno zasteklitvijo	7,35	5	36,7
Okna z dvojno zasteklitvijo	17,8	2,9	51,6
Skupni koeficient toplotnih izgub zaradi prehoda toplote			232,4

KOEFICIENT TOPLOTNIH IZGUB ZARADI PREZRAČEVANJA	prostornina (m ³)	N (št. menjav zraka v uri)	koeficient toplotnih izgub (W/°C)
Spalnice	80	0.5	13.3
Kuhinja	36	2	24
Veža	27	3	27
Druge sobe	77	1	25.7
Skupni koeficient toplotnih izgub prezračevanja			90

Tabela E.8 Prikaz koeficienta toplotnih izgub zaradi prehoda toplote ter ventilacije in zračenja na primeru moje hiše pred letom 2006. Predpostavil sem, da je osrednja stena dvojčka popolna izolirana stena, vendar mogoče moja domneva ne drži, če je prostor med sosednjima hišama v resnici dobro prezračen. Na sliki so obarvani tisti parametri, ki so se po letu 2006 spremenili zaradi uvedbe sprememb, ki so opisane v nadaljevanju.

Za primerjavo koeficienta toplotnih izgub dveh stavb z različnima talni-
ma površinama lahko koeficienta delimo s skupno površino tal. Tako dobi-
mo podatek o *specifičnih toplotnih izgubah* stavbe, ki se merijo v W/°C/m².
Specifične toplotne izgube te hiše (skupna talna površina meri 88 m²) so

$3,7 \text{ W/°C/m}^2.$

Na podlagi tega podatka lahko ocenimo, kakšna je dnevna poraba
energije hiše v hladnem zimskem dnevu in kakšna je poraba čez leto.

Če predpostavimo, da je na hladen zimski dan zunanja temperatura
nekje – 1 °C, temperatura prostora pa 19 °C, je temperaturna razlika Δ*T*
enaka 20 °C. Če vzamemo, da se taka temperaturna razlika ohranja šest ur
na dan, potem znašajo toplotne izgube v enem dnevu

$322 \text{ W/°C} \times 120 \text{ stopinjских ur} \simeq 39 \text{ kWh.}$

Če je temperatura prostora 19 °C čez cel dan (24 ur na dan), so dnevne
izgube energije

155 kWh/d.

Da bi izračunali skupne toplotne izgube čez celo leto, vzemimo podatke o temperaturnem primanjkljaju iz grafa E.5. Pri nastavitvi termostata na 19 °C je bil skupni temperaturni primanjkljaj leta 2006 natančno 2866 stopinjskih dni. Povprečne toplotne izgube ob predpostavki, da je temperatura prostora vedno 19 °C, so tako:

$$7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C} \times (2866 \text{ stopinjskih dni/leto}) / (365 \text{ dni/leto}) = 61 \text{ kWh/d.}$$

Če termostat nastavimo na 17 °C, se toplotne izgube znižajo v povprečju na 48 kWh/d. Če temperaturo dvignemo na tropskih 21 °C, pa se povprečne izgube povečajo na 75 kWh/d.

Koristi dodatne izolacije

Leta 2007 sem opravil naslednja dela v hiši:

1. dodal sem izolacijo med dvojne (sendvič) zidove (ki je v glavnih zidovih ni bilo) – slika 21.5;
2. dodatno sem izoliral streho;
3. pred stara vhodna vrata sem vgradil nova – slika 21.6;
4. zadnja vrata sem zamenjal z novimi vrati z dvojno zasteklitvijo;
5. še edino okno z enojno zasteklitvijo sem zamenjal z oknom z dvojno zasteklitvijo.

Kakšne spremembe pri toplotnih izgubah lahko pričakujemo?

Skupni koeficient toplotnih izgub pred prenovi je bil 322 W/°C.

Z naknadno izolacijo dvojnih zidov (nova U-vrednost je 0,6 W/m²/K) se je koeficient toplotnih izgub hiše zmanjšal za 20 W/°C. Dodatna izolacija podstrešja (nova U-vrednost je 0,3 W/m²/K) bi morala zmanjšati koeficient toplotnih izgub za 14 W/°C. Na račun dvojnega zastekljevanja (nova U-vrednost je 1,6–1,8 W/m²/K) bi se moral koeficient toplotnih izgub zaradi prehoda toplote znižati za 23 W/°C, prepustnost zaradi ventilacije in zračenja pa za približno 24 W/°C. To pomeni, da bi se skupni koeficient toplotnih izgub hiše znižal za kar 25 % oziroma s približno 320 na 240 W/°C (7,7 na 6 kWh/d/°C). Tabela E.9 prikazuje pričakovane prihranke energije za posamezen ukrep.

Skupne specifične toplotne izgube hiše (skupne površine 88 m²) se tako lahko zmanjšajo za približno 25 %, s 3,7 na 2,7 W/°C/m². (To je še daleč od 1,1 W/°C/m², kolikor zahtevajo novi gradbeni pravilniki za »trajnostne« hiše.)

– izolacija dvojnih sten (izvedena na dveh tretjinah vseh stenskih površin)	4,8 kWh/d
– dodatna izolacija strehe	3,5 kWh/d
– manjši prehod toplote zaradi dvojne zasteklitve na dveh vratih in enem oknu	1,9 kWh/d
– boljša zrakotesnost v veži in kuhinji zaradi obnove vrat in oken	2,9 kWh/d

Tabela E.9 Pričakovano zmanjšanje toplotnih izgub moje hiše glede na posamezne ukrepe (podatki za hladni zimski dan).

Prav frustrirajoče težko je res bistveno zmanjšati koeficient toplotnih izgub že zgrajene hiše! Kot smo videli malo prej, to veliko lažje dosežemo tako, da enostavno znižamo nastavitev termostata. Če namesto 20 °C nastavimo temperaturo na 17 °C, se toplotne izgube zmanjšajo za 30 %.

Če pa se odločimo za kombinacijo obojega, za fizično prenovo oz. spremembe ter nižjo temperaturno nastavitev na termostatu, lahko po našem modelu pričakujemo skoraj 50-odstotno zmanjšanje toplotnih izgub. In ker nekaj toplote v prostoru prihaja od sonca, naprav in oseb, bi to moralo pomeniti za več kot 50 % nižjo porabo plina.

Vse našteje spremembe sem dejansko naredil v svoji hiši, poleg tega pa sem vsak teden redno spremljal merilnike porabe. Lahko potrdim, da se je moj račun za ogrevanje dejansko znižal za več kot 50 %. Kot je razvidno z grafa 21.4, se je poraba plina v mojem gospodinjstvu znižala s 40 kWh/d na 13 kWh/d, to pa je kar 67-odstotno zmanjšanje.

Zmanjšanje koeficienta toplotnih izgub z notranjimi stenskimi oblogami

Ali lahko zmanjšamo koeficient toplotnih izgub sten z izolacijo *notranjih* sten stavbe? Seveda, vendar obstajata pri tem dve težavi. Kot prvo se lahko zgodi, da je notranja obloga debelejša, kot bi pričakovali. Da bi obstoječo steno iz masivne opeke širine 23 cm (U-vrednost je 2,2 W/m²/K) spremenili v spodobno steno z U-vrednostjo 0,30 W/m²/K, potrebujemo približno 6 cm izolacije. [65h3cb] Druga težava pa je ta, da lahko pride do kondenzacije na skritih plasteh naše notranje izolacije, zaradi česar imamo potem probleme z vlago.

Če vaš cilj ni tako veliko zmanjšanje koeficienta toplotnih izgub sten, se lahko odločite za tanjšo notranjo izolacijo. Na primer, kupite lahko stenske obloge debeline 1,8 cm z U-vrednostjo 1,7 W/m²/K. Če te namestite na obstoječe stene, se U-vrednost zmanjša z 2,2 W/m²/K na:

$$1 / \left(\frac{1}{2,2} + \frac{1}{1,7} \right) \simeq 1 \text{ W/m}^2/\text{K}.$$

Definitivno zmanjšanje, ki se izplača.

Izmenjava zraka v prostoru

Ko je hiša enkrat dobro izolirana, se največ toplote izgublja zaradi prezračevanja (izmenjave zraka) in ne s prehodom toplote. Toplotne izgube zaradi prezračevanja lahko zmanjšamo s prenosom toplote z izhodnega na vhodni zrak. Presenetljivo velik del te toplote se pravzaprav lahko prenese brez dodatnega vložka energije. Trik je v tem, da uporabimo princip nosu, natančno takega, kot se je razvil z naravno selekcijo. Človeški nos ogreva vhodni zrak tako, da hladi izhodni zrak. Vzdolž nosu se temperatura spreminja, pri čemer so stene nosu najhladnejše pri nosnicah. Daljši nos imate,

boljši protitočni prenosnik toplote bo. Pri nosovih, ki jih najdemo v naravi, se smer zraka običajno izmenjuje. Še en način, kako lahko organiziramo nos, je ta, da imamo dva kanala za zrak, enega za vhodni in drugega za izhodni zrak. Z vidika zraka sta sicer ločena, vendar potekata tik drug ob drugem, tako da se toplota zlahka prenaša med njima. Tako delujejo nosovi zgradb. No, običajno jih imenujemo prenosniki toplote.

Energetsko učinkovita hiša

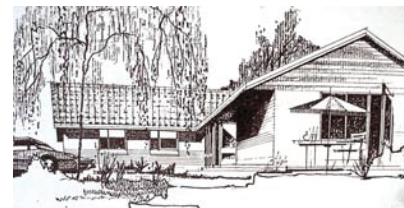
Leta 1984 je energetski svetovalec Alan Foster v bližini Cambridgea zgradil energetsko učinkovito hišo. Prijazno mi je odstopil natančne podatke o hiši. Hiša je bungalov z lesenim ogrodjem, ki je narejen po zasnovi skandinavske zgradbe, imenovan je »Heatkeeper Serrekunda« (slika E.10). Hiša s skupno površino 140 m² sestavljajo tri spalnice, kabinet, dve kopalnici, dnevna soba, kuhinja in veža. Lesene zunanje stene je v kompletu dobavilo škotsko podjetje, glavna hiša pa je bila zgrajena v le nekaj dneh.

Debelina sten je 30 cm, njihova U-vrednost pa je 0,28 W/m²/°C. Plasti, ki jo sestavljajo v smeri od znotraj proti zunaj, so: mavčna plošča debeline 13 mm, 27 mm zračnega prostora, ovira za prehod pare, 8 mm debela vezana plošča, kamena volna debeline 9 mm, 12-milimetrška iverna plošča z bitumenskim premazom, 50-milimetrski prostor ter opečnat zid debeline 103 mm. Stropna konstrukcija je podobna, le da ima 100–200 mm debelo izolacijo iz kamene volne. U-vrednost za strop je 0,27 W/m²/°C, za tla pa 0,22 W/m²/°C. Okna so dvojno zastekljena (U-vrednost je 2 W/m²/°C), posebni zunanji premaz notranjih okenskih okvirjev pa zmanjšuje toplotno sevanje. Tudi postavitev oken je taka, da so toplotni učinki sonca čim večji; sonce prispeva kar 30 % energije za ogrevanje prostora.

Hiša je dobro izolirana, vsa vrata in okna pa so dodatno zatesnjena z neoprenskim trakom. Hišo segreva topel zrak, ki se ga vpihuje prek talnih rešetk. Pozimi ventilatorji odsesavajo porabljen zrak iz več prostorov in ga odvajajo iz hiše ter vpihujejo zrak iz podstrešnega prostora. Tako vstopni kot izstopni zrak gresta skozi prenosnik toplote (slika E.11), ki prihrani kar 60 % toplote odsesanega zraka. Prenosnik toplote je pasivna naprava, ki ne porablja energije za svoje delovanje. Je kot velik kovinski nos, ki ogreva vhodni zrak s toploto izhodnega zraka. Na hladen zimski dan, ko je bila zunanja temperatura – 8 °C, je bila temperatura vsesanega zraka na podstrešju 0 °C, temperatura izstopnega zraka iz prenosnika toplote pa + 8 °C.

V prvih desetih letih so hišo v celoti ogrevali z električnimi grelniki, tako da so 150-galonski hranilnik toplote ogrevali ponoči, ko je tarifa nižja. Pred kratkim so v hišo napeljali plinovod, tako da prostore sedaj ogrevajo s pomočjo kondenzacijskega kotla.

Toplotne izgube zaradi prehoda toplote ter ventilacije in zračenja so 4,2 kWh/d/°C). *Specifične toplotne izgube* (koeficient toplotnih izgub na kvadratni meter površine) so 1,25 W/m²/°C (za primerjavo: podatek za mojo hišo je 2,7 W/°C/m²).



Slika E.10 Heatkeeper Serrekunda.



Slika E.11 Prenosnik toplote v hiši Heatkeeper.

Če v hiši živita dve osebi, je povprečna poraba toplote za ogrevanje, ob upoštevanju nastavitve termostata na 19 ali 20 °C čez dan, 8100 kWh na leto oz. 22 kWh/d. Skupna poraba energije za vse namene je približno 15.000 kWh na leto oz. 40 kWh/d. Povprečna moč na enoto površine je torej **6,6 W/m²**.

Slika E.12 prikazuje primerjavo porabe energije na enoto površine med hišo Heatkeeper, mojo hišo (pred energetske prenove in po njej) ter evropskim povprečjem. Zahvaljujoč nižjim temperaturnim nastavitvam termostata, je poraba moje hiše po izvedenih ukrepih za boljšo energijsko učinkovitost blizu porabi hiše Heatkeeper.

Primerjava hiš in pisarn

Po nemškem standardu za pasivne hiše, imenovanem Passivhaus, naj bi bila poraba energije za ogrevanje in hlajenje 15 kWh/m²/leto, kar je enako povprečni moči na enoto površine **1,7 W/m²**, skupna poraba električne energije pa naj bi bila 120 kWh/m²/leto, kar je enako povprečni moči na enoto površine **13,7 W/m²**.

Povprečna moč na enoto površine v storitvenem sektorju v Veliki Britaniji je 30 W/m².

Energijsko učinkovita pisarna

Državno energetske združenje (National Energy Foundation – NEF) je zgradilo nizkocenovno in nizkoenergijsko zgradbo. Za pripravo tople vode uporabljajo fotonapetostne module, ki proizvajajo električno energijo z močjo do 6,5 kW, stavbo pa ogrevajo s 14 kilovatno toplotno črpalko zemlja/voda in občasno s pečjo na drva. Skupna površina zgradbe je 400 m², običajno pa je v njej približno 30 oseb. Stavba je enonadstropna. Debelina kamene volne za izolacijo je 300 mm. Grelno število toplotne črpalke v zimskem času je 2,5. Na letni ravni porabijo 65 kWh energije na kvadratni meter površine (**7,4 W/m²**). Fotonapetostni sistem zagotavlja skoraj 20 % energije.

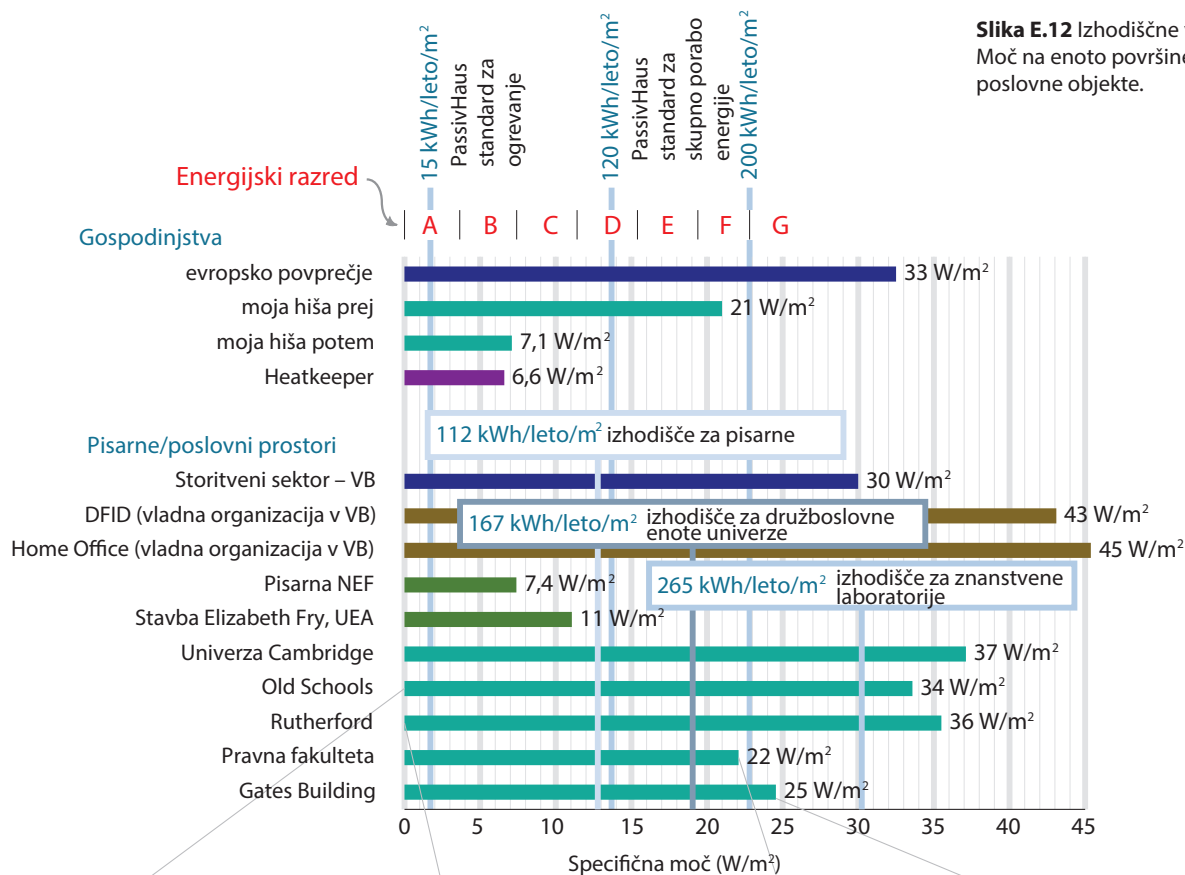
Sodobne pisarne

Pri novozgrajenih poslovnih objektih je pogosto ogromno pompa o tem, kako strašno okoljsko prijazni so. Pa si pogledajmo številke.

Zgradba William Gates v sklopu Univerze v Cambridgeu je namenjena raziskovalcem na področju računalništva, administratorjem in majhni kavarni. Njena skupna površina je 11.110 m², letna poraba energije pa 2392 MWh. To pomeni, da je moč na enoto površine 215 kWh/m²/leto oz. **25 W/m²**. Leta 2001 je zgradba prejela nagrado RIBA za uspešno napoved porabe energije. »Arhitekti so v stavbo vključili mnoge okolju prijazne rešitve.« [5dhups]

Toda ali so te zgradbe impresivne? Njena sosedka, stavba Rutherford, ki je bila zgrajena v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja brez nekih

imenitnih eko parol - celo samo z enojno zastekljenimi okni - ima 4998 m² skupnih površin, njena letna poraba pa je 1557 MWh/leto, kar je enako 0,85 kWh/d/m² oz. **36 W/m²**. To pomeni, da je moč na enoto površine naše nagrajene stavbe le za 30 % boljša kot pri njeni sorodnici iz sedemdesetih let. Na sliki E.12 lahko vidimo primerjavo teh dveh zgradb in še ene nove gradnje, pravne fakultete, s staro administrativno stavbo Univerze v Cambridgeu, imenovano Old Schools, ki je bila zgrajena pred letom 1890. Kljub vsemu pompu je razlika med novimi in starimi stavbami precejšnje razočaranje!



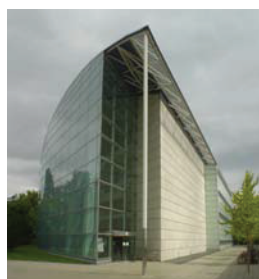
Slika E.12 Izhodiščne vrednosti za zgradbe. Moč na enoto površine za različne hiše in poslovne objekte.



Old Schools



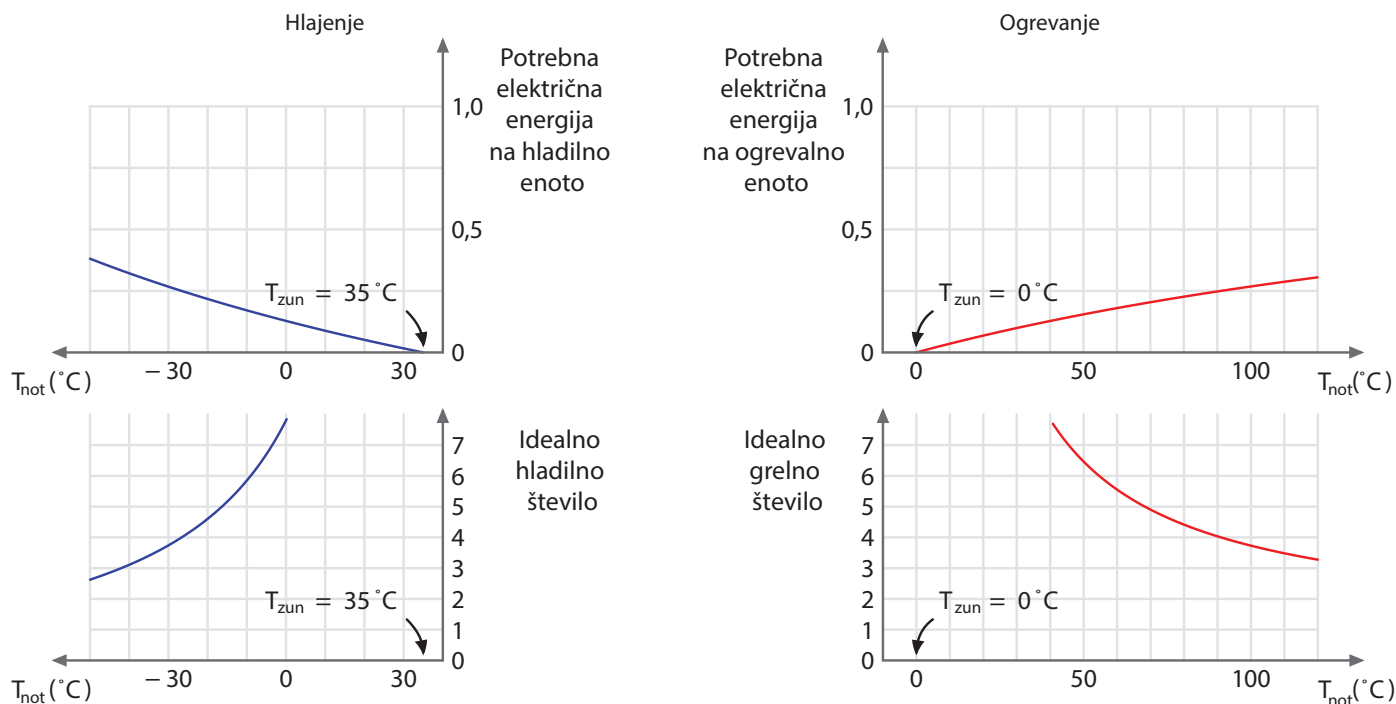
Zgradba Rutherford



Pravna fakulteta



Cambridge Gates Building



Kot lahko vidite, smo moč na enoto površine pri zgradbah izrazili v enakih merskih enotah (W/m^2) kot moč obnovljivih virov energije na straneh 43, 47 in 177. Primerjava podatkov o porabi in proizvodnji nam pomaga razumeti, kako težko je pokrivati porabo moderne stavbe zgolj z obnovljivimi energijami v stavbi oz. na njej. Moč na enoto površine pri biogorivih (slika 6.11 na strani 43) je $0,5 \text{ W/m}^2$, pri vetrnih elektrarnah 2 W/m^2 , pri solarnih fotonapetostnih sistemih pa 20 W/m^2 (slika 6.18 na strani 47). Sprejemniki sončne energije (SSE) za vročo vodo imajo edini ustrezno moč na enoto površine, saj ta znaša 53 W/m^2 (slika 6.3 na strani 39).

Kako izboljšati učinkovitost

Mogoče se vam zdi, da je učinkovitost kondenzacijskega kotla, ki je 90 %, bolj ali manj nepremagljiv. Vseeno pa ga lahko bistveno izboljšamo s pomočjo toplotnih črpalk. Kondenzacijski kotel izkorišča kemično energijo goriva in kar 90 % te energije pretvori v uporabno toploto, črpalka pa porablja električno energijo za *prenašanje* toplote z enega mesta na drugega (na primer iz okolice stavbe v stavbo). Običajno je količina koristne toplote, ki jo dobimo s pomočjo toplotne črpalke, veliko večja od količine porabljene elektrike. Grelno število je običajno enako 3 ali 4.

Teorija toplotnih črpalk

V nadaljevanju navajam enačbe za izračun optimalnega grelnega števila toplotne črpalke, tj. količine prenesene toplote na enoto potrebne električne

Slika E.13. Optimalna učinkovitost toplotne črpalke. Levo zgoraj: optimalna količina električne energije glede na termodinamične omejitve, ki je potrebna za črpanje toplote iz prostora s temperaturo T_{not} v prostor s temperaturo $T_{\text{zun}} = 35^{\circ}\text{C}$. Desno: optimalna količina električne energije, ki je potrebna za črpanje toplote v prostor s temperaturo T_{not} iz prostora s temperaturo $T_{\text{zun}} = 0^{\circ}\text{C}$. Spodnja vrstica: učinkovitost običajno izrazimo s »koeficientom učinkovitosti ($\text{COP} = \text{Coefficient of Performance}$)«, ki je razmerje med količino vsesane/izsesane toplote na enoto vložene električne energije, kar imenujemo tudi grelno/hladilno število. Kolikor vem, je v praksi koeficient učinkovitosti ustrezno vgrajenih toplotnih črpalk zemlja/voda ter najboljših zračnih toplotnih črpalk običajno 3 ali 4, vendar pa so vladni predpisi na Japonskem koeficient učinkovitosti pripeljali celo do 6,6.

energije. Če toploto črpamo iz okolice s temperaturo T_1 v prostor z višjo temperaturo T_2 , pri čemer sta obe temperaturi izraženi glede na absolutno ničlo (to pomeni, da je T_2 v stopinjah Kelvina, kar izračunamo kot $273,15 + T_{\text{not}}$, kjer je temperatura T_{not} izražena v stopinjah Celzija), potem je optimalno grelno število:

$$\text{učinkovitost} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}.$$

Če črpamo toploto iz prostora s temperaturo T_2 v toplejšo okolico s temperaturo T_1 , je optimalno hladilno število:

$$\text{učinkovitost} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Te teoretične omejitve lahko dosežejo le sistemi, ki črpajo toploto skrajno počasno. Vidimo lahko, da sta tako grelni kot hladilni števili tem večja, bolj kot sta si temperatura prostora T_2 in zunanja temperatura T_1 bližje.

Teoretično so toplotne črpalke zemlja/voda morda učinkovitejše od zračnih toplotnih črpalk prav zato, ker je temperatura tal običajno bližje temperaturi zraka znotraj stavb kot temperatura zraka v okolici. V praksi pa so zračne črpalke verjetno najboljše in najbolj enostavna izbira. Učinkovitost toplotnih črpalk zemlja/voda v mestih je vedno bolj pod vprašajem, saj se zaradi pogostejše uporabe takih črpalk v zimskem času ohlajajo tudi tla. Tako termalno smetenje pa lahko predstavlja problem tudi poleti, in sicer v mestih, kjer preveč stavb uporablja črpalke tipa zemlja/voda za klimatizacijo.

Ogrevanje in tla

Naredimo zanimiv izračun. Predstavljajte si, da imate na strehi svojega doma SSE za ogrevanje in da črpate vodo skozi ogromno skalo pod vašo hišo, kadarkoli temperatura vode v SSE naraste nad 50°C . Ko pridejo turbozni, sivi in hladni dnevi, bi lahko toploto skale uporabili za ogrevanje vašega doma. Kako velika bi morala biti skala s temperaturo 50°C , da bi z njeno energijo lahko cel mesec ogrevali hišo? Recimo, da si za cilj postavimo 24 kWh na dan v obdobju 30 dni pri temperaturi hiše 16°C . Specifična toplota granita je $0,195 \times 4200\text{ J/kg/K} = 820\text{ J/kg/K}$. Skupna masa naše skale granita bi torej morala biti:

$$\begin{aligned} \text{masa} &= \frac{\text{energija}}{\text{specifična toplota} \times \text{temperaturna razlika}} \\ &= \frac{24 \times 30 \times 3,6\text{ MJ}}{(820\text{ J/kg/}^\circ\text{C})(50^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C})} \\ &= 100000\text{ kg} \end{aligned}$$

To je 100 ton, kar ustreza kamnitemu kvadru z dimenzijami $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 1\text{ m}$.

Specifična toplota:	$C = 820\text{ J/kg/K}$
Toplotna prevodnost:	$k = 2,1\text{ W/m/K}$
Gostota:	$\rho = 2750\text{ kg/m}^3$
Specifična toplota na enoto prostornine:	$C_v = 2,3\text{ MJ/m}^3/\text{K}$

Tabela E.14 Ključni podatki za granit. (Granit sem uporabil kot tipično kamninsko podlago.)

Podtalni hranilnik brez sten

Tako, ugotovili smo, kako velik naj bi bil podzemni hranilnik toplote. Toda ali je težko zadržati toploto v takem hranilniku? Ali bi morali oviti naš kvader z veliko izolacije? V resnici so sama tla precej dober izolator. Višek toplote, ki ga potisnemo v luknjo v tleh, se bo širil kot

$$\frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(\kappa/(C\rho))t}\right)$$

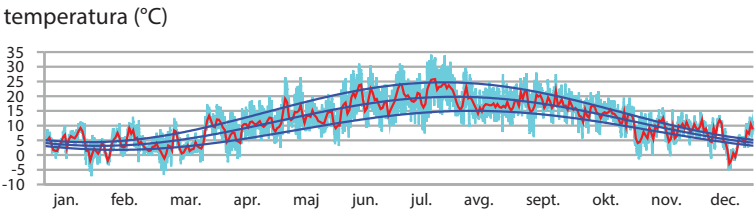
kjer je κ toplotna prevodnost tal, C njihova specifična toplota, ρ pa gostota. To opiše zvončasto krivuljo širine

$$\sqrt{2\frac{\kappa}{C\rho}t};$$

Na primer, po šestih mesecih ($t = 1,6 \times 10^7$ s) bi bila širina, če uporabimo podatke za granit ($C = 0,82$ kJ/kg/K, $\rho = 2500$ kg/m³, $\kappa = 2,1$ W/m/K), 6 m. Če uporabimo podatke za vodo ($C = 4,2$ kJ/kg/K, $\rho = 1000$ kg/m³, $\kappa = 0,6$ W/m/K), je širina 2 m. Se pravi, če je območje za hrambo toplote večje od 20 m × 20 m × 20 m, potem bo večina toplote, ki smo jo shranili, po šestih mesecih še vedno tam (ker je 20 m znatno večje od 6 m in 2 m).

Omejitve toplotnih črpalk zemlja/voda

Nizka toplotna prevodnost tal je dvorezen meč. Zahvaljujoč nizki prevodnosti, lahko tla dolgo zadržujejo toploto. Po drugi strani pa nizka prevodnost pomeni, da toplote ne moremo na preprost način stlačiti v zemljo in jo po hitrem postopku dobiti nazaj, kadar jo potrebujemo. V nadaljevanju si bomo pogledali, kako toplotna prevodnost tal omejuje uporabo toplotnih črpalk zemlja/voda. Zamislite si precej gosto poseljeno sošesko. Ali lahko *vsako* gospodinjstvo uporablja toplotne črpalke zemlja/voda, ne da bi morali nato v poletnem času obnoviti zaloge toplote (o čemer sem govoril na strani 152)? Namreč, če bi vsi istočasno črpali toploto iz tal, bi ta lahko zmrznila. Sam bom poskusil najti odgovor na to vprašanje s pomočjo dveh izračunov. Najprej bom izračunal, kolikšen je naravni energijski tok oz. fluks v tla in iz tal v poletnem in zimskem času.



(W/m/K)	
voda	0,6
kremen	8
granit	2,1
Zemljina skorja	1,7
suha zemlja	0,14

Tabela E.15 Toplotna prevodnost. Več podatkov najdete v tabeli E.18 na strani 304.

Slika E.16 Temperatura v Cambridgeu leta 2006 in skica, ki kaže, da je temperatura vsota letne sinusoidne variacije med 3 °C in 20 °C ter dnevne sinusoidne variacije do 10,3 °C. Povprečna temperatura je 11,5 °C.

Če je v zimskem času količina toplote, ki jo želimo črpati iz tal, veliko večja kot pri naravnem toplotnem toku, potem je jasno, da bo naše početje znatno vplivalo na temperaturo tal in zatorej morda ne bo izvedljivo. Pri mojem izračunu bom upošteval, da temperatura tal tik pod površjem med letom rahlo niha zaradi skupnega vpliva sonca, zraka, oblakov in noči (slika E.16).

Vpliv nihanja zunanje temperature

Da bi lahko izračunali, kako toplotne črpalke vplivajo na temperaturo tal ter kolikšni so toplotni tokovi v tla in iz njih, potrebujemo nekoliko bolj napredno znanje matematike, zato sem izračun prikazal v okviru E.19 na koncu tega poglavja (stran 306).

Na podlagi tega izračuna dobimo dokaj lep diagram (slika E.17), ki prikazuje, kako se temperatura na določenih globinah spreminja s časom. Ta grafični prikaz ponuja odgovor za kakršenkoli material z vidika *značilne dolžine* z_0 (enačba (E.7)), ki je odvisna od toplotne prevodnosti κ in specifične toplote C_V materiala in od števila (pogostosti) ω sprememb zunanje temperature. (Ista teorija velja tako za dnevna kot letna nihanja temperature.) Na globini $2z_0$ so nihanja temperature sedemkrat manjša kot nihanja na površju, poleg tega pa zaostajajo za prvimi za približno tretjino cikla (slika E.17). Na globini $3z_0$ so nihanja dvajsetkrat manjša kot na površju, zaostajajo pa za pol cikla.

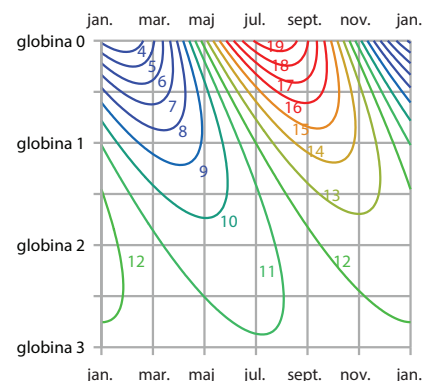
Na primeru dnevnih nihanj pri masivnem granitu je značilna dolžina $z_0 = 0,16$ m. (Torej potrebujemo granitno skalo debeline 32 cm, da lahko izničimo dnevna nihanja zunanje temperature.) Za letna nihanja temperature in masivni granit je značilna dolžina $z_0 = 3$ m.

Poglejmo si zdaj letna nihanja pri nekaterih drugih materialih. Značilne dolžine za različne podlage so prikazane v tabeli E.18. Značilna dolžina z_0 za vlažna peščena tla ali beton je podobna kot pri granitu – približno 2,6 m. Pri suhih ali šotnih tleh je značilna dolžina z_0 krajša – približno 1,3 m. To je po eni strani dobra novica, saj pomeni, da ni treba kopati zelo globoko, da bi prišli do tal s stabilno temperaturo. Vendar pa ima to tudi slabo stran: toplotni tok je manjši v suhih tleh.

Toplotni tok se med letom spreminja in doseže največjo vrednost oz. konični toplotni tok (enačba (E.9)), ki je tem manjši, čim manjša je toplotna prevodnost.

Konični toplotni tok pri masivnem granitu je 8 W/m^2 . Pri suhih tipih tal se konični toplotni tok giblje med $0,7 \text{ W/m}^2$ in $2,3 \text{ W/m}^2$, pri vlažnih tleh pa med 3 W/m^2 in 8 W/m^2 .

Kaj to pomeni? Predlagam, da za toplotni tok vzamemo neko srednjo vrednost, recimo 5 W/m^2 , ki nam bo služila za primerjavo ter vodilo pri tem, kolikšno moč na enoto površine lahko pričakujemo od toplotne črpalke zemlja/voda. Če je toplotni tok zaradi uporabe toplotne črpalke bistveno manjši od 5 W/m^2 , potem to ne bo predstavljalo večje motnje



Slika E.17 Temperatura (v °C) v odvisnosti od globine in časa. Globine so navedene v enotah značilne dolžine z_0 , ki je za granit in letna nihanja temperatur 3 m.

Na »globini 2« (6 m) je temperatura vedno približno 11 ali 12 °C. Na »globini 1« (3 m) pa niha med 8 in 15 °C.

naravnega toplotnega toka. Če pa je toplotni tok zaradi črpanja toplote iz tal večji od 5 W/m², lahko pričakujemo, da bo to resno vplivalo na normalno temperaturo zemlje, zato si tega ne moremo privoščiti.

Gostota poseljenosti v tipičnem angleškem predmestju je 160 m² površine na prebivalca (vrste dvojčkov, pri čemer posamezni hiši pripada približno 400 m² površine vključno s pripadajočim pločnikom in ulico). Pri takšni gostoti poseljenosti bi bila okvirna omejitev odjema posamezne toplotne črpalke

$5 \text{ W/m}^2 \times 160 \text{ m}^2 = 800 \text{ W} = 19 \text{ kWh/d na osebo.}$

To je neugodno blizu rangu moči, ki bi jo radi zagotovili v zimskem času. Čisto verjetno je, da je v zimskem času vršna potreba po vročem zraku in vodi v hiši, kot je moja, nekje 40 kWh/d na osebo.

Na podlagi tega izračuna lahko torej sklepamo, da *toplotnih črpalk* zemlja/voda *ne morejo uporabljati vsa gospodinjstva* v tipičnem predmestju, razen če v poletnem času pridno vračajo toploto nazaj v tla.

Tabela E.18 Toplotna prevodnost in specifična toplota različnih materialov in tipov tal (zemlje) ter iz tega izpeljana značilna dolžina $z_0 = \sqrt{2\kappa/(c_v\omega)}$ ter konični fluks $A\sqrt{c_v\kappa\omega}$ glede na letna nihanja temperatur z amplitudo $A = 8,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Poroznost peščenih in ilovnatih tal je 0,4, poroznost šotnih tal pa je 0,8.

	toplotna prevodnost κ (W/m/K)	specifična toplota c_v (MJ/m³/K)	značilna dolžina z_0 (m)	fluks $A\sqrt{c_v\kappa\omega}$ (W/m²)
Zrak	0,02	0,0012		
Voda	0,57	4,18	1,2	5,7
Masivni granit	2,1	2,3	3,0	8,1
Beton	1,28	1,94	2,6	5,8
<i>Peščena tla</i>				
suha	0,30	1,28	1,5	2,3
50-% nasičena	1,80	2,12	2,9	7,2
100-% nasičena	2,20	2,96	2,7	9,5
<i>Ilovnata tla</i>				
suha	0,25	1,42	1,3	2,2
50-% nasičena	1,18	2,25	2,3	6,0
100-% nasičena	1,58	3,10	2,3	8,2
<i>Šotna tla</i>				
suha	0,06	0,58	1,0	0,7
50-% nasičena	0,29	2,31	1,1	3,0
100-% nasičena	0,50	4,02	1,1	5,3

Naredimo še en izračun in pogledjmo, koliko toplote lahko dobimo iz tal pri enakomernem črpanju iz cevne zanke na globini $h = 2$ m. Recimo, da si bomo ob predpostavki, da je temperatura tal na površini konstantna, dovolili odjem toplote iz cevne zanke do temperaturne razlike med temperaturo na globini odjema ter povprečno temperaturo tal na površini $\Delta T = 5$ °C. Nato lahko izpeljemo toplotni tok s površine. Če vzamemo, da je toplotna prevodnost tal $1,2$ W/m/K (tipična vrednost za vlažna ilovnata tla), dobimo

$$F_{\text{fluks}} = \kappa \times \frac{\Delta T}{h} = 3 \text{ W/m}^2.$$

Če kot prej predpostavimo, da je gostota poseljenosti enaka 160 m^2 na osebo, potem je maksimalna moč, ki jo lahko zagotavljajo toplotne črpalke zemlja/voda - pod pogojem, da jih uporablja cela soseska -, 480 W na osebo, kar je enako 12 kWh/d na osebo.

Spet pridemo torej do zaključka, da *toplotnih črpalk zemlja/voda ne morejo uporabljati vsa gospodinjstva* v tipičnem predmestju, v katerem prevladujejo slabo izolirane hiše, kot je moja, razen pod pogojem, da v poletnem času intenzivno vračajo toploto nazaj v tla. V mestih, kjer je gostota poseljenosti še večja, pa je malo verjetno, da bi bile toplotne črpalke zemlja/voda rešitev, ki bi se obnesla.

Iz tega razloga trdim, da so zračne toplotne črpalke najboljša rešitev za ogrevanje za večino ljudi.

Termična masa

Ali s povečanjem termične mase stavbe res lahko zmanjšamo račune za ogrevanje in hlajenje? Odvisno. Dnevno nihanje zunanje temperature je približno 10 °C. Stavba z veliko termično maso - npr. z debelimi kamniti zidovi - bo sama po sebi izničila temperaturna nihanja in bo brez dodatnega ogrevanja ali hlajenja vzdrževala temperaturo prostora blizu temperature okolice. Take stavbe v Veliki Britaniji ne potrebujejo ne ogrevanja ne hlajenja več mesecev na leto. Po drugi strani pa so prostori v slabo izoliranih stavbah z majhno termično maso velikokrat prevroči čez dan in prehladni ponoči, kar pomeni višje stroške za ogrevanje in hlajenje.

Vseeno pa velika termična masa ni vedno prednost. Če neki prostor pozimi uporabljamo le nekaj ur na dan (zamislimo si na primer predavalnico), bodo stroški za ogrevanje tega prostora na prijetno temperaturo tem večji, čim večja je termična masa. Ogrevan zrak bo v sobi z veliko termično maso sicer ostal dlje časa, vendar če ni v prostoru nikogar, ki bi imel koristi od tega zraka, gre toplota v nič. Pri prostorih, ki se ne uporabljajo redno in pogosto, je torej bolje, da se odločimo za konstrukcijo z manjšo termično maso, ki jo lahko po potrebi hitro ogrejemo.

Opombe in dodatno branje

stran

304 *Tabela E.18.* Viri: Bonan (2002),

www.hukseflux.com/thermalScience/thermalConductivity.html

Če predpostavimo, da so tla trdna homogena podlaga s toplotno prevodnostjo κ in specifično toploto C_V , potem se temperatura na globini z pod površjem v času t spreminja glede na vsiljeno temperaturo na površju v skladu z difuzijsko enačbo

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C_V} \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}. \quad (\text{E.4})$$

Za sinusoidno vsiljeno temperaturo s frekvenco ω in amplitudo A pri globini $z = 0$,

$$T(0, t) = T_{\text{površje}}(t) = T_{\text{povprečna}} + A \cos(\omega t), \quad (\text{E.5})$$

je temperatura pri globini z in času t eksponentno padajoča in periodična funkcija

$$T(z, t) = T_{\text{povprečna}}(t) + A e^{-z/z_0} \cos(\omega t - z/z_0), \quad (\text{E.6})$$

pri čemer je z_0 značilna dolžina tako eksponentno padajoče in periodične funkcije:

$$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V \omega}}. \quad (\text{E.7})$$

Toplotni tok (moč na enoto površine) na globini z je

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} e^{-z/z_0} \sin(\omega t - z/z_0 - \pi/4). \quad (\text{E.8})$$

Za primerjavo, na površini je konični toplotni tok

$$\kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} = A \sqrt{C_V \kappa \omega}. \quad (\text{E.9})$$

Okvir E.19 Izračun naravnega toplotnega toka kot posledica sinusoidnega nihanja temperature.

F Energija valov II

Fizika valov v globokih vodah

Valovi imajo dve vrsti energije: potencialno in kinetično energijo. Potencialna energija je tista, ki je potrebna za dvig vode od dna vala pa do njegovega vrha, kinetično energijo pa ima voda zaradi gibanja.

Ljudje včasih mislijo, da če se vrh vala premika po morju s hitrostjo 45 km/h, potem se tudi voda v tem vrhu premika z enako hitrostjo in v isti smeri. Vendar ni tako. Gre za enak princip kot pri navijaški figuri, ki ji rečemo mehiški val. Ko gre val rok okrog in okrog stadiona, se gledalci nič ne premikajo v smeri vala, ampak se le malce dvignejo na noge in spet sedejo. Gibanje količine vode v oceanskem valu poteka na podoben način. Če bi opazovali plavajoči kos morske trave, ko pride val, bi videli, da se trava dvigne z valom in nato spet spusti, ob tem pa se premakne še malce naprej in nazaj. Enak učinek bi dosegli z mehiškim valom, če bi ljudje izvajali take gibe, kot jih izvaja čistilec oken, kadar s krožnimi gibi briše veliko stekleno površino. Val ima potencialno energijo zaradi dviga vode z dna vala (doline) na vrh vala, kinetično energijo pa ima zaradi majhnega krožnega gibanja vode.

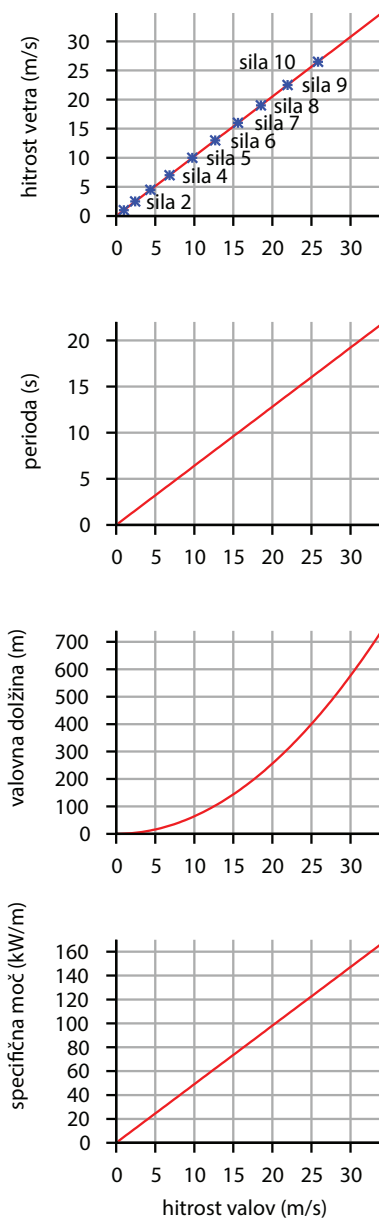
Za grob izračun energije morskih valov potrebujemo tri stvari: oceno valovne periode T (čas med dvema vrhovoma), oceno višine vala h ter fizikalno enačbo, ki nam pove, kako izračunati hitrost vala v iz njegove valovne periode.

Valovna dolžina λ in valovna perioda T (razdalja in čas med dvema sosednjima vrhovoma) sta odvisni od hitrosti vetra, ki ustvarja valove, kot je to prikazano na sliki F. 1. Višina valov ni odvisna od hitrosti vetra, temveč od tega, kako dolgo veter boža vodno gladino.

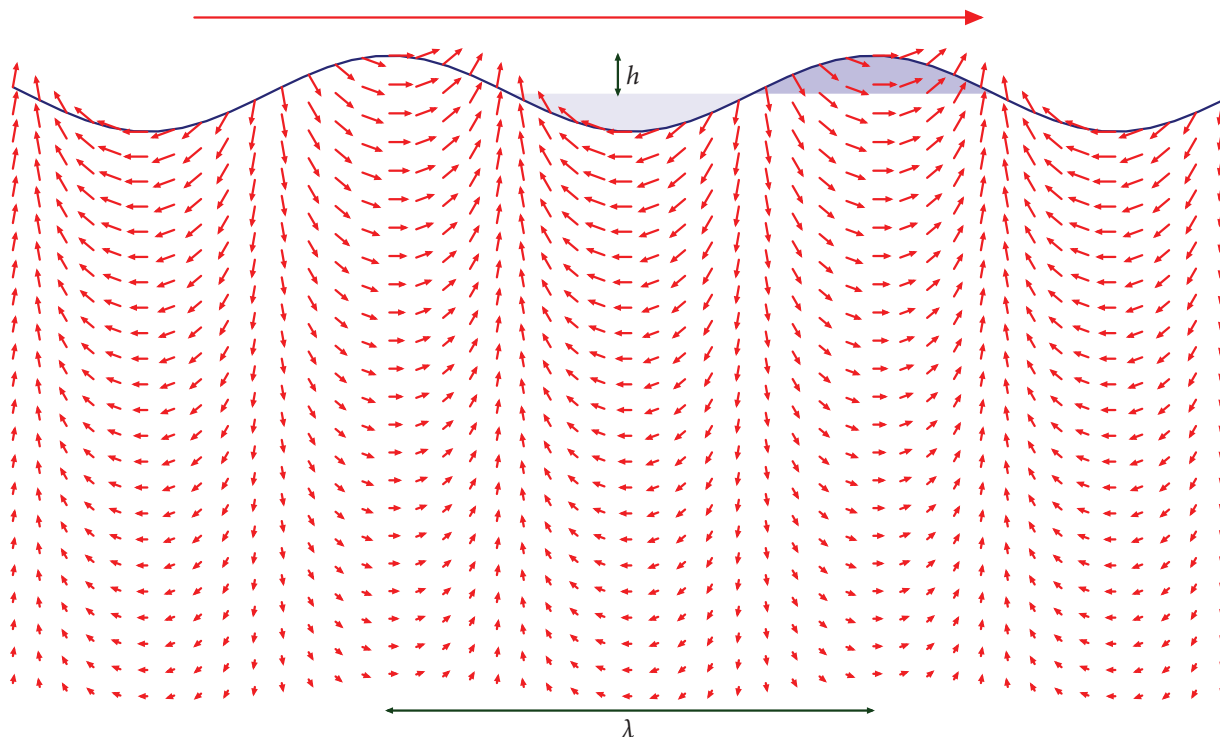
Valovno periodo pri morskih valovih lahko ocenimo tako, da se spomnimo, koliko časa mine med dvema valoma, ko prispeta na obalo. Je 10 sekund smiselna ocena? Glede višine morskih valov vzemimo amplitudo 1 m, kar pomeni da je razdalja od doline do vrha vala 2 m. Pri tako visokih valovih človek v majhnem čolnu v dolini vala ne bo videl čez vrh sosednjega vala. Mislim, da je naša ocena večja od povprečja, vendar jo lahko pozneje še vedno pretehtamo, če bi se to izkazalo za pomembno. Hitrost valov na odprtem morju in valovno periodo oz. čas med dvema vrhovoma povezuje naslednja fizikalna enačba (Glejte Faber (1995), str. 170):

$$v = \frac{gT}{2\pi},$$

pri čemer je g gravitacijski pospešek ($9,8 \text{ m/s}^2$). Na primer, če je $T = 10$ sekund, potem je hitrost $v = 16 \text{ m/s}$. Valovna dolžina, tj. razdalja med sosednjima vrhovoma, je v našem primeru $\lambda = vT = gT^2/2\pi = 160 \text{ m}$.



Slika F.1 Podatki o valovih na globokem morju. Na vseh štirih grafi vodoravna os predstavlja hitrost valov v m/s. Od vrha navzdol grafi prikazujejo naslednje podatke: hitrost vetra (v m/s), ki je potrebna za dano hitrost valov, valovno periodo (v sekundah), valovno dolžino (v m) ter specifično moč (v kW/m) vala z amplitudo 1 m.



Pri valu z valovno dolžino λ in periodo T je potencialna energija na enoto časa in enoto dolžine ob predpostavki, da je višina vsakega vrha in globina vsake doline $h = 1$ m,

$$P_{\text{potencialna}} \simeq m^* g \bar{h} / T, \quad (\text{F.1})$$

pri čemer je m^* masa na enoto dolžine, ki je približno $\frac{1}{2} \rho h (\lambda/2)$ (če vzamemo, da je osenčena površina grebena vala na sliki F.2 približno enaka površini trikotnika), $\bar{h}$ pa je sprememba višine masnega središča gmote vode v valu, ki je približno enaka h . Tako dobimo

$$P_{\text{potencialna}} \simeq \frac{1}{2} \rho h \frac{\lambda}{2} g h / T. \quad (\text{F.2})$$

(Da bi pravilno izračunali potencialno energijo, bi morali uporabiti integral, dobili pa bi enak rezultat.) V naši enačbi je λ/T enostavno hitrost v , s katero potuje val. Iz tega sledi

$$P_{\text{potencialna}} \simeq \frac{1}{4} \rho g h^2 v. \quad (\text{F.3})$$

Valovi imajo kinetično in potencialno energijo in obe sta, presenetljivo, po velikosti enaki, čeprav tega izračuna nisem prikazal na tem mestu. Se pravi, da je skupna moč valov enaka dvakratniku moči, ki sem jo izračunal iz potencialne energije.

Slika F.2 Val ima dve vrsti energije: potencialno energijo zaradi dvigovanja vode iz svetlo osenčenih dolin v temno osenčene vrhove valov ter kinetično energijo vse vode znotraj nekaj valovnih dolžin na površini morja. Hitrost vode prikazujejo male puščice. Hitrost vala, ki potuje z leve proti desni, pa označuje večja puščica na vrhu.

$$P_{\text{skupna}} \simeq \frac{1}{2} \rho g h^2 v. \quad (\text{F.4})$$

Ta rezultat ima eno samo napako: prevelik je, ker smo zanemarili nenavadno lastnost disperzijskega valovanja, namreč: energija v valu se v resnici ne širi z enako hitrostjo kot vrh vala, temveč s hitrostjo, ki jo imenujemo skupinska hitrost. Pri valovih na odprtem morju znaša ta *polovico* hitrosti v . Da se energija širi počasneje kot greben vala, lahko preverimo tako, da vržemo prodnik v jezero in opazujemo, kako se širijo valovi. To pomeni, da je enačba (F.4) napačna: moramo jo prepoloviti. Pravilni izračun moči čela vala na enoto dolžine je

$$P_{\text{skupna}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v. \quad (\text{F.5})$$

Če vnesemo podatke $v = 16$ m/s in $h = 1$ m, dobimo

$$P_{\text{skupna}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v = 40 \text{ kW/m}. \quad (\text{F.6})$$

Ta groba ocena sovпада z dejanskimi meritvami v Atlantskem oceanu (Mollison, 1986). (Glejte stran 75.)

Izgube zaradi viskoznosti so minimalne: val s periodo 9 sekund bi moral trikrat obkrožiti svet, da bi izgubil 10 % svoje amplitude.

Resnični sistemi za izkoriščanje energije valov

Naprave v globokih vodah

Kako učinkoviti so v resnici sistemi za izkoriščanje energije valov? »Salterjeva raca«, ki jo je razvil Stephen Salter, je dobro opisana z naslednjimi besedami: vrsta rac s premerom 16 m, ki se zažirajo v atlantske valove s povprečno močjo na dolžino obale 45 kW/m, lahko zagotavlja 19 kW/m, vključno s prenosom do osrednje Škotske (Mollison, 1986).

Naprava Pelamis, ki jo je razvilo podjetje Ocean Power Delivery, je Salterjevi raci prevzela krono vodilne plavajoče naprave za izkoriščanje energije valov v globoki vodi. Vsaka kači podobna veriga je dolga 130 metrov in sestavljena iz štirih segmentov premera 3,5 metra. Maksimalno lahko zagotavlja 750 kW električne moči. Naprave Pelamis so zasnovane tako, da so pritrjene s sidrom na globini približno 50 m. Valovno elektrarno sestavlja 39 naprav, ki so razporejene v treh vrstah in obrnjene proti glavni valov. Območje, ki ga zavzemajo, je približno 400 metrov dolgo in 2,5 kilometra široko (skupna površina 1 km²). Efektivni presek vsake naprave Pelamis je 7 m (tj. pri ugodnih valovih izkoristi 100 % energije prek teh 7 m). Po podatkih podjetja, ki je napravo razvilo, naj bi taka elektrarna zagotavljala približno 10 kW moči na meter.

Naprave v plitvinah

Običajno se 70 % energije morskih valov izgubi zaradi trenja z morskim dnom, ko gremo z globine 100 m proti globini 15 m. Povprečna specifična moč valov na dolžino obale v plitvinah je tako zgolj 12 kW/m. Naprava Oyster (slo. Ostriga), ki sta jo razvili univerza Queen's University Belfast in podjetje Aquamarine Power Ltd [www.aquamarinepower.com], je približno 12 metrov visoko krilo, ki se ga namesti v vodo globine približno 12 m, in sicer na tistih območjih, kjer povprečna začetna specifična moč valov presega 15 kW/m. Konična moč naprave je 600 kW. Posamezna enota lahko pri valovih nad 3,5 metra višine zagotavlja približno 270 kW električne moči. Po nekaterih napovedih naj bi bila moč na enoto mase pri napravi Oyster večja kot pri predhodnici Pelamis.

Enote Oyster bi se lahko uporabljale tudi za neposreden pogon obratov za razsoljevanje morske vode s procesom reverzne osmoze. »Maksimalna proizvodnja sladke vode pri posamezni razsoljevalni enoti Oyster je med 2000 in 6000 m³/dan.« Tak izkupiček je glede na obrat v Jerseyu (ki porablja 8 kWh na m³) ekvivalenten 600–2000 kW električne moči.

G Energija plimovanja II

Moč plimskih bazenov

Da bi ocenili moč umetnega plimskega bazena, si predstavljajmo, da se pri plimi bazen zelo hitro napolni, pri oseki pa zelo hitro izprazni. Električna energija se proizvaja v obe smeri, tako ob oseki kot ob plimi. (To imenujemo dvosmerni način oziroma proizvodnja z dvojnim učinkom.) Spremembo potencialne energije vode vsakih šest ur izračunamo kot mgh , pri čemer je h sprememba višine središča vodne mase, ki znaša polovico bibavične amplitude. (Bibavična amplituda ali razpon je skrajna razlika med plimo in oseko; slika G.1) Masa na enoto površine plimskega bazena znaša $\rho \times (2h)$, kjer je ρ gostota vode (1000 kg/m^3). Tako je moč na enoto površine plimskega bazena

$$\frac{2\rho hgh}{6 \text{ ur}},$$

ob upoštevanju maksimalnega izkoristka generatorja. Če vstavimo v enačbo podatek za višino $h = 2 \text{ m}$ (tj. celoten razpon je 4 m), dobimo moč na enoto površine plimskega bazena $3,6 \text{ W/m}^2$. Če upoštevamo, da je izkoristek pri pretvorbi v električno energijo 90-odstoten, dobimo naslednji rezultat

moč na enoto površine plimskega bazena $\cong 3 \text{ W/m}^2$.

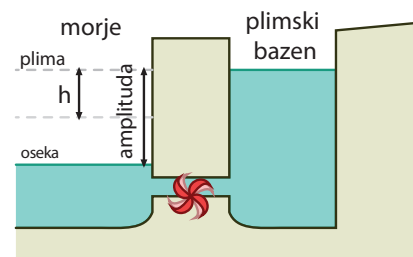
Da bi torej zagotovili 1 GW moči (v povprečju), bi potrebovali plimski bazen velikosti približno 300 km^2 . Zadostoval bi okrogel bazen s premerom 20 km . (Za primerjavo: ustje reke Severn za predlaganim jezm meri približno 550 km^2 , površina zaliva Wash pa čez 400 km^2 .)

Če plimski bazen proizvaja električno energijo le v eni smeri, se njegova moč na enoto površine prepolovi. Povprečna specifična moč v plimski zaježitvi La Rance, kjer je povprečna razlika med plimo in oseko $10,9 \text{ m}$, je že desetletja $2,7 \text{ W/m}^2$ (str. 87).

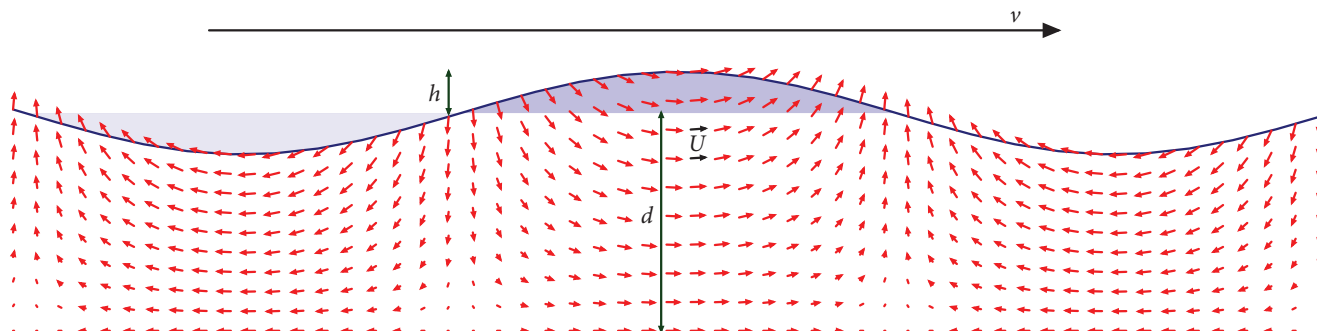
Surova moč plimovanja

Pri plimovanju ob britanski obali gre za prave plimske valove. (Cunamiji, ki se jih tudi imenuje »plimski valovi«, nimajo nikakršne veze s plimovanjem, saj jih povzročajo podvodni zdrsi in potresi.) Hitrost visoke plime (vrha plimskega vala) je večja kot hitrost plimskega toka – recimo 100 milj na uro, medtem, ko je hitrost vode le 1 milja na uro (100 milj na uro je približno 161 km/h , 1 milja na uro pa približno $1,61 \text{ km/h}$ (op.prev.)).

Dejstvo je, da količina energije, ki jo lahko pridobimo z izkoriščanjem plimovanja s pomočjo plimskih bazenov ali plimskih elektrarn, ne more biti večja kot energija atlantskih plimskih valov. Skupno moč mogočnih



Slika G.1 Prečni prerez plimskega bazena. Bazn se je pri plimi napolnil, zdaj je oseka. Vodo spustimo prek turbine in posledično generatorja električne energije, ki potencialno energijo vode pretvarja v električno energijo.



plimskih valov Atlantika lahko ocenimo na enak način kot moč običajnih valov, ki jih povzročajo vetrovi. V nadaljevanju je opisan standardni model za moč potujočih valov v vodi z globino d , ki je majhna v primerjavi z valovno dolžino (slika G.2).

Specifična moč vrha vala na enoto dolžine pri plimskem valovanju v plitvih vodah je

$$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2. \quad (\text{G.1})$$

V tabeli G.3 so prikazane vrednosti za moč valov na enoto dolžine obale za nekatere realne podatke. Če predpostavimo, da je globina d enaka 100 m, višina h pa 1 oziroma 2 m, potem je moč vrha vala na enoto dolžine enaka 150 kW/m oziroma 600 kW/m. Te številke so impresivne v primerjavi s surovo močjo na enoto dolžine pri običajnih valovih v globinah Atlantika, ki znaša 40 kW/m (Poglavje F). Vertikalni amplitudi valov in plimovanja na Atlantiku sta podobni (približno 1 m), vendar je surova moč pri plimovanju približno desetkrat večja kot pri valovih, ki jih povzroča veter.

Taylor (1920) je prišel do bolj izdelanega modela moči plimovanja, pri katerem je upošteval dejavnike, kot so Coriolisov pojav (ki je posledica vrtenja Zemlje okoli svoje osi), obstoj v nasprotno smer potujočih plimskih valov ter neposredni vpliv Lune na energijski tok v Irskem morju. Od takrat so eksperimentalne meritve in računalniški modeli potrdili in nadalje razvili Taylorjevo analizo. Flather (1976) je izdelal natančen numerični model lunarnega plimovanja, tako da je razdelil kontinentalno polico v britanskem otočju na približno 1000 kvadratnih celic. Ocenil je, da je skupna povprečna vstopna moč plimovanja na tem območju 215 GW. Po njegovem modelu, je vstopna moč plimskih valov med Francijo in Irsko 180 GW. Od Severne Irske pa okrog do Šetlandskega otočja znaša vstopna moč plimskih valov 49 GW. Med Šetlandskim otočjem in Norveško znašajo neto izgube 5 GW. Kot lahko vidimo na sliki G.4, so Cartwright in sod. (1980) s poskusi prišli do ugotovitev, da je povprečna moč med točkama Malin Head (Irska) in Florø (Norveška) 60 GW, med otokom Valentia (Irska) in obalo Bretanije v bližini otoka Ouessant pa 190 GW. Moč plimskih valov, ki prihajajo v Irsko morje, znaša po ugotovitvah 45 GW, vstopna moč valov, ki prihajajo v Severno morje preko Dovrskih vrat pa 16,7 GW.

Slika G.2 Val v plitvini. Kot pri valovih v globini, ima tudi ta val dve energiji in sicer potencialno energijo zaradi dvigovanja vode iz svetlo osenčenih dolin v temno osenčene vrhove valov ter kinetično energijo premikajoče se vode v okolici, ki jo prikazujejo male puščice. Hitrost vala, ki potuje z leve proti desni, označuje večja puščica na vrhu. Tipična globina pri plimskih valovih je 100 m, hitrost vrha plimskega vala je 30 m/s, vertikalne amplitude na površini 1 ali 2 m, amplitude hitrosti vode pa 0,3 ali 0,6 m/s.

h (m)	$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2$ (kW/m)
0,9	125
1,0	155
1,2	220
1,5	345
1,75	470
2,0	600
2,25	780

Tabela G.3 Specifična moč (moč vrha vala na enoto dolžine) pri globini $d = 100$ m.

Moč plimskih valov

Ta del, ki ga lahko mirne vesti izpustite, ponuja podrobnejšo obravnavo enačbe za izračun moči plimovanja, ki sem jo uporabil v prejšnjem delu. Enačbo bom vzel pod drobnogled zato, ker menim, da je model, na katerem temelji večina uradnih ocen potenciala energije plimovanja v Veliki Britaniji, napačen.

Slika G.2 prikazuje model plimskega vala, ki potuje prek relativno plitke vode. Ta model je namenjen za ilustracijo na primer plimnih vrhov, ki potujejo navzgor po Rokavskem prelivu ali navzdol po Severnem morju. Pomembno je, da ločimo med hitrostjo vode U (ta je recimo približno 1 milja na uro) od hitrosti plimovanja v , ki je običajno nekje med 100 in 200 miljami na uro.

Globina vode je enaka d . Vrhovi in doline, ki jih ustvarja 12-urno ocean-sko plimovanje, prihajajo z leve strani glede na sliko (G.2). Njihova hitrost je

$$v = \sqrt{gd}. \quad (\text{G.2})$$

Predpostavimo, da je valovna dolžina veliko večja od globine, ter zanemarimo dejavnike, kot je Coriolisova sila ter razlike v gostoti vode. Vertikalno amplitudo plimovanja predstavlja h . Ob standardni predpostavki, da je vrtnčenje vodnega toka skoraj nično, je horizontalna hitrost vode skoraj konstantna z globino. Horizontalna hitrost U je sorazmerna z dvigom površine. Izračunamo jo lahko z ohranitvijo mase:

$$U = vh/d. \quad (\text{G.3})$$

Če je globina manjša, se tudi hitrost valov v zmanjša (enačba (G.2)). Na tem mestu bomo privzeli, da je globina konstantna. Energija se pretaka v smeri od leve proti desni z določeno hitrostjo. Kako lahko ocenimo to skupno moč plimovanja? In koliko moči lahko *največ* zagotovimo?

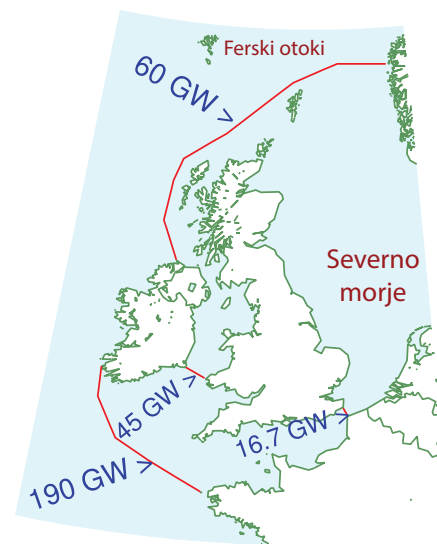
En način, kako lahko pridemo do tega rezultata, je, da izberemo presek in ocenimo povprečni *tok kinetične energije* čez to ravnico, potem pa upoštevamo, da ta količina predstavlja proizvodno moč. To metodo toka kinetične energije so uporabili pri svetovalni hiši Black and Veatch za oceno potencialnih virov energije plimovanja v Veliki Britaniji. Na našem modelu z ilustracije pa lahko skupno moč izračunamo drugače. Videli bomo, da je ocena na podlagi toka kinetične energije premajhna za kar nekajkrat.

Vršni tok kinetične energije (vršna moč) na kateremkoli delu je

$$K_{\text{BV}} = \frac{1}{2} \rho A U^3, \quad (\text{G.4})$$

pri čemer A predstavlja presek. (To je enaka enačba za tok kinetične energije, kot smo jo že srečali v poglavju B.)

Dejanska skupna začetna moč valov ni enaka toku kinetične energije. Dejansko skupno začetno moč valov v plitkih vodah izračunamo na podlagi preproste šolske enačbe. En način, kako pridemo do rezultata, je,



Slika G.4 Povprečne moči plimovanja, kot so jih izmerili Cartwright in sod. (1980).

da poiščemo skupno energijo na eni valovni dolžini in jo delimo z valovno periodo. Skupna energija na valovno dolžino je vsota potencialne in kinetične energije. Vsota kinetične energije in potencialne energije je konstantna. (To je lastnost skoraj vseh sistemov, ki nihajo, pa naj si gre za predmet na vzmeti ali otroka na gugalnici.) Da bi izračunali skupno energijo, moramo enostavno vzeti eno od njiju - potencialno energijo na valovno dolžino ali kinetično energijo na valovno dolžino - in jo podvojiti. Potencialna energija vala (na valovno dolžino in enoto širine čela vala), ki jo dobimo z integriranjem, je:

$$\frac{1}{4}\rho gh^2\lambda. \quad (\text{G.5})$$

Če jo torej podvojimo in delimo s periodo, je dejanska skupna moč plimskega vala iz našega modela

$$\text{moč} = \frac{1}{2}(\rho gh^2\lambda) \times \omega/T = \frac{1}{2}\rho gh^2v \times \omega, \quad (\text{G.6})$$

kjer je ω širina čela vala. Če namesto v vstavimo $\sqrt{gd}$, dobimo

$$\text{moč} = \rho gh^2\sqrt{gd} \times \omega/2 = \rho g^{3/2}\sqrt{d}h^2 \times \omega/2. \quad (\text{G.7})$$

Primerjajmo to moč s tokom kinetične energije K_{BV} . Presenetljivo oba izraza naraščata drugače z amplitudo h . Če uporabimo pretvorbeno razmerje za amplitudo (G.3), hitrost vrha vala (G.2) in $A = \omega d$, lahko tok kinetične energije zapišemo kot

$$K_{BV} = \frac{1}{2}\rho A U^3 = \frac{1}{2}\rho \omega d (vh/d)^3 = \rho \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3 \times \omega/2. \quad (\text{G.8})$$

Metoda toka kinetične energije torej predvideva, da skupna moč valov v plitki vodi narašča kot *tretja potenca* amplitude (enačba (G.8)), medtem ko je iz pravilne enačbe razvidno, da moč narašča kot *kvadrat* amplitude (enačba (G.7)). Razmerje je

$$\frac{K_{BV}}{\text{moč}} = \frac{\rho \omega \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3}{\rho g^{3/2} h^2 \sqrt{d} \omega} = \frac{h}{d}. \quad (\text{G.9})$$

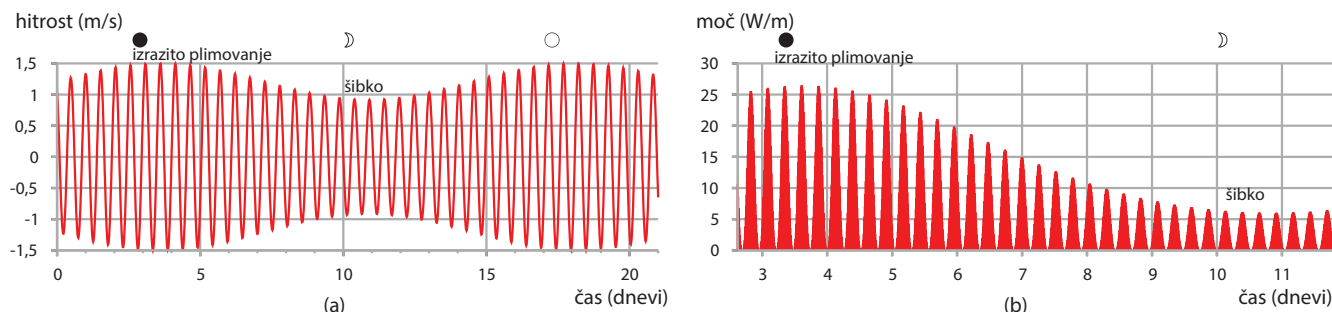
Ker je h običajno precej manjši od d (h je običajno med 1 in 2 m, medtem ko d lahko znaša 100 m ali 10 m), so lahko ocene potenciala energije valovanja na podlagi metode toka kinetične energije *veliko prenizke*, vsaj v primerih, kjer velja naš model za plimske valove v plitvinah.

Poleg tega pa ocene na podlagi metode toka kinetične energije vodijo do napačnih domnev, da je skupna moč valov v obdobju izrazitega plimovanja (najvišje plime) osemkrat večja kot v obdobju šibkega plimovanja (najnižje plime), če je razmerje med amplitudama prvih in drugih dva proti ena. Pravilna domneva je, da skupna moč potujočega vala narašča kot kvadrat amplitude, kar pomeni, da je razmerje med skupno vstopno

močjo izrazitega plimovanja in šibkega plimovanja pravzaprav štiri proti ena.

Vpliv spuščanja morskega dna in Coriolisova sila

Če se globina d postopoma večja in če širina ostaja enaka, tako da je odboj oziroma absorpcija vstopne moči minimalna, potem bo moč vala ostala nespremenjena.



To pomeni, da je $\sqrt{dh^2}$ konstanta, iz česar lahko sklepamo, da višina plime narašča z globino kot $h \cong 1/d^{1/4}$.

Gre za grob model, saj nismo upoštevali Coriolisovega pojava. Coriolisova sila je tista, ki povzroča odklon valov v desno. Na primer v Rokavskem prelivu so izrazite plime višje, izrazite oseke pa nižje na francoski strani preliva. Ker sem ta pojav zanemaril, so naše ocene mogoče nepravilne oz. netočne.

Moč plimskih elektrarn

Predstavljajte si, da na dno morja postavimo vetrnice, ki jih obrača morski tok. Ker je voda približno 1000-krat gostejša od zraka, je tudi moč vodnega toka 1000-krat večja v primerjavi z močjo vetra z enako hitrostjo.

Koliko moči lahko zagotovimo s plimskimi elektrarnami? To je v veliki meri odvisno od tega, ali se moči posameznih *sosebnih* plimskih elektrarn seštevajo. Pri vetrnih elektrarnah tako seštevanje pije vodo. Na primer, če smo upoštevali določeno standardno razdaljo med vetrnicami, potem bo skupna moč, ki jo zagotavlja 10 sosebnih vetrnih turbin enaka vsoti moči, ki bi jih lahko zagotovile posamezne vetrnice, če bi stale nekje na samem.

Ali enako velja za plimske elektrarne? Ali pa bi podvodne vetrnice drugače vplivale druga na drugo in s tem na proizvodno moč? Mislim, da odgovor na to vprašanje ni splošno znan. Na voljo imamo dve možni situaciji, ki ju lahko ponazorimo z ilustracijama. Za prvi primer bomo predpostavili, da se »plima obnaša enako kot veter«, se pravi, da lahko plimske turbine razporedimo po celotnem morskem dnu, upoštevamo le razmak med vetrnicami, ki naj bo približno enak petkratniku premera vetrnice.

Slika G.5 (a) Plimski tok v obdobju 21 dni na lokaciji, kjer je maksimalna hitrost toka pri izrazitem plimovanju 2,9 vozla (1,5 m/s), maksimalna hitrost toka pri šibkem plimovanju pa 1,8 vozla (0,9 m/s). (b) Moč na enoto površine morskega dna v 9-dnevnem obdobju med izrazitim in šibkim plimovanjem. Moč doseže višek 4-krat v dnevu, maksimalna moč na enoto površine pa je približno 27 W/m². Povprečna moč na površino plimske elektrarne je 6,4 W/m².

Domnevali bomo, da vetrnice ne bodo vplivale ena na drugo, ne glede na to, kolikšno površino morskega dna bomo z njimi prekrili.

V drugem primeru bomo predpostavili, da lahko »imamo le eno vrsto vetrnic« in da lahko - v nasprotju s prejšnjo domnevo - maksimalno moč na določenem območju zagotovimo z eno vrsto vetrnic, ki so usmerjene proti toku. Situacija, kjer ta domneva drži, je posebna oblika jezua hidro-elektrarne: če voda iz jezua teče skozi dobro zasnovano turbino, je nesmiselno dodajati še druge turbine za njo. Tudi če dodamo še 99 turbin za prvo, s tem ne bomo proizvedli 100-krat več energije. Energijo vode izkoristi prva turbina, za ostale pa je ne ostane nič. Naša druga teorija o eni sami vrsti vetrnic je pravilna predpostavka za oceno moči vodnega toka skozi ozki kanal pri pretakanju vode iz stacionarne vodne mase na eni višini do druge vodne mase, ki se nahaja na nižji višini. (Tak primer sta analizirala npr. Garrett in Cummins (2005, 2007).)

Sedaj pa naj obelodanim svojo teorijo. Mislim, da je domneva, da se »plima obnaša enako kot veter« dober približek za precej lokacij v Britanskem otočju. Verjetno obstaja tudi nekaj takih točk, ki se delno obnašajo kot ozek kanal. No, za te lokacije bodo moje ocene mogoče prevelike.

Predpostavimo, da so pravila za smiselno prostorsko razporeditev plimskih vetrnic enaka kot za vetrne turbine ter da je izkoristek plimske vetrnice podoben izkoristku najboljših vetrnic, tj. približno 1/2. Na strani 265 si lahko izposodimo enačbo za izračun moči vetrne elektrarne (na enoto površine). Moč na enoto površine morskega dna je tako

$$\frac{\text{moč na plimsko vetrnico}}{\text{površina na plimsko vetrnico}} = \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3$$

Na podlagi te enačbe smo izračunali specifično moč plimske elektrarne za različne plimske tokove, kar je prikazano v tabeli G.6.

Kakšni pa so tipični plimski tokovi? Karte plimovanja običajno prikazuje tokove, ki so povezani z najvišjimi amplitudami plimovanja (to imenujemo izrazito plimovanje) ter najnižjimi amplitudami plimovanja (to imenujemo šibko plimovanje). Izrazito plimovanje običajno nastopi kmalu po polni luni in mlaju, šibko plimovanje pa kmalu po prvem in zadnjem krajcu. Energija, ki jo lahko proizvedemo s pomočjo plimske elektrarne, bi med dnevom nihala, vendar bi bilo to nihanje popolnoma predvidljivo. Slika G.5 prikazuje spreminjanje specifične moči plimske elektrarne pri hitrostih plimskega toka do 1,5 m/s. Povprečna specifična moč take plimske elektrarne bi bila 6,4 W/m². V Britanskem otočju je kar nekaj lokacij, kjer bi moč plimskih elektrarn na enoto površine lahko dosegla 6 W/m² ali več. Taka specifična moč je podobna našim ocenam specifične moči vetrnih elektrarn (2-3 W/m²) ter fotonapetostnih elektrarn (5-10 W/m²).

Našo teorijo o tem, da se »plima obnaša enako kot veter« bomo sedaj uporabili za oceno moči, ki jo lahko zagotovimo iz plimskih tokov na obetavnih lokacijah v Britanskem otočju. Da preverimo naš izračun, bomo

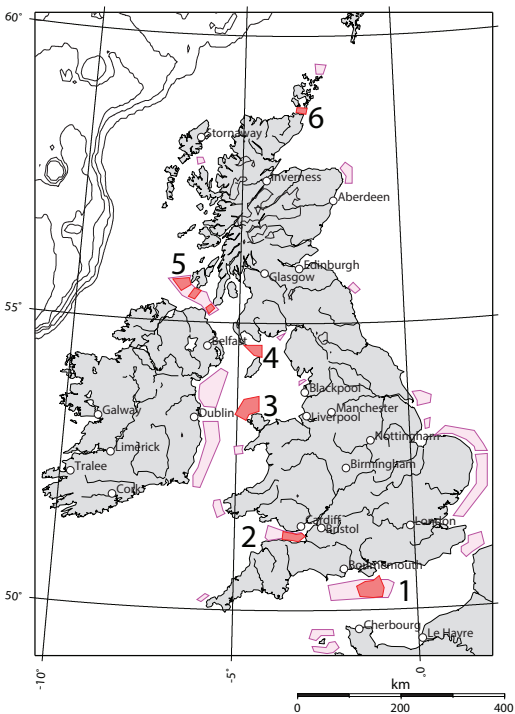
	U	Specifična moč
(m/s)	(vozli)	plimske elektrarne
		(W/m ²)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabela G.6 Specifična moč plimske elektrarne (v vatih na m² morskega dna) kot funkcija hitrosti vodnega toka *U*. (1 vozle = 1 navtična milja na uro = 0,514 m/s.) Specifična moč se izračuna kot $(\pi/200)^{1/2} \rho U^3$ (enačba (G. 10)).

izračunali tudi skupno moč plimovanja za vsako območje s pomočjo »teorije moči plimskih valov«, da ne bi bila slučajno ocena moči naše plimske elektrarne večja od skupne razpoložljive moči. Glavna območja v Britanskem otočju z velikimi plimskimi tokovi so prikazana na sliki G.7.

Ocenil sem tipične maksimalne tokove na šestih lokacijah z največjimi plimskimi tokovi in sicer na podlagi kart plimovanja iz Reedovega *Navtičnega almanaha*. (Te ocene so zlahka zgrešene za 30 %.) Je moja ocena površine posamezne regije prevelika ali premajhna? Morskega dna nisem raziskal, tako da ne vem, ali so določene regije mogoče kakorkoli neustrezne – pregloboke, preplitke ali enostavno neprimerne za gradnjo.

Ob upoštevanju vseh teh negotovosti lahko skupno moč plimskih elektrarn ocenim na **9 kWh/d na prebivalca**. To ustreza 9 % surove vstopne moči plimovanja, ki sem jo omenil na strani 83 in znaša 100 kWh/d na prebivalca. (Če z izkoriščanjem plimovanja v regiji pod številko 2, Bristol-skem zalivu, zagotovimo 1,1 kWh/d/prebivalca, bi to lahko prišlo navzkriž s proizvodnjo električne energije na zaježitvi Severn, odvisno od tega ali plimska elektrarna bistveno *poveča* ali samo nadomesti obstoječe naravno trenje, ki ga ustvarja kanal.



Slika G.7 Regije na širšem območju Britanskega otočja, kjer maksimalna hitrost plimskega toka presega 1 m/s. Teh šest temneje osenčenih regij je zajetih tudi v tabeli G. 8:

- 1. Rokavski preliv (južno od otoka Wight);
- 2. Bristolski zaliv;
- 3. območje severno od Anglesey;
- 4. območje severno od otoka Man;
- 5. območje med Severno Irsko, rtom Mull of Kintyre in otokom Islay;
- 6. preliv Pentland Firth (med otočjem Orkney ter celinskim delom Škotske) ter otočje Orkney.

Tokovi okrog Kanalskih otokov so ogromni, vendar ti upravno ne spadajo pod Veliko Britanijo. Regije na drugem mestu vključujejo Severno morje od Temze (London) pa do zaliva Wash (Kings Lynn). Plastnice prikazujejo globine nad 100 m. Podatki o plimovanju so vzeti iz Reedovega *Navtičnega almanaha* ter atlasa morskih obnovljivih energij v Veliki Britaniji - *DTI Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources* (2004).

Regija	U (vozli)		specifična moč (W/m ²)	površina (km ²)	povprečna moč (kWh/d/p)		d (m)	ω (km)	surova moč (kWh/d/p)	
	N	S							N	S
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	
Skupaj					9					

(a)

(b)

Tabela G.8 (a) Ocena moči plimovanja ob predpostavki, da se plimske elektrarne obnašajo kot vetrne elektrarne. Specifična moč je enaka povprečni moči na enoto površine morskega dna. Šest regij je prikazanih na sliki G.7. N=šibko plimovanje (angl. neaps), S=izrazito plimovanje (angl. springs). (b) Za primerjavo: ta tabela prikazuje surovo vstopno moč, izračunano s pomočjo enačbe (G.1) (str. 312).

v (m/s)	v (vozli)	Specifične izgube moči zaradi trenja (W/m ²)		Specifična moč plimske elektrarne (W/m ²)
		R ₁ = 0,01	R ₁ = 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	375	1000

Tabela G.9 Specifična izguba moči zaradi trenja $R_1\rho U^3$ (v vatih na kvadratni meter morskega dna) kot funkcija hitrosti toka, ob predpostavki, da je $R_1 = 0,01$ ali $0,003$. Flather (1976) uporablja vrednost za $R_1 = 0,0025-0,003$; Taylor (1920) pa $0,002$. (1 vozel = 1 navtična milja na uro = $0,514$ m/s.) Zadnji stolpec prikazuje oceno specifične moči plimovanja na podlagi tabele G.6. Dodatno branje: Kowalik (2004), Sleath (1984).

Ocena potenciala moči plimovanja na podlagi trenja z morskim dnom

Še en način, kako lahko ocenimo potencial moči plimovanja, je ta, da izračunamo koliko moči se izgubi zaradi trenja z morskim dnom. Poseben sloj za turbine, ki bi bil nameščen tik nad površino morskega dna, bi lahko predstavljal nadomestno morsko dno. Ustvarjal bi približno enak upor na vodne tokove kot je bil upor morskih tal, izguba moči pa bi bila tudi približno enaka izgubi zaradi trenja z morskim dnom, ob tem pa ne bi bistveno vplival na plimske tokove.

Koliko moči se torej izgubi zaradi trenja z morskim dnom? Na žalost ne obstaja enostaven model za tako trenje. Slednje je odvisno od hrpa-vosti in sestave morskega dna. Tudi če imamo na voljo vse te podatke, ne obstaja dogovorjena pravilna enačba za izračun. Po enem od modelov, ki se najpogosteje uporablja, naj bi padec tlaka kot posledico strižne nape-tosti (sile na enoto površine) lahko izračunali kot $R_1\rho U^2$, pri čemer je U povprečna hitrost toka, R_1 pa brezdimenzijska količina imenovana koefi-cient trenja. Kako se moč izgublja na enoto površine, lahko ocenimo tako, da pomnožimo tlačno razliko in hitrost. Tabela G.9 prikazuje izgube moči zaradi trenja $R_1\rho U^3$, ob predpostavljenih vrednostih koeficienta trenja $R_1 = 0,01$ oz. $R_1 = 0,003$. Za vrednosti koeficienta trenja v tem okviru bo moč zaradi trenja zelo podobna naši oceni moči, ki jo lahko zagotavlja plimska elektrarna. To je dobra novica, saj pomeni, da nasad podvodnih vetrnic na morskem dnu, ki so postavljene z medsebojnim razmakom ve-likosti pet premerov, ne bo bistveno vplival na vodni tok. Vpliv naravnega trenja je namreč nekje v istih okvirih.

Plimske lagune s črpanjem vode

Črpanje umetno poveča amplitude plime v plimskem bazenu oz. laguni. Cilj tega je povečati proizvodno moč. Raba energije pri črpanju dodatne vode v lagune ob plimi se povrne z obrestmi, ko to isto vodo spustimo iz lagune ob oseki. Podobno lahko vodo črpamo tudi iz lagune ob oseki in jo ponovno spustimo v laguno ob plimi. Ta trik se včasih uporablja v elek-trarni La Rance, z njim pa dosežejo 10 % večjo neto proizvodnjo električne

amplituda plimovanja (polovica razpona) h (m)	optimalna višina dviga b (m)	specifična moč s črpanjem (W/m ²)	specifična moč brez črpanja (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

Tabela G.10 Teoretična specifična moč pri izkoriščanju energije plimovanja s pomočjo črpalk, brez omejitve glede višine bazena.

energije (Wilson in Balls, 1990). Izračunajmo teoretično omejitev za omejeno tehnologijo. Predpostavil bom, da je izkoristek proizvodnje električne energije $\epsilon_g = 0,9$, izkoristek črpanja pa $\epsilon_p = 0,85$.

Naj bo razpon plime $2h$. Zaradi enostavnejšega računanja bomo upoštevali, da so prodajne in nakupne cene električne energije vedno enake, tako da lahko optimalno višino b , ki predstavlja višinsko razliko med plimo in nivojem načrpane vode v bazenu izrazimo z enačbo (mejni stroški dodatnega črpanja = mejni donos dodatne količine vode):

$$b / \epsilon_p = \epsilon_g (b + 2h).$$

Če definiramo celokupni izkoristek kot $\epsilon = \epsilon_g \epsilon_p$, potem dobimo

$$b = 2h \frac{\epsilon}{1 - \epsilon}.$$

Na primer, pri razponu plime $2h = 4$ m ter celotnem izkoristku $\epsilon = 76\%$, je optimalna višina dviga vode $b = 13$ m. To je maksimalna višina, do katere lahko črpamo vodo, če je cena električne energije konstantna.

Predpostavimo, da se enak princip uporabi pri oseki. (Za to mora biti globina bazena 30 m!) Moč na enoto površine je v tem primeru

$$\left(\frac{1}{2} \rho g \epsilon_g (b + 2h)^2 - \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\epsilon_p} b^2 \right) / T,$$

pri čemer je T čas med plimo in oseko. To lahko izrazimo kot maksimalno dosegljivo specifično moč brez črpanja, $\epsilon_g 2\rho g h^2 / T$, povečano za faktor

$$\left(\frac{1}{1 - \epsilon} \right),$$

ki znaša približno 4. V tabeli G.10 so prikazane teoretične specifične moči pri črpanju. Na žalost se ta trik s črpanjem le redko izkorišča v polni meri, in sicer zaradi ekonomike izgradnje bazena. Da bi lahko maksimalno izkoristili črpanje, bi morala biti globina našega bazena približno štirikrat večja od razpona plimovanja, bi pa tak bazen lahko zagotovil tudi štirikrat več moči. Toda količina materiala v morski steni višine H narašča kot kvadrat višine (H^2), kar pomeni, da bi bili stroški za postavitev štirikrat višje stene več kot štirikrat višji. Verjetno bi bilo bolje ta denar porabiti za povečanje površine in ne globine bazena.

Vseeno pa lahko zvijačo s črpanjem uporabimo brez finančnih vložkov, in sicer vedno, ko je razpon naravnega plimovanja manjši od maksimalnega razpona: vodo lahko ob plimi načrpamo do maksimalnega nivoja.

Tabela G.11 Specifična moč ob uporabi črpanja, ob predpostavki, da je optimalna višina dviga omejena z višino amplitude plimovanja. Ta domneva velja na primer pri šibkem plimovanju, če s črpanjem dvignemo razpon plime do amplitude izrazitega plimovanja.

amplituda plimovanja (polovični razpon) <i>h</i> (m)	optimalna višina dviga <i>b</i> (m)	specifična moč s črpanjem (W/m ²)	specifična moč brez črpanja (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

V tabeli G.11 so navedeni podatki o specifični moči, ki jo lahko zagotovimo, če je višina dviga vode enaka *h*, kar pomeni, da je razpon v bazenu dvakrat večji od zunanjega razpona. V obdobju šibkega plimovanja lahko razpon zlahka podvojimo, saj so amplitude pri šibkem plimovanju običajno pol manjše od amplitud pri izrazitem plimovanju. Če pri šibkem plimovanju črpamo vodo v bazen, tako da dosežemo amplitudo izrazitega plimovanja, lahko zagotovimo približno dvakrat toliko moči kot brez črpanja. Se pravi, da bi bila moč pri sistemu, kjer bi se uporabljalo črpanje vode, vsaka dva tedna povečana za faktor 2 namesto za faktor 4.

Z dvema bazenoma je moč plimovanja »vedno na voljo«

Poglejte si tole super idejo. Imamo dva bazena, od katerih je en »polni«, drugi pa »prazni« bazen. Pri vsaki plimi se polni bazen napolni, pri vsaki oseki pa se prazni bazen sprazni. To polnjenje in praznjenje lahko poteka pasivno prek zapornic ali pa aktivno s pomočjo črpalk (na enak način, kot sem že omenil zgoraj). Kadarkoli se pojavi potreba po moči, vodo pretakamo iz polnega bazena v prazni bazen oziroma (kar je z vidika moči bolje) med bazenom in morjem. Osnovni strošek sistema z dvema bazenoma je sicer večji zaradi dodatnih zidov, ki jih je potrebno postaviti, vendar je absolutna zmaga to, da imamo moč vedno na voljo takrat, kadar jo potrebujemo.

Moč, ki jo zagotavlja prazna laguna, lahko porabimo za črpanje dodatne količine vode v polno laguno ob plimi, na enak način pa lahko moč polne lagune izkoristimo za to, da izpraznimo prazno laguno ob oseki. Tako črpanje pripomore k večji proizvodnji obrata brez da bi za to potrebovali dodatno električno energijo iz omrežja. Čudovita lastnost rešitve z dvema lagunama je ta, da je plima najbolj optimalen čas tako za črpanje vode v visoko laguno kot tudi za *proizvajanje* električne energije v nizki laguni. Podobno pa je oseka idealen čas za črpanje vode iz nizke lagune in proizvodnjo električne energije v visoki laguni. S pomočjo preproste simulacije sem ugotovil, da lahko dvolagunski sistem na območjih z razponom naravnega plimovanja 4 m in ustreznim časovnim razporedom črpanja

zagotavlja *stalno specifično* moč $4,5 \text{ W/m}^2$ (MacKay, 2007a). Nivo vode v eni od lagun je vedno nad povprečno višino morja. Specifična moč $4,5 \text{ W/m}^2$ je za 50 % večja kot maksimalna povprečna specifična moč običajne plimske lagune na isti lokaciji (3 W/m^2).



Stalna proizvodnja električne energije v sistemu lagun bi bila več vredna kot občasna in ne tako fleksibilna električna energija, ki jo proizvaja običajna plimska laguna.

Dvolagunski sistem bi se lahko uporabljal tudi kot črpalna elektrarna, ki bi shranjevala viške energije.

Opombe

stran

311 90 % izkoristek... Izkoristek turbin je približno 90-odstoten pri višini stolpca 3,7 m ali več. Baker in sod. (2006).

320 Z dvema bazenoma je moč plimovanja vedno na voljo. Dvolagunska plimska elektrarna stoji v kraju Haishan na otoku Maoyan na Kitajskem. Za zagotavljanje stalne moči (v povprečju 39 kW) se uporablja en sam generator, ki je nameščen med obema bazenoma, kot lahko vidimo na sliki G.12(a). [2bqapk].

Dodatno branje: Shaw in Watson (2003b); Blunden in Bahaj (2007); Charlier (2003a,b).

Več informacij o trenju z morskim dnom ter spreminjanju toka z globino: Sleath (1984).

Več informacij o oceni potenciala energije plimovanja v Veliki Britaniji: MacKay (2007b).

Več o plimskih lagunah: MacKay (2007a).

Slika G.12 Različni načini za uporabo trika z dodatnim črpanjem. Dve laguni sta na nadmorski višini 0. (a) Preprost način, kako ju lahko uporabimo, je ta, da eno uporabimo kot visoki bazen, drugo pa nizki bazen. Ko se nivo morja bliža visoki plimi spustimo ali prečrpamo (za to uporabimo drug vir električne energije) vodo v visoki bazen. Ko se gladina morja spušča proti oseki pa spraznimo nizki bazen bodisi pasivno prek rešetk ali s pomočjo črpalk. Kadarkoli je dovolj vodnega potenciala, lahko generiramo energijo odvisno od potreb odjema, z izpustom vode iz visokega v nizki bazen. (b) Pri drugem načinu, pri katerem je moč na enoto površine (W/m^2) lahko večja, pa ni pretoka med obema lagunama. Medtem ko ena laguna služi temu, da črpamo vodo v njo in iz nje, pa druga laguna zagotavlja stalno moč v omrežju glede na povpraševanje. Potrebno moč za delovanje črpalk lahko zagotovimo z nestalno vetrno energijo, razpoložljivo močjo v omrežju (recimo nuklearke), ali pa iz druge polovice sistema, tako da z energijo vode v eni laguni črpamo vodo v drugo laguno ali iz nje.

H Stvari in predmeti vsakdanje rabe II

Uvožena energija

Dieter Helm in njegovi sodelavci so ocenili odtis vsakega funta uvoženega blaga iz države X s pomočjo povprečne ogljične intenzivnosti gospodarstva države X (razmerje med emisijami ogljikovega dioksida in bruto domačim proizvodom). Prišli so do zaključka, da znaša »sivi« ogljični odtis blaga, uvoženega v Veliko Britanijo (to številko bi bilo potrebno dodati k uradnemu ogljičnemu odtisu Velike Britanije, ki znaša 11 ton CO₂e na leto na prebivalca) približno 16 ton CO₂e na leto na prebivalca. Po ocenah nadaljnje podrobnejše študije, ki jo je naročilo Ministrstvo za okolje, hrano in podeželje Velike Britanije (DEFRA), je »sivi« ogljični odtis uvoza manjši, vendar še vedno dokaj velik: približno 6,2 toni CO₂e na leto na prebivalca. Z energijskega vidika pomeni 6 ton CO₂e na leto nekje 60 kWh/d.

Pa si pogledjmo, če lahko pridemo do enakih rezultatov drugače in sicer s pomočjo količine in vrednosti uvoza.

Na sliki H.2 je prikazan uvoz Velike Britanije leta 2006 s treh različnih vidikov. Levi stolpec prikazuje skupno *vrednost* uvoza po državah izvoznicah. V srednjem stolpcu je ista skupna denarna vrednost uvoza razdeljena glede na vrste uvoženega blaga na podlagi klasifikacije Britanske davčne uprave (HMRC). Na desni strani pa je prikazan prekomorski uvoz blaga v Veliko Britanijo po masi, razdeljen pa je glede na kategorije, kot jih uporablja britansko ministrstvo za transport, ki ne razlikuje med usnjem in tobakom, temveč vodi evidenco blaga glede na maso, glede na to ali gre za suhi ali tekoči tovor ter glede na to, ali je tovor prispel v kontejnerju ali tovornjaku.

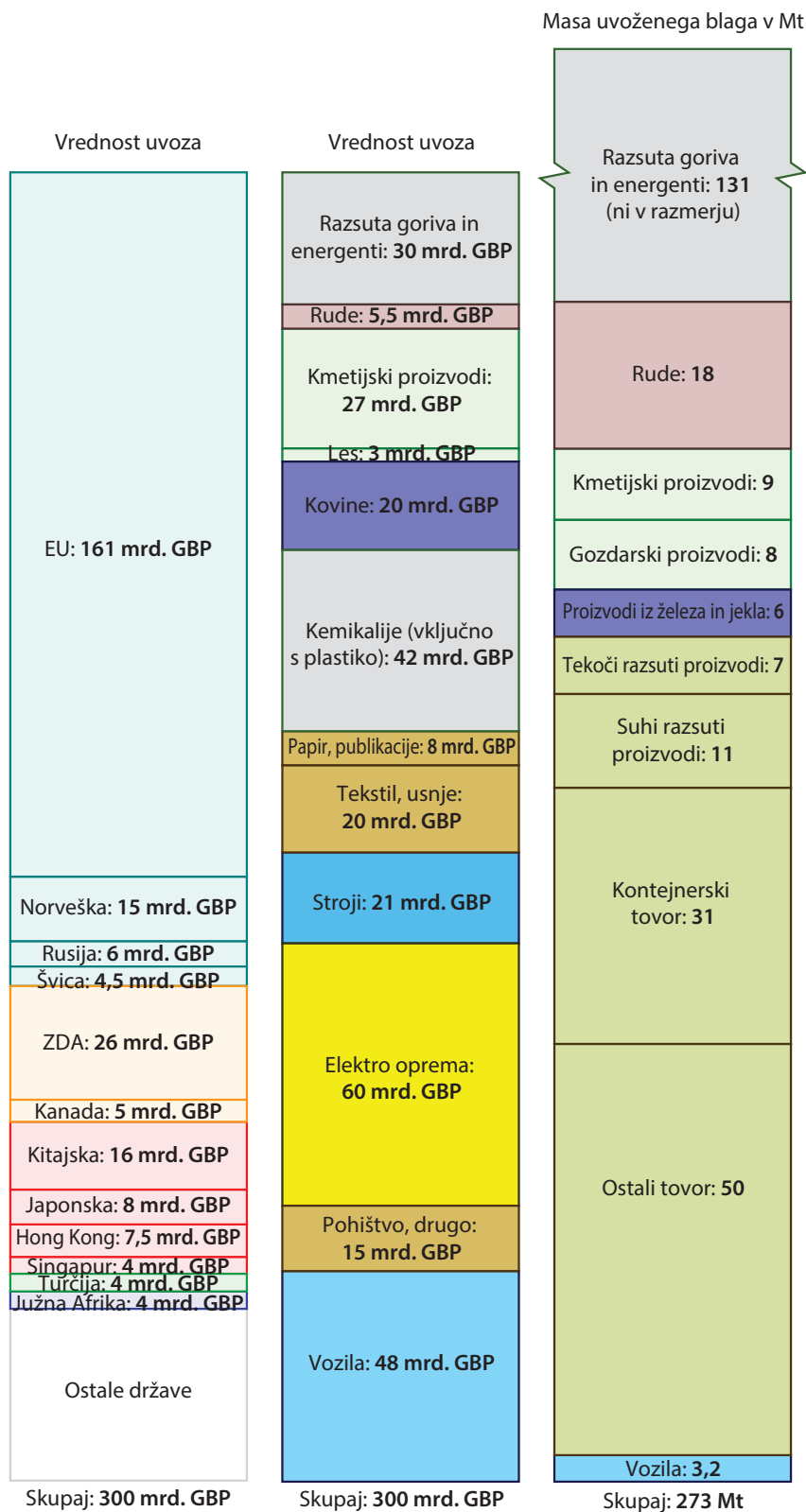
Energija v uvoženem gorivu (zgoraj desno) je vključena v standardne izračune porabe energije v Veliki Britaniji, energija v ostalem uvoženem blagu pa ni. Pri večini materialov je »vgrajena« energija na enoto mase večja ali enaka 10 kWh na kg, kar je enako vrednosti energije na kilogram fosilnih goriv. To na primer drži za vse kovine in zlitine, polimere in kompozite, večino papirnih izdelkov ter velik del keramičnih izdelkov. Izjeme so surovine, kot so rude, ter porozna keramika, kamor spadajo beton, opeka in porcelan, kjer je vgrajena energija desetkrat manjša, pa tudi les in nekatere vrste gume ter steklo, kjer je vgrajena energija za dlako manjša od 10 kWh na kg. [r22oz]

Grobo oceno energijskega odtisa uvoženega blaga lahko torej podamo enostavno iz količine (mase) materialov, iz katerih je blago izdelano, če izključimo materiale kot so rude in les. Zaradi okvirnih podatkov, s katerimi operiramo, bomo zagotovo naredili kako napako ter nehote vključili kaj takega, kar je narejeno iz lesa ali stekla, vendar upajmo, da se bodo taki spodrsaljaji uravnali z nekoliko nižjo oceno energijske vsebnosti večine kovin in plastike ter bolj kompleksnega blaga, pri večini katerih »vgrajena energija« ne znaša 10 temveč 30 kWh na kg ali celo več.



Slika H.1 Kontinuirano litje jeklenih trakov v obratu Korea Iron and Steel Company.

Slika H.2 Uvoz blaga v Veliko Britanijo, 2006.



Za ta izračun bom iz desnega stolpca na sliki H.2 vzel podatke za proizvode iz železa in jekla, suhi razsuti tovor, kontejnerski tovor ter »Ostali tovor«. Njihova skupna teža znaša 98 milijonov ton letno. Vozila bom zaenkrat izpustil. Od te številke bom odštel približno 25 milijonov ton na račun živil, ki se verjetno skrivajo v kategoriji »Ostali tovor« (V letu 2006 je bilo uvoženih 34 milijonov ton živil), torej nam ostane 73 milijonov ton.

Če bi 73 milijonov ton blaga pretvorili v energijo s pomočjo zgoraj navedene pretvorbe in to razdelili med 60 milijonov prebivalcev, bi bil dobljen vgrajeni ekvivalent moči blaga 33 kWh/d na prebivalca.

Pri avtomobilih potrebujemo manj ugibanj, saj imamo na voljo več podatkov. V letu 2006 je bilo uvoženih 2,4 milijona avtomobilov. Če je vgrajena energija avtomobila 76 000 kWh (podatek, ki smo ga vzeli na strani 90), potem je skupni vgrajeni ekvivalent moči uvoženih avtomobilov 8 kWh/d na prebivalca.

Tekoče razsute proizvode sem izpustil iz naše ocene, ker nisem prepričan, za kakšne proizvode v resnici gre. Če gre za tekoče kemikalije, potem bi lahko prispevali pomemben delež h končni številki.

Prišli smo do ocene skupnega vgrajenega ekvivalenta moči uvoženega blaga, ki znaša 41 kWh/d na prebivalca – to je definitivno v istem okviru kot ocene Dietra Helma in njegovih sodelavcev.

Mislim, da je 41 kWh/d na prebivalca premajhna ocena, saj je naša predpostavljena energijska intenzivnost (10 kWh na kg) prenizka za večino tipov proizvodov, kot so na primer stroji ali električna oprema. Vendar pa je brez podatkov o masi za vse kategorije uvoženega blaga to najboljša ocena, ki jo lahko ta trenutek ponudim.

Analiza življenjskega cikla zgradb

Tabeli H.4 in H.5 prikazujeta ocene *Energijske potrebe proizvodnje* gradbenih materialov in konstrukcij. Te vključujejo energijo za prevoz surovin do proizvodnih obratov, ne pa tudi energije za prevoz končnih izdelkov do gradbišča.

Pri tabeli H.6 smo te številke uporabili za oceno energijske potrebe procesa izgradnje trisobne hiše. *Bruto energijske potrebe* merijo nekoliko širše, saj vključujejo na primer tudi vgrajeno energijo mestne infrastrukture ter strojev, ki so potrebni za izdelavo surovin. Bruto energijske potrebe lahko na palec ocenimo tako, da podvojimo energijske potrebe procesa [3kmcks].

Če številko 42.000 kWh porazdelimo na 100 let ter jo podvojimo, da dobimo oceno bruto energijskih potreb, pridemo do skupnega vgrajenega ekvivalenta moči hiše, ki znaša približno 2,3 kWh/d. To predstavlja rabo energije samo za *lupino* hiše, se pravi opek, strešne kritine in strešnih tramov.



Slika H.3 Površinski kop niobija v Braziliji.

Material	Vgrajena energija	
	(MJ/kg)	(kWh/kg)
žagan mehki les, sušen v sušilnici	3,4	0,94
žagan trdi les, sušen v sušilnici	2,0	0,56
žagan trdi les, sušen na zraku	0,5	0,14
lesonitna plošča	24,2	6,7
iverna plošča	8,0	2,2
MDF plošča	11,3	3,1
vezana plošča	10,4	2,9
lepljen lameliran les	11	3,0
slojnat furnirni les	11	3,0
slama	0,24	0,07
zbita zemlja	0,7	0,19
uvožen gradbeni granit	13,9	3,9
domač gradbeni granit	5,9	1,6
mavec	2,9	0,8
mavčna plošča	4,4	1,2
vlaknasti cement	4,8	1,3
cement	5,6	1,6
beton pripravljen na gradbišču	1,9	0,53
predhodno uliti betonski elementi		
obdelani s paro	2,0	0,56
predhodno uliti »tilt-up« betonski elementi	1,9	0,53
glinena opeka	2,5	0,69
betonski bloki	1,5	0,42
avtoklavni prezračeni beton	3,6	1,0
plastika – splošno	90	25
PVC	80	22
sintetična guma	110	30
akrilni premaz	61,5	17
steklo	12,7	3,5
steklena volna	28	7,8
aluminij	170	47
baker	100	28
galvanizirano jeklo	38	10,6
nerjavno jeklo	51,5	14,3

Tabela H.4 »Vgrajena« energija gradbenih materialov (ob predpostavki, da se uporabijo novi in ne rabljeni materiali). (Gradbeni kamen je naravni kamen, ki je obdelan v elemente z določeno obliko in velikostjo). Viri: [3kmcks], Lawson (1996).



	Vgrajena energija (kWh/m²)
Zidovi	
lesen okvir, lesen opaz, obloga iz mavcnih plosc	52
lesen okvir, glinena opeka, obloga iz mavcnih plosc	156
lesen okvir, aluminijast opaz, obloga iz mavcnih plosc	112
jeklen okvir, glinena opeka, obloga iz mavcnih plosc	168
dve plasti glinene opeke, obloga iz mavcnih plosc	252
zbita zemlja z dodatkom cementa	104
Tla	
dvignjen lesen pod	81
110 mm betonski blok	179
200 mm predhodno ulita betonska T-greda/zapolnjena	179
Strehe	
lesen okvir, betonska kritina, mavcni strop	70
lesen okvir, glinena opecnata kritina, mavcni strop	75
lesen okvir, jeklena plocevina, mavcni strop	92

	Povrsina (m²)	×	Vgrajena energija na m² (kWh/m²)	=	Energija (kWh)
Tla	100	×	81	=	8100
Streha	75	×	75	=	5600
Zunanje stene	75	×	252	=	19 000
Notranje stene	75	×	125	=	9400
Skupaj					42 000

Opombe in dodatno branje

stran

322 Po ocenah nadaljnje podrobnejše študije, ki jo je naročilo Ministrstvo za okolje, hrano in podeželje Velike Britanije (DEFRA), je »sivi« ogljični odtis uvoza približno 6,2 tone CO₂e na prebivalca. Wiedmann in sod. (2008).

Dodatni viri: www.greenbooklive.com, kjer najdete ocene življenjskega cikla gradbenih proizvodov.

Nekatera koristna opozorila glede analiz življenjskega cikla: www.gdrc.org/uem/lca/life-cycle.html.

Dodatna povezava: www.epa.gov/ord/NRMRL/lcaccess/resources.htm.

Tabela H.5 Vgrajena energija pri različnih vrstah zidov, tal in streh. Viri: [3kmcks], Lawson (1996).

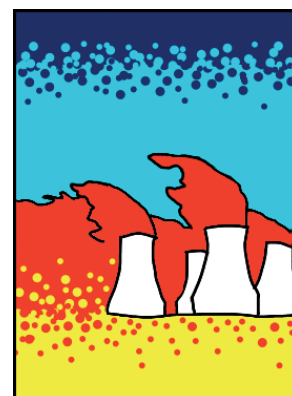
Tabela H.6 Procesna energija pri izdelavi trisobne hiše.



Slika H.7 Viadukt Millau v Franciji je najvišji most na svetu. Jeklo in beton, 2,5 kilometra dolg in 353 metrov visok.

4. del

Koristni podatki



I Na kratko o enotah

SI enote

Vat (angl. Watt). Ta SI enota je dobila ime po Jamesu Wattu. Kot pri vseh enotah, čigar imena so izpeljana iz osebnih imen, je prva črka oznake vélika črka (W). Kadar pa enoto zapišemo z besedo, moramo vedno uporabiti male črke (vat). Edina izjema je »stopinja Celzija«.

Vir: Wikipedia

SI je oznaka za mednarodni sistem enot - Système International. SI enote so tiste, ki bi jih morali uporabljati vsi inženirji, da ne bi izgubljali vesoljskih plovil.

SI enote			predpona	kilo	mega	giga	tera	Peta	eksa
energija	en Joule	1 J	okrajšava	k	M	G	T	P	E
	(tudi džul)		potenca	10 ³	10 ⁶	10 ⁹	10 ¹²	10 ¹⁵	10 ¹⁸
moč	en vat	1 W							
sila	en Newton	1 N							
	(tudi njuton)								
dolžina	en meter	1 m	predpona	centi	mili	mikro	nano	Piko	femto
čas	ena sekunda	1 s	okrajšava	c	m	μ	n	P	f
temperatura	en Kelvin	1 K	potenca	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁵

Tabela I.1 SI enote in predpone

Moje priljubljene enote za energijo, moč in transportno učinkovitost

Meni ljube enote, izražene v SI			
energija	ena kilovatna ura	1 kWh	3 600 000 J
moč	ena kilovatna ura na dan	1 kWh/d	(1000/24) W ≅ 40 W
energija na dolžino	ena kilovatna ura na 100 km	1 kWh/100 km	36 N
čas	ena ura	1 h	3600 s
	en dan	1 d	24 × 3600 s ≅ 10 ⁵ s
	eno leto	1 y	365,25 × 24 × 3600 s ≅ π × 10 ⁷ s
sila na enoto mase	ena kilovatna ura na tonski kilometer	1 kWh/tkm	3,6 m/s ² (≅ 0,37 g)

Dodatne enote in oznake

Merjena količina	Ime enote	Oznaka	Vrednost
ljudje	oseba	p	
masa	tona	t	1 t = 1000 kg
	gigatona	Gt	1 Gt = $10^9 \times 1000$ kg = 1 Pg
transport	potniški kilometer	pkm	
transport	tonski kilometer	tkm	
prostornina	liter	l	1 l = 0,001 m ³
površina	kvadratni kilometer	km ²	1 km ² = 10 ⁶ m ²
	hektar	ha	1 ha = 10 ⁴ m ²
	Wales		1 Wales = 21 000 km ²
	London (Greater London)		1 London = 1580 km ²
energija	Dinorwig		1 Dinorwig = 9 GWh

Milijarde, milijoni in druga lokalna poimenovanja

V kontinentalnem delu Evrope se okrajšavi Mio in Mrd uporabljata kot oznaki za milijon (prva) in milijardo (druga). Milijardo lahko zapišemo kot 10⁹, predpona za to potenco pa je »giga«. Angleško govoreče dežele uporabljajo za milijardo izraz bilijon (angl. billion oz. bn), ki izhaja iz standardnega ameriškega bilijona, vendar pa ga ne gre mešati z našim bilijonom (10¹²), ki je enak ameriškemu trilijonu (angl. trillion).¹

Za označevanje milijona se pogosto uporablja oznaka m, vendar to ni v skladu s SI sistemom – poglejmo, recimo enoto mg (miligram). Sam ne uporabljam oznake m za milijon. Če pa jo že kdo uporabi v ta namen, jo raje zamenjam z M. Tako bi na primer uporabil Mtoe za milijon ton naftnega ekvivalenta, Mt CO₂ pa za milijon ton CO₂.

Zoprne enote

Obstaja cel kup enot, ki se redno uporabljajo, v praksi so pa zaradi takega ali drugačnega razloga zoprne. Za nekatere sem ugotovil, kaj pomenijo, zato jih bom pojasnil spodaj, da vam bodo v pomoč pri razumevanju besedil, ki se pojavljajo v najrazličnejših medijih.

Gospodinjstvo

Izraz gospodinjstvo se pogosto uporablja v povezavi z močjo obratov obnovljivih virov energije. Na primer: »140 turbin vetrne elektrarne Whitelee s skupno vrednostjo 300 milijonov britanskih funtov zagotavljajo 322 MW moči – dovolj za oskrbo 200 000 gospodinjstev z električno energijo.« Britansko združenje za vetrno energijo (British Wind Energy Association) definira enoto gospodinjstvo kot **4700 kWh na leto** [www.bwea.com/ukwed/operational.asp]. To je enako 0,54 kW oz. **13 kWh na dan**. (Nekatere druge organizacije uporabljajo 4000 kWh/leto na gospodinjstvo.)

Izraz gospodinjstvo mi osebno ni po godu, ker me skrbi, da bi ga ljudje zamenjevali s *skupno porabo stanovalcev v gospodinjstvu* – ta pa je v resnici 24-krat večja. Enota gospodinjstvo pokriva zgolj povprečno domačo porabo *električne energije* v gospodinjstvu, ne vključuje pa tudi energije za ogrevanje in niti delovnih mest ali transporta stanovalcev. Pa tudi ne vsega, kar družba počne zanje in pri tem troši energijo.

Mimogrede, kadar je govora o emisijah CO₂, vezanih na gospodinjstvo, je uradna pretvorba 4 tone CO₂ na gospodinjstvo na leto.

Elektrarne

Podatki o prihrankih energije so včasih opisani z vidika elektrarn. Na primer, v novici na spletni strani BBC o vgradnji novih trajnih LED žarnic v semaforje je pisalo, da naj bi bili »prihranki energije velikanski – za napajanje semaforjev v Veliki Britaniji sta potrebni dve srednje veliki elektrarni.« news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/specials/sheffield_99/449368.stm

Kaj pa je srednje velika elektrarna? Je to elektrarna moči 10 MW? 50 MW? 100 MW? 500 MW? Nimam pojma. S pomočjo Googla sem ugotovil, da nekateri ljudje mislijo, da gre za 30 MW, drugi 250 MW, tretji 500 MW (najpogostejša izbira), nekateri pa celo 800 MW moči. Kako neuporabna enota!

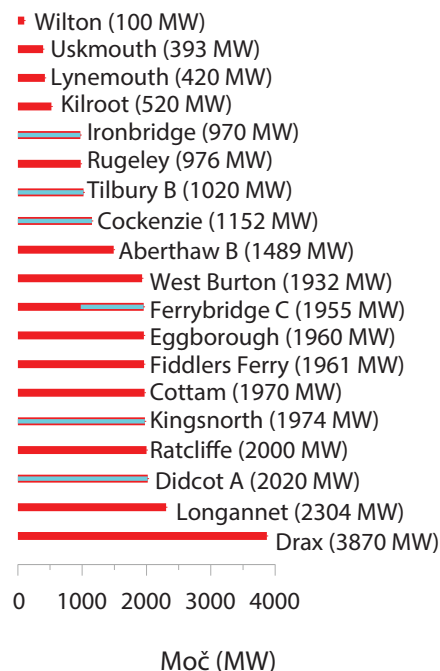
Ali ne bi bilo bolj razumljivo, če bi v članku o semaforjih namesto elektrarn uporabili odstotke? »Semaforji v Veliki Britaniji potrebujejo za svoje delovanje 11 MW električne moči, kar je 0,03 % skupne električne moči v Veliki Britaniji.« Tako bi bilo jasno, kako »veliki« so prihranki električne energije.

Na sliki I.2 so prikazane moči 19 premogovnih elektrarn v Veliki Britaniji.

Avtomobili vzeti iz prometa

Nekateri oglasi opisujejo zmanjšanja emisij CO₂ z vidika »ekvivalenta avtomobilov vzeti iz prometa«. Na primer, Richard Branson trdi, da če bi vsi vlaki Voyager družbe Virgin Trains prekllopili na 20-odstotno mešanico biodizla – mimogrede, ali se vam ne zdi nezaslišano, da vlak, ki deluje na 80 % fosilnih goriv in 20 % biodizla, imenujejo »zeleni vlak na biodizel«? – se opravičujem, malo me je zaneslo. No, Richard Branson trdi, da če bi vsi vlaki Voyager družbe Virgin Trains prekllopili na 20-odstotni biodizel – poudarek je na »če«, kajti ljudje kot je Beadie (Richard Branson, op.prev.) so vedno deležni medijske publicitete, ko najavijo, da »razmišljajo o« tem, da bi naredili nekaj dobrega, toda nekatere take pompozne pobude potem čisto potihoma poniknejo, kot se je to zgodilo z idejo o tem, da bi letala prevažali po letališču z vlačilci in jih tako naredili bolj »zeleni« – se opravičujem, spet me je odpeljalo. Richard Branson trdi, da če bi vsi vlaki Voyager družbe Virgin Trains prekllopili na 20-odstotni biodizel, bi s tem zmanjšali emisije CO₂ za 34 500 ton, kar je enako kot da bi »23 000 avtomobilov vzeli iz prometa.« S tem podatkom dobimo faktor za pretvorbo, in sicer:

»en avtomobil vzet iz prometa« $\longleftrightarrow$ -1,5 tone emisij CO₂ letno



Slika I.2 Moči premogovnih elektrarn v Veliki Britaniji. Z modro so označene tiste, ki se bodo do leta 2015 zaprle (skupno 8 MW kapacitet). 2500 MW, razdeljeno po vsej Veliki Britaniji, je enako kot 1 kWh na dan na prebivalca.

Kalorije

Enota kalorija je zoprna zato, ker vsa prehranjevalno dietna sfera uporablja izraz Kalorija namesto izraza kilokalorija. Ena taka prehranska Kalorija = 1000 kalorij. $2500 \text{ kcal} = 3 \text{ kWh} = 10.000 \text{ kJ} = 10 \text{ MJ}$.

Sodčki

Še ena zoprna enota, ki jo ima rada naftna skupnost poleg enote »tona nafte«. Zakaj se ne morejo držati ene same enote? Sodček nafte je mera za 6,1 GJ oziroma 1700 kWh energije nafte, ki je v sodčku.

Sodčki so v resnici dvojno zoprni, ker obstaja več definicij za sodčke, vsaka z drugačno prostornino.

Tu je vse, kar morate vedeti o sodčkih nafte: En sodček meri 42 ameriških galon oziroma 159 litrov. V sodčku nafte je 0,1364 tone ali 136 kg nafte. Energija enega sodčka surove nafte je 5,75 GJ. Ena tona surove nafte je enaka 7,33 sodčkom, kar ustreza 42,1 GJ energije. Sodček surove nafte povzroči 400 kg emisij CO₂. www.chemlink.com.au/conversions.htm. To pomeni, da je - pri ceni nafte 100 USD na sodček - cena energije iz nafte 6 centov na kWh. Če bi uvedli davek na emisije CO₂ za fosilna goriva v višini 250 USD, bi cena sodčka nafte poskočila za 100 USD.

Galone

Galona bi bila super človeku prijazna enota, če ne bi bili jenkiji zamočili vsega skupaj in galono definirali drugače kot vsi ostali, kot so storili tudi s pinto in kvartom. Ameriške enote so enakovredne približno petim šestinam pravih prostorninskih enot.

1 ameriška galona (US gal) = 3,785 l = 0,83 imperialne galone.

1 imperialna galona = 4,545 l.

Tone

Pri tonah je zoprno to, da poznamo kratke tone, dolge tone in metrične tone. Vse so si dovolj blizu, da se mi ne zdi vredno delati razlik med njimi. 1 kratka tona (2000 lb) = 907 kg; 1 dolga tona (2240 lb) = 1016 kg; 1 metrična tona = 1000 kg.

BTU in quad

Britanska toplotna enota je zoprna zato, ker ni niti SI enota, niti ni uporabne velikosti. Kakor neuporabni Joule je enostavno premajhna, tako da je potrebno uporabiti smešne predpone kot je »kvadrilijon« (10¹⁵), da bi jo naredili bolj praktično za uporabo.

1 kJ je enak 0,947 BTU. 1 kWh je enak 3409 BTU.

Enota »quad« označuje 1 kvadrilijon BTU = 293 TWh.

Smešne enote

Skodelice čaja

Je to način, kako fotonapetostne module predstaviti ljudem kot dobro idejo? »Ko smo namestili vseh 7000 fotonapetostnih modulov, naj bi ti letno

proizvedli 180.000 enot obnovljive električne energije – ta energija bi za-
doščala za pripravo **devet milijonov skodelic čaja.**» Ta izjava torej enači
1 kWh z energijo 50 skodelic čaja.

Kot prostorninska enota meri 1 ameriška skodelica (polovica ameriške
pinte) uradno 0,24 l; toda skodelica čaja ali kave običajno drži 0,18 l. Da bi
segreli 50 skodelic vode, ki držijo 0,18 l, s 15 °C na 100 °C bi potrebovali
1 kWh energije.

Se pravi da je »devet milijonov skodelic čaja letno« drug izraz za »20 kW«.

Dvonadstropni avtobusi, dvorane Albert Hall in stadioni Wembley

»Če bi vsakdo v Veliki Britaniji, ki bi imel to možnost, vgradil izolacijo v
sendvič stene, bi lahko emisije ogljikovega dioksida zmanjšali za ogromnih
7 milijonov ton. To je toliko ogljikovega dioksida, da bi z njim napolnili
skoraj 40 milijonov dvonadstropnih avtobusov ali pa 900-krat napolnili
novi stadion v Wembleyu!«

Iz tega izvemo koristen podatek, da je prostornina stadiona v Wem-
bleyu enaka prostornini 44.000 dvonadstropnih avtobusov. Pravzaprav je
prostornina Wembleyeve kupole 1.140.000 m³.

»Če bi vsako gospodinjstvo uporabilo zgolj eno varčno žarnico, bi s tem
prihranili dovolj ogljikovega dioksida, da bi z njim napolnili 1980 dvoran
Royal Albert Hall!« (Prostornina dvorane Albert Hall je 100.000 m³.)

Odličen način, kako lahko količino CO₂ predstavimo kot nekaj res ve-
likega, je ta, da jo izrazimo s prostornino raje kot z maso. Če se vam »1 kg
CO₂ na leto« sliši premalo, recite preprosto »200.000 litrov CO₂ na leto«!

Še več prostorninskih enot

Ladijski kontejnerji so 2,4 m široki, 2,6 m visoki ter 6,1 m (TEU) oziroma
12,2 m (FEU) visoki.

En TEU je enota, ki temelji na malem 20-čevljskem kontejnerju, kate-
rega prostornina je približno 33 m³. Večina kontejnerjev, ki se danes upo-
rabljajo, so 40-čevljski kontejnerji z velikostjo 2 TEU. 40-tonski kontejner
tehta 4 tone in lahko prevaža 26 ton blaga. Njegova prostornina je 67,5 m³.

- Prostornina bazena je približno 3000 m³.
- Prostornina dvonadstropnega avtobusa je 100 m³.
- Prostornina balona vročega zraka je 2500 m³.
- Prostornina velike piramide v Gizi je 2.500.000 m³.

Površine

Skupna površina Zemlje je 500 × 10⁶ km², od tega kopna površina meri
150 × 10⁶ km².

Moja tipična britanska hiša s tremi spalnicami meri 88 m². V ZDA je
povprečna površina enodružinske hiše 2330 kvadratnih čevljev (216 m²).

masa CO ₂ ↔ prostornina	
2 kg CO ₂	↔ 1 m ³
1 kg CO ₂	↔ 500 litrov
44 g CO ₂	↔ 22 litrov
2 g CO ₂	↔ 1 liter

Tabela I.3 »Pretvorba« masa-prostornina
(kolikšen volumen ustreza določeni masi CO₂).



Slika I.4 Dvajset-čevljski ladijski kontejner
(1 TEU).

hektar	= 10 ⁴ m ²
aker	= 4050 m ²
kvadratna milja	= 2,6 km ²
kvadratni čevlj	= 0,093 m ²
kvadratni yard	= 0,84 m ²

Tabela I.5 Površine.

Moči

Če moči dodamo oznako »e«, to pomeni, da gre izrecno za električno moč. Tako na primer elektrarna zagotavlja 1 GW_e, kemično energijo pa porablja z močjo 2,5 GW.

Raba zemljišč	Površina na prebivalca (m ²)	Odstotni delež
– stanovanjske zgradbe	30	1,1
– hišni vrtovi	114	4,3
– druge zgradbe	18	0,66
– ceste	60	2,2
– železnica	3,6	0,13
– poti	2,9	0,11
– zelene površine	2335	87,5
– vodne površine	69	2,6
– drugo	371,4	
Skupaj	2670	100

Tabela I.6 Površine zemljišč v Angliji, ki so namenjena za različno uporabo. Vir: Generalized Land Use Database Statistics for England 2005. [3b7zdf]

1000 BTU na uro = 0,3 kW = 7 kWh/d						
1 konjska moč (1 KM) = 0,75 kW = 18 kWh/d						
1 kW = 24 kWh/d						
1 term	=	29,31 kWh				
1000 BTU	=	0,2931 kWh				
1 MJ	=	0,2778 kWh				
1 GJ	=	277,8 kWh				
1 toe (tona naftnega ekvivalenta)	=	11 630 kWh				
1 kcal	=	1,163 × 10 ⁻³ kWh				
1 kWh	=	0,03412	3412	3,6	86 × 10 ⁻⁶	859,7
		terma	BTU	MJ	toe	Kcal

Okvir I.7 Kako so druge enote za energijo in moč povezane s kilovatno uro in kilovatno uro na dan.

Podobno pa oznaka »t« pomeni, da gre za toplotno moč, enako oznako pa lahko uporabimo tudi kadar govorimo o količini energije. Primer: »Moja hiša porablja 2 kWh_e električne energije na dan.«

Če moči dodamo oznako »p«, pomeni, da gre za vršno moč oziroma zmogljivost. Na primer, 10 m² modulov zagotavlja moč 1 kWp.

1 kWh/d = 1/24 kW.

1 toe/y = 1,33 kW.

Bencin iz nalive ročke izteka s hitrostjo približno pol litra na sekundo. To ustreza pretoku energije, ki je »vgrajena« v bencinu 5 kWh na sekundo oziroma 18 MW.

Moč dirkalnega avtomobila Formula 1 je 560 kW. Potreba po energiji v Veliki Britaniji je 17 kWh na dan na prebivalca oziroma 42,5 GW na državo.

»Ena tona« klimatizacije oziroma hlajenja ene tone zraka zahteva moč 3,5 kW.

Svetovne potrebe po moči

Skupne svetovne potrebe po moči znašajo 15 TW, skupne potrebe po električni moči pa 2 TW.

Uporabni faktorji pretvorbe

Da bi TWh na leto pretvorili v GW, delite vrednost z 9.
1 kWh/d na prebivalca je enako kot 2,5 GW za Veliko Britanijo oziroma 22 TWh/leto za Veliko Britanijo.
Podatek v mpg (milje na britansko galono) spremenite v km/l tako, da številko delite s 3.
Pri sobni temperaturi, $1\text{ kT} = \frac{1}{40}\text{ eV}$
Pri sobni temperaturi, 1 kT na molekulo = 2,5 kJ/mol.

Odčitavanje števca

- Kako pretvoriti številke z vašega plinskega števca porabe v kilovatne ure:
- Če je vaš števec nastavljen na prikaz porabe v **100 kubičnih čevljih**, potem odčitano porabo plina pomnožite z **32,32** in dobite količino porabljene energije v kWh.
 - Če je poraba prikazana v **kubičnih metrih** plina, odčitano količino pomnožite z **11,42** in dobite porabo energije v kWh.

Kalorične vrednosti goriv

Surova nafta: 37 MJ/l; 10,3 kWh/l.
Zemeljski plin: 38 MJ/m³. (Gostota metana je 1,819 kg/m³.)
1 tona premoga: 29,3 GJ; 8000 kWh.
Fuzijska energija navadne vode: 1800 kWh na liter.
Glejte tudi tabelo 26.14 na strani 199 ter tabelo D.3 na strani 284.

Specifične toplote

Specifična toplota zraka je 1 kJ/(kg°C), oziroma 29 J/(mol°C), njegova gostota pa 1,2 kg/m³. Specifična toplota zraka na enoto prostornine je 1,2 kJ/(m³°C).
Izparilna toplota vode: 2257,92 kJ/kg. Specifična toplota vodne pare (hlapov): 1,87 kJ/(kg°C). Specifična toplota vode je 4,2 kJ/(l°C).
Gostota pare je 0,590 kg/m³.

	kWh/t-km
celinske vode	0,083
železniški promet	0,083
cestni tovorni promet	0,75
zračni promet	2,8
naftovod	0,056
plinovod	0,47
mednarodni kontejnerski transport	0,056
mednarodni transport razsutega tovora	0,056
mednarodni transport s tankerji	0,028

Tabela I.8 Energijska intenzivnost različnih vrst transporta v ZDA. Vir: Weber in Matthews (2008).

Tlak

Atmosferski tlak: 1bar $\cong$ 10⁵ Pa (pascal). Tlak na globini 1000 m pod vodo: 100 barov. Tlak na globini 3000 m pod vodo: 300 barov.

Denar

Povsod, kjer navajam denarne vrednosti, sem upošteval naslednje menjalne tečaje: 1 EUR = 1,26 USD; 1 GBP = 1,85 USD; 1 USD = 1,12 CAD. Te vrednosti so veljale v sredini 2006.

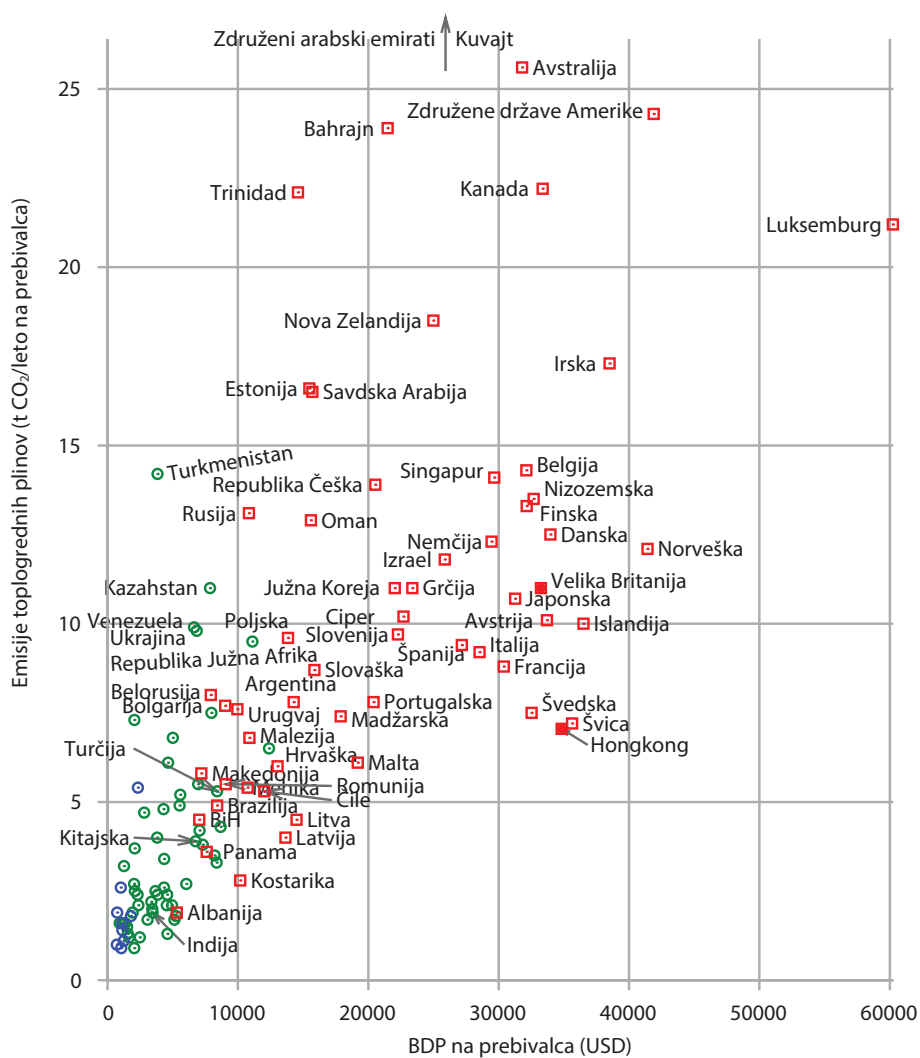
Pretvorbeni faktorji za izpuste toplogrednih plinov

Francija	83		
Švedska	87		
Kanada	220		
Avstrija	250		
Belgija	335		
Evropska unija	353		
Finska	399		
Španija	408		
Japonska	483		
Portugalska	525		
Velika Britanija	580		
Luksemburg	590		
Nemčija	601		
ZDA	613		
Nizozemska	652		
Italija	667		
Irska	784		
Grčija	864		
Danska	881		

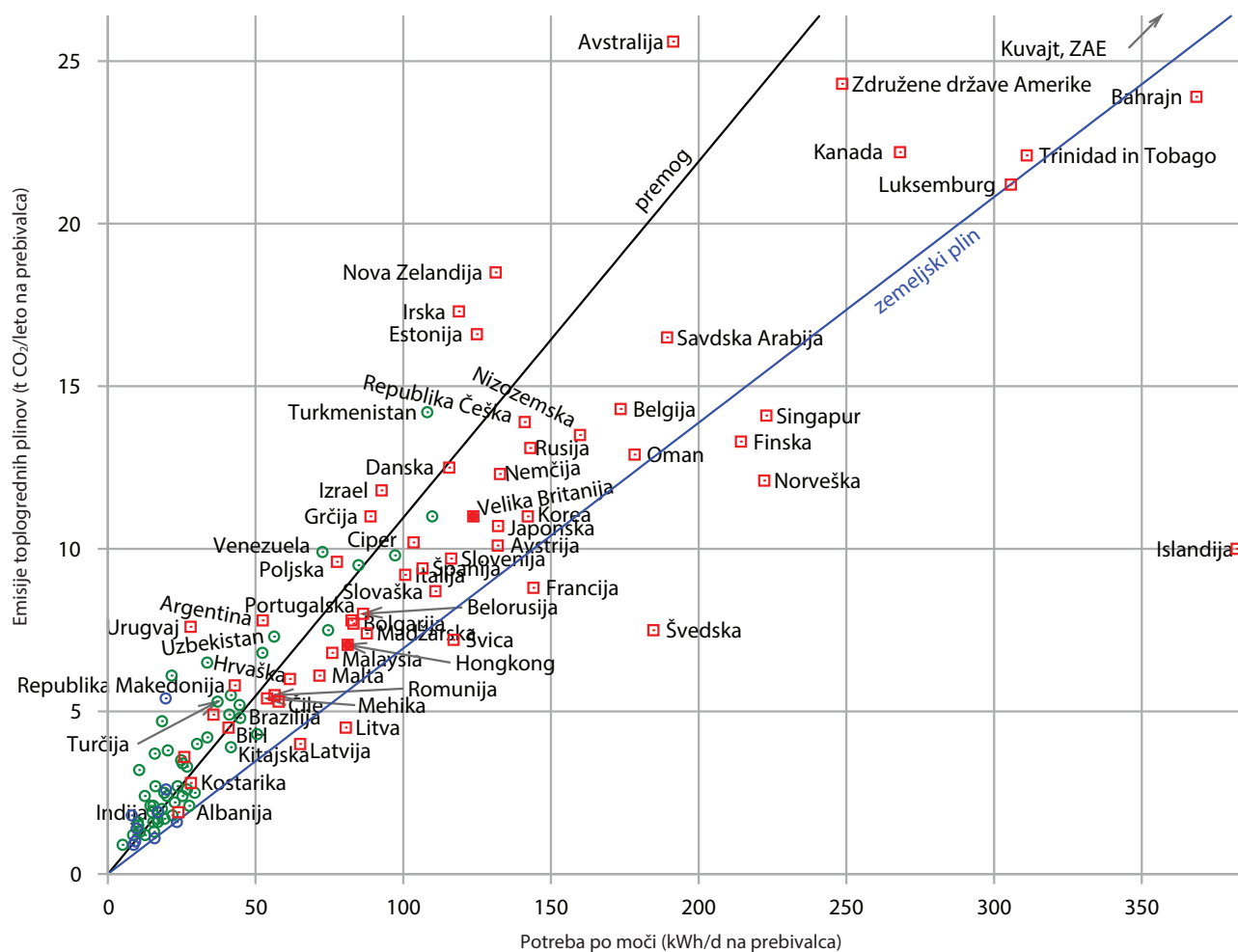
Tip goriva	Izpusti (v g CO ₂ na kWh kemične energije)
zemeljski plin	190
rafinerijski plin	200
etan	200
UNP	210
reaktivni kerozin	240
bencin	240
plinsko/dizel olje	250
težko kurilno olje	260
primarni bencin	260
črn premog za koksanje	300
premog	300
naftni koks	340

Slika I.9 Ogljična intenzivnost pri proizvodnji električne energije (g CO₂ na kWh električne energije).

Slika I.10 Izpusti zaradi izgorevanja goriv.
Vir: DEFRA, Environmental Reporting Guidelines for Company Reporting on Greenhouse Gas Emissions.



Slika I.11 Izpusti toplogrednih plinov na prebivalca glede na BDP na prebivalca v ameriških dolarjih (USD), prilagojenih glede na pariteto kupne moči. Kvadratki prikazujejo države z »visokim indeksom človeškega razvoja«, krogi pa države s »srednjim« ali »nizkim« indeksom. Glejte tudi sliki 30.1 (str. 231) in 18.4 (str. 105). Vir: UNDP Human Development Report, 2007. [3av4s9]



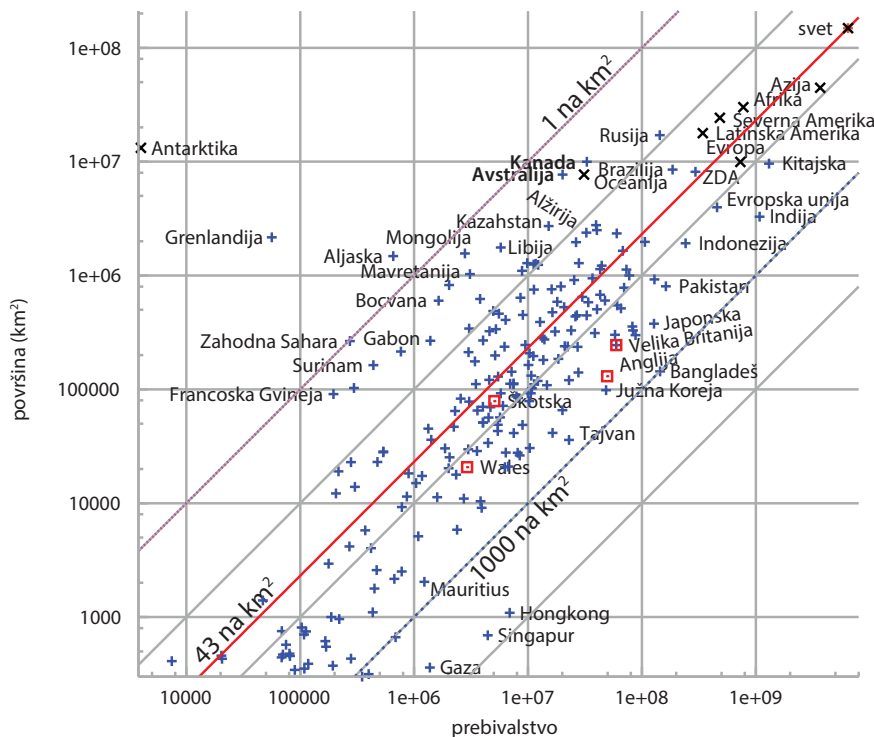
Slika I.12 Izpusti toplogrednih plinov na prebivalca glede na potrebo po moči na prebivalca. Premice kažejo izpustno intenzivnost premoga in zemeljskega plina. Kvadrati prikazuje države z »visokim indeksom človeškega razvoja«, krogi pa države s »srednjim« ali »nizkim« indeksom. Glejte tudi slike 30.1 (str. 231) in 18.4 (str. 105). Vir: UNDP Human Development Report, 2007.

J Prebivalstvo in površine

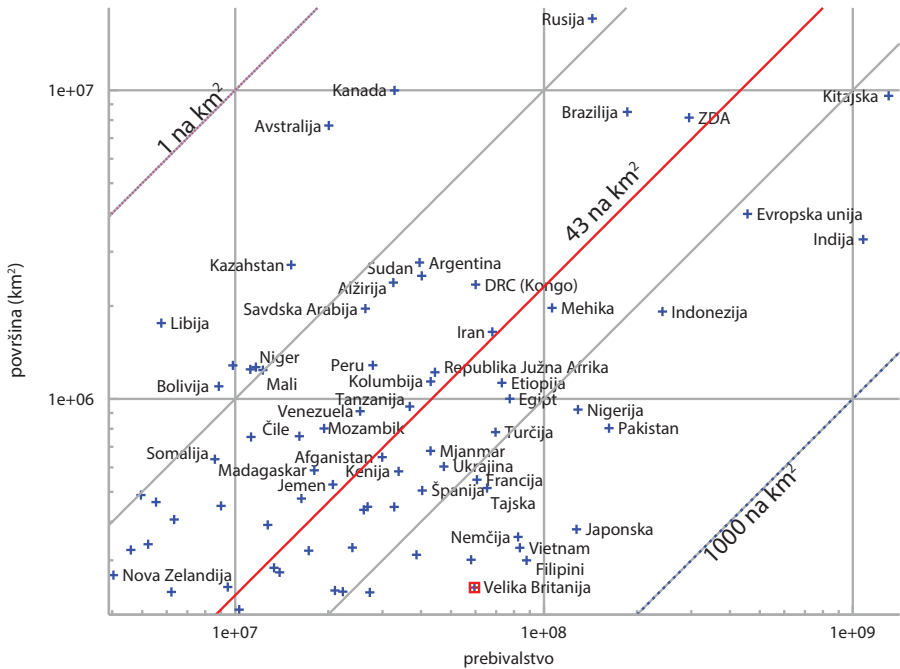
Gostota poseljenosti

Slika J.1 prikazuje razmerje med površinami različnih regij in njihovo poseljenostjo. Diagonalne črte na grafu predstavljajo konstantne gostote poseljenosti. Gostota poseljenosti v Bangladešu, ki se nahaja na predzadnji diagonali od leve proti desni, je 1000 prebivalcev na kvadratni kilometer. Številke v Indiji, Angliji, na Nizozemskem in Japonskem znašajo tretjino tega, približno 350 prebivalcev na km^2 . V mnogih evropskih državah je gostota poseljenosti približno 100 prebivalcev na km^2 . Druga skrajnost so države, kot so Kanada, Avstralija in Libija, kjer gostota poseljenosti znaša le približno tri prebivalce na km^2 . Srednja diagonalna prikazuje gostoto poseljenosti našega planeta, ki je 43 prebivalcev na kvadratni kilometer. S tega vidika je Amerika povprečna država, saj je število prebivalcev na kvadratni kilometer v 48 zveznih državah enako svetovnemu povprečju. Regije, ki so po velikosti obsežne, njihova gostota poseljenosti pa je pod povprečjem, so Rusija, Kanada, Latinska Amerika, Sudan, Alžirija in Savdska Arabija.

Od teh bolj prostranih držav so nekatere, ki so blizu Veliki Britaniji in bi z njimi torej želela slednja imeti prijateljske stike. Te so Kazahstan, Libija, Savdska Arabija, Alžirija in Sudan.



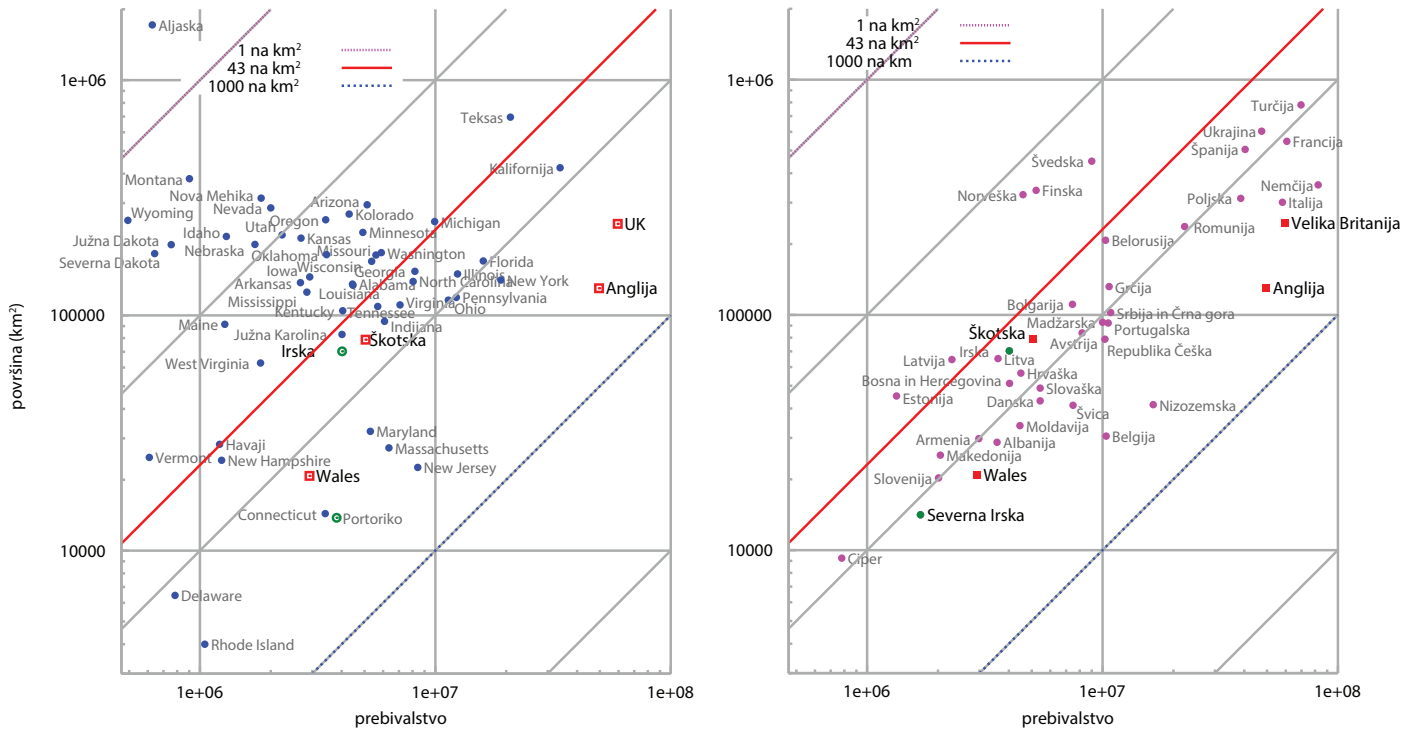
Slika J.1 Poseljenost ter površine držav in globalnih regij. Obe merili sta logaritemski. Vsaka poševna črta določa gostoto poseljenosti. Najbolj gosto poseljene države so v spodnjem desnem delu, države z redkejšo gostoto poseljenosti pa se nahajajo v zgornjem levem delu. Ti podatki so prikazani tudi v tabeli na strani 341.



Slika J.2 Poseljenost ter površine držav in globalnih regij. Obe merili sta logaritemski. Poševnice predstavljajo konstantno gostoto poseljenosti. Ta slika prikazuje detajl iz slike J.1 (str. 338). Podatki so prikazani tudi v tabeli na strani 341.

Regija	Prebivalstvo	Površina (km ²)	Prebivalci na km ²	Površina na prebivalca (m ²)
Svet	6.440.000.000	148.000.000	43	23.100
Azija	3.670.000.000	44.500.000	82	12.100
Afrika	778.000.000	30.000.000	26	38.600
Evropa	732.000.000	9.930.000	74	13.500
Severna Amerika	483.000.000	24.200.000	20	50.200
Latinska Amerika	342.000.000	17.800.000	19	52.100
Oceanija	31.000.000	7.680.000	4	247.000
Antarktika	4000	13.200.000		

Tabela J.3 Gostota poseljenosti posameznih celin. Podatki so prikazani tudi na grafih J.1 in J.2. Podatki so iz leta 2005.



Slika J.4 Poseljenost in površine ameriških zveznih držav in regij Evrope.

Regija	Št. prebivalcev	Površina (km ²)	Št.preb na km ²	Površina na prebivalca (m ²)	Regija	Št. prebivalcev	Površina (km ²)	Št.preb na km ²	Površina na prebivalca (m ²)
Afganistan	29.900.000	647.000	46	21.600	Latvija	2.290.000	64.500	35	28.200
Afrika	778.000.000	30.000.000	26	38.600	Libija	5.760.000	1.750.000	3,3	305.000
Aljaska	655.000	1.480.000	0,44	2.260.000	Litva	3.590.000	65.200	55	18.100
Albanija	3.560.000	28.700	123	8060	Madagaskar	18.000.000	587.000	31	32.500
Alžirija	32.500.000	2.380.000	14	73.200	Madžarska	10.000.000	93.000	107	9290
Anglija	49.600.000	130.000	380	2630	Makedonija	2.040.000	25.300	81	12.300
Angola	11.100.000	1.240.000	9	111.000	Mali	12.200.000	1.240.000	10	100.000
Antarktika	4000	13.200.000			Malta	398.000	316	1260	792
Argentina	39.500.000	2.760.000	14	69.900	Mavretanija	3.080.000	1.030.000	3	333.000
Azija	3.670.000.000	44.500.000	82	12.100	Mehika	106.000.000	1.970.000	54	18.500
Avstralija	20.000.000	7.680.000	2,6	382.000	Mjanmar	42.900.000	678.000	63	15.800
Avstrija	8.180.000	83.800	98	10.200	Moldavija	4.450.000	33.800	131	7590
Bangladeš	144.000.000	144.000	1000	997	Mongolija	2.790.000	1.560.000	1,8	560.000
Belorusija	10.300.000	207.000	50	20.100	Mozambik	19.400.000	801.000	24	41.300
Belgija	10.000.000	31.000	340	2945	Namibija	2.030.000	825.000	2,5	406.000
Bolivija	8.850.000	1.090.000	8	124.000	Nemčija	82.400.000	357.000	230	4330
Bosna in Hercegovina	4.020.000	51.100	79	12.700	Niger	11.600.000	1.260.000	9	108.000
Bocvana	1.640.000	600.000	2,7	366.000	Nigerija	128.000.000	923.000	139	7170
Bolgarija	7.450.000	110.000	67	14.800	Nizozemska	16.400.000	41.500	395	2530
Brazilijska	186.000.000	8.510.000	22	45.700	Norveška	4.593.000	324.000	14	71.000
CAR	3.790.000	622.000	6	163.000	Nova Zelandija	4.030.000	268.000	15	66.500
Čad	9.820.000	1.280.000	8	130.000	Oceanija	31.000.000	7.680.000	4	247.000
Češka	10.200.000	78.800	129	7700	Pakistan	162.000.000	803.000	202	4940
Čile	16.100.000	756.000	21	46.900	Peru	27.900.000	1.280.000	22	46.000
Danska	5.430.000	43.000	126	7930	Poljska	39.000.000	313.000	124	8000
DRC (Kongo)	60.000.000	2.340.000	26	39.000	Portugalska	10.500.000	92.300	114	8740
Egipt	77.500.000	1.000.000	77	12.900	Romunija	22.300.000	237.000	94	10.600
Estonija	1.330.000	45.200	29	33.900	Rusija	143.000.000	17.000.000	8	119.000
Etiopija	73.000.000	1.120.000	65	15.400	Savdska Arabija	26.400.000	1.960.000	13	74.200
Evropa	732.000.000	9.930.000	74	13.500	Severna Amerika	483.000.000	24.200.000	20	50.200
Evropska unija	496.000.000	4.330.000	115	8720	Singapur	4.420.000	693	6380	156
Filipini	87.800.000	300.000	292	3410	Slovaška	5.430.000	48.800	111	8990
Finska	5.220.000	338.000	15	64.700	Slovenija	2.010.000	20.200	99	10.000
Francija	60.600.000	547.000	110	9010	Somalija	8.590.000	637.000	13	74.200
Gaza	1.370.000	360	3820	261	Srbija & Črna Gora	10.800.000	102.000	105	9450
Grčija	10.600.000	131.000	81	12.300	Sudan	40.100.000	2.500.000	16	62.300
Grenlandija	56.300	2.160.000	0,026	38.400.000	Surinam	438.000	163.000	2,7	372.000
Hrvaška	4.490.000	56.500	80	12.500	Svet	6.440.000.000	148.000.000	43	23.100
Hong Kong	6.890.000	1090	6310	158	Škotska	5.050.000	78.700	64	15.500
Indija	1.080.000.000	3.280.000	328	3040	Španija	40.300.000	504.000	80	12.500
Indonezija	241.000.000	1.910.000	126	7930	Švedska	9.000.000	449.000	20	49.900
Iran	68.000.000	1.640.000	41	24.200	Švica	7.480.000	41.200	181	5510
Irska	4.010.000	70.200	57	17.500	Tajska	65.400.000	514.000	127	7850
Islandija	296.000	103.000	2,9	347.000	Tajvan	22.800.000	35.900	636	1570
Italija	58.100.000	301.000	192	5180	Tanzanija	36.700.000	945.000	39	25.700
Japonska	127.000.000	377.000	337	2960	Turčija	69.600.000	780.000	89	11.200
Jemen	20.700.000	527.000	39	25.400	Ukrajina	47.400.000	603.000	78	12.700
Južna Afrika	44.300.000	1.210.000	36	27.500	<i>Velika Britanija</i>	59.500.000	244.000	243	4110
Južna Koreja	48.400.000	98.400	491	2030	Venezuela	25.300.000	912.000	28	35.900
Kanada	32.800.000	9.980.000	3,3	304.000	Vietnam	83.500.000	329.000	253	3940
Kazahstan	15.100.000	2.710.000	6	178.000	Wales	2.910.000	20.700	140	7110
Kenija	33.800.000	582.000	58	17.200	Zahodna Sahara	273.000	266.000	1	974.000
Kitajska	1.300.000.000	9.590.000	136	7340	Zambija	11.200.000	752.000	15	66.800
Kolumbija	42.900.000	1.130.000	38	26.500	ZDA (brez Aljaske)	295.000.000	8.150.000	36	27.600
Latinska Amerika	342.000.000	17.800.000	19	52.100					

Tabela J.5 Regije in gostota poseljenosti. Odebeljeni so podatki, kjer število prebivalcev presega 50 milijonov, površina regije pa je večja od 5 milijonov km². Podatki so grafično prikazani na sliki J.1 (str. 338). Podatki so iz leta 2005.

K Oris trajnostnih energetske priložnosti za Slovenijo

Razumna razprava o trajnostnih virih energije in energetski prihodnosti terja številke in Slovenija pri tem ni izjema. Skupaj z avtorjem knjige prof. Davidom J. C. MacKayem smo v tem poglavju zbrali nekaj ključnih števil in v grobem orisali enega od možnih trajnostnih energetskih kaŕipotov za Slovenijo; takega, ki se glede na fizikalne in prostorske omejitve izide.

Kot je tudi drugod v knjigi, podatke o porabi in proizvodnji energije izrazimo v kilovatnih urah. Eno kilovatno uro (1 kWh) energije porabimo, če imamo ves dan (24 ur) priŕgano 40-vatno (40 W) ŕarnico. Vzemimo za občutek nekaj vsakdanjih primerov količine porabljene energije:

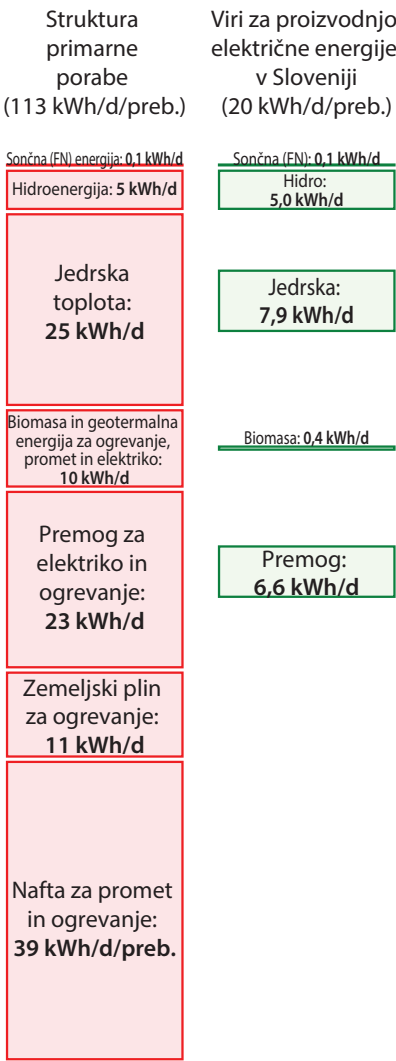
- kemična energija v hrani, ki jo dnevno zauŕijemo, znaša pribliŕno 3 kWh;
- če se vsak dan okopamo v vroči kopeli, porabimo pribliŕno 5 kWh toplote na dan;
- povprečen slovenski avto porabi pribliŕno 7 litrov goriva na prevoŕnih 100 kilometrov in z njim dnevno prevozimo povprečno 35 km; to pomeni porabo energije v viŕini 24 kWh na dan.¹

Poraba v Sloveniji znaša povprečno 113 kWh na dan na prebivalca

Če **primarno porabo energije** v Sloveniji razdelimo med vse prebivalke in prebivalce, ugotovimo, da porabi vsak od nas **pribliŕno 113 kWh na dan (krajše: 113 kWh/d/preb.)**.² Enako rabo energije bi v enem dnevu povzročili s 113 nepretrgoma gorečimi 40-vatnimi ŕarnicami.

To je podatek o primarni (ali skupni) rabi energije, ki zajema rabo energije za **vse oblike prometa** (kar znese dobrih 33 kWh/d/preb.), **za ogrevanje in toploto** (v gospodinjstvih in industriji; skupaj 28 kWh/d/preb.), za rabo **električne energije** (v gospodinjstvih in industriji; skupaj 20 kWh/d/preb.), vključuje pa tudi **izgube pri pretvorbah** (med drugim tudi odpadna toplota; slabih 32 kWh/d/preb.).³

Kot je razvidno iz slike K.1, dobimo precej več kot polovico energije (73 od 113 kWh/d/preb.) iz fosilnih goriv; od tega pribliŕno 39 kWh/d/preb. iz uvoŕzene nafte in naftnih proizvodov (predvsem za potrebe prometa), 11 kWh/d/preb. iz uvoŕzenega zemeljskega plina (predvsem za ogrevanje) ter 23 kWh/d/preb. iz premoga (predvsem za električno energijo).



Slika K.1 Primarna poraba energije v Sloveniji znaša pribliŕno 113 kWh na dan na prebivalca. Levi stolpec prikazuje primarne vire energije (fosilna goriva, biomasa, jedrska energija, hidroenergija in sončna energija) in njihove prispevke v strukturi primarne porabe. Od teh virov nekatere pretvarjamo v električno energijo, kar prikazuje desni stolpec (prispevki posameznih virov za proizvodnjo elektrike).

1 Povprečno število prevoŕenih kilometrov osebnega avtomobila v Sloveniji je 12.604 km na leto. Povprečna poraba goriva znaša 7,0 l na 100 km. Vir: SURS, 2011.

2 Podatek je zaradi preglednosti in laŕje zapomnljivosti zaokroŕen s 112,75 kWh/d/preb. Vir: SURS, 2011.

3 Če izgub ne upoštevamo, govorimo o **končni porabi energije**, ta pa znaša za Slovenijo slabih 82 kWh na dan na prebivalca in je prikazana na sliki K.2. Vir: SURS, 2011.

Tudi pri proizvodnji elektrike (20 kWh/d/preb.) igrajo fosilna goriva pomembno vlogo, saj iz njih pridobimo približno tretjino celotne električne energije. Vendar smo pri proizvodnji električne energije že bolj trajnostno usmerjeni: skoraj 40 % je pridobimo iz jedrske energije,⁴ 25 % pa iz hidroenergije. Drugi obnovljivi viri (biomasa, sončna in geotermalna energija) prispevajo v strukturo virov za proizvodnjo električne energije v Sloveniji skupaj manj kot 3 %.

Slovenija proti 2050 (in naprej): Kakšne trajnostne energetske možnosti imamo?

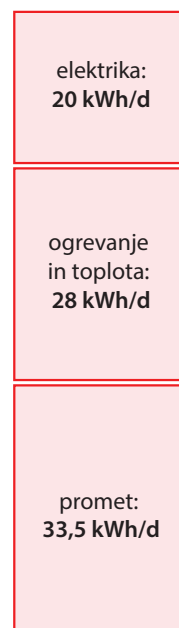
Poglejmo, kakšne so trajnostne energetske priložnosti za Slovenijo, ki se izidejo. Možnih je veliko kažipotov, vsak pa ima svoje dobre in slab(š)e strani. Izhajamo iz fizikalnih omejitev posameznih trajnostnih virov energije (moč na enoto površine, W/m²), ki narekujejo njihove *realne* proizvodne zmogljivosti, ob tem pa upoštevamo tudi prostorske zmogljivosti naše države. To je zdrav *temelj* vsakega razumnega energetskega načrta. Ob strani pa puščamo druge, relevantne ekonomske (stroški), okoljske (vplivi na okolje) in družbene (zanesljivost oskrbe, družbena sprejemljivost energetskih objektov) dejavnike, ki se v kalkulacije vključijo *kasneje*, ob iskanju kompromisov med raznolikimi, fizikalno in prostorsko izvedljivimi možnostmi.

Za izhodišče vzemimo potrebo po uravnavanju količine proizvedene energije z njeno porabo. Pri tem po eni strani predpostavimo sorazmerno ambiciozne ukrepe za zmanjšanje porabe energije oziroma njeno učinkovitejšo rabo, po drugi strani pa se zavzamemo za znatno krepitev rabe trajnostnih (tj. nefosilnih) virov energije.

Poglejmo najprej **priložnosti za zmanjšanje porabe oziroma učinkovito rabo energije (URE)**. Za Slovenijo so med obetavnejšimi ukrepi URE tisti na področju elektrifikacije prometa, izboljšanja energetske učinkovitosti stavb, sprememb načina ogrevanja s prehodom na uporabo toplotnih črpalk ter spodbujanja soproizvodnje toplote in električne energije. Predpostavimo, da lahko iz naslova teh in še nekaterih drugih ukrepov URE primarno rabo **zmanjšamo za 30 %**, torej z obstoječih 113 na približno **80 kWh/d/preb.**⁵. Seveda je zaželeno še radikalnejše zmanjšanje porabe, ki pa hkrati ne sme omejevat želeno rasti gospodarstva, razvoja podeželja, ki potrebuje večjo mobilnost, in nekaterih drugih strateških razvojnih ciljev, ki terjajo energijo.

Kar zadeva krepitev rabe trajnostnih virov energije, torej iščemo kombinacije, ki se po fizikalnih zakonitostih in prostorskih posledicah v Sloveniji

Struktura končne porabe energije v Sloveniji



Slika K.2 Končna poraba energije v Sloveniji znaša slabih 82 kWh na dan na prebivalca in ne upošteva izgub pri pretvorbah (med drugim tudi odpadne toplote), ki so zajete v primarni porabi energije. V strukturi končne rabe zaseda prvo mesto promet (33,5 kWh/d/preb.), sledita ogrevanje (dobrih 28 kWh/d/preb.) in poraba elektrike (skoraj 20 kWh/d/preb.) v gospodinjstvih in industriji.

4 Od tega Sloveniji skladno z meddržavno pogodbo med Republiko Slovenijo in Republiko Hrvaško pripada le polovica proizvedene električne energije iz Nuklearne elektrarne Krško (NEK).

5 Točnejši rezultat je 79 kWh/d/preb., vendar ga zaradi lažje predstavitve nadaljnjih podatkov o možnih trajnostnih virih energije za Slovenijo namenoma zaokrožimo navzgor, na 80 kWh/d/preb.

izidejo in s katerimi nam uspe pokriti predvideno prihodnjo (za 30 % nižjo od današnje) primarno porabo energije. Pri tem se ne ukvarjamo z natančno razporeditvijo te energije po različnih oblikah in načinih porabe, temveč le grobo (in konservativno) predpostavimo, da bomo zaradi povečanja uporabe električnih vozil in toplotnih črpalk potrebovali še večji delež te energije v obliki električne energije. Tako iščemo vire, iz katerih primarno proizvajamo to obliko energije.

A naj poudarimo: podatki, ki jih obravnavamo v nadaljevanju, so nenatančni in namenoma (ponekod zelo) grobo zaokroženi, a so zato verjetno toliko bolj ilustrativni in zapomnljivi. Prav to je naš namen: podati le grob oris enega od možnih trajnostnih energetskega kašipotov za Slovenijo in hkrati vizualizirati prostorske posledice predlaganega izbora virov energije na ozemlju naše države.

Ocenjujemo, da imajo med razpoložljivimi trajnostnimi viri oziroma tehnologijami v slovenskem prostoru največji potencial naslednji (navajamo jih po abecednem vrstnem redu):

- biomasa,
- hidroenergija,
- jedrska energija,
- sončna energija in
- vetrna energija.

Želeno količino 80 kWh energije na dan na prebivalca smo najprej želeli pokriti z navedenimi petimi trajnostnimi viri v enakovrednih deležih po formuli $5 \times 16 \text{ kWh/d/preb.} = 80 \text{ kWh/d/preb.}$. Vendar je potencial **hidroenergije** (v Sloveniji in tudi drugod) dobro poznan in navzgor jasno omejen. Razpoložljiv potencial *vseh* slovenskih vodotokov je v primerjavi z Veliko Britanijo res velik, a vseeno znaša samo 12 kWh/d/preb. Ker čisto vseh vodotokov verjetno ne bomo zaježili, smo temu viru zato pripisali **10 kWh/d/preb.**, kar terja podvojitev današnjih razpoložljivosti. Za slovenski prostor to pomeni zaježitev vseh pomembnih slovenskih rek, z izjemo zgornjega dela reke Soče.⁶

Podobno naletimo na znatne omejitve tudi pri vetrni energiji. Povprečne hitrosti vetra so v Sloveniji veliko manjše kot v Veliki Britaniji in le na redkih območjih presegajo hitrosti, ki so potrebne za zagon vetrnih elektrarn (tj. med 3 in 5 m/s). V Sloveniji so primerna mesta za postavitev vetrnih elektrarn z ustreznimi hitrostmi vetra samo na gorskih grebenih. Za pridobitev **10 kWh/d/preb. iz vetrne energije** bi potrebovali 400 km² površin za postavitev vetrnih elektrarn na gorskih grebenih, kar pomeni praktično vse gorske grebene v Sloveniji, na katerih bi stalo 4.000 vetrnih elektrarn nazivne moči 1 MW. Z zornega kota posameznikov oziroma skupnosti bi to pomenilo, da bi na vsakih 500 prebivalcev potrebovali 1 vetrno elektrarno omenjene nazivne moči.

⁶ 10 kWh/d/preb. iz hidroenergije pomeni poleg obstoječih hidroelektrarn na Dravi, Savi in Soči še zaježitev *celotnih* vodotokov Save in Mure ter predpostavlja dodatno 10-kratno povečanje obstoječih zmogljivosti malih hidroelektrarn na manjših rekah in potokih.

Če menite, da smo zmogljivosti vetrne energije glede na prostorske posledice precenili, se še vedno lahko vrnemo k hidroenergiji in zajezimo še zgornji del reke Soče in ostale vodotoke ter tako pričakovanja glede vetrne energije zmanjšamo za približno 2 kWh/d/preb. A gremo raje naprej, k drugim trajnostnim energetskim možnostim.

Če vetrna in hidroenergija torej skupaj prispevata četrtno za zadovoljitev skupne rabe (20 kWh/d/preb.), bomo manjkajočih 60 kWh/d/preb. v našem poenostavljenem orisu pokrili z ostalimi tremi ključnimi trajnostnimi viri energije, torej z biomaso, jedrsko in sončno energijo, in sicer za začetek enakomerno razdeljeno na tri dele: $3 \times 20 \text{ kWh/d/preb.} = 60 \text{ kWh/d/preb.}$

Za zagotovitev **20 kWh/d/preb. iz biomase** bi potrebovali površino 3.400 km² kakovostnih slovenskih njiv. Slovenija jih trenutno premore 1.700 km². To pomeni, da bi morali podvojiti slovenske obdelovalne površine, predvsem pa bi morali vse uporabiti izključno za proizvodnjo biomase za energijo. Nanje bi torej posadili najboljše energijske rastline, na primer oljnice (ogrščica, repica, soja, sončnica), katerih moč na enoto površine znaša do 0,5 W/m².⁷ Položaj se bistveno poslabša, če namesto njiv uporabimo biomaso iz gozda, ker je energijska vrednost gospodarskega gozda 0,25 W/m².⁸ V tem primeru potrebujemo za enako količino energije vsaj dvakratnik navedene površine, torej več kot 7.000 km² (kar pomeni skoraj vse slovenske gozdove⁹) oziroma vsaj 3.500 m² gozda na prebivalko ali prebivalca naše dežele.

Za proizvodnjo **20 kWh/d/preb. elektrike iz jedrske energije** potrebujemo jedrsko elektrarno z dvema enotama s skupno nazivno močjo približno 1.900 MW. To pomeni na primer razširitev obstoječe jedrske elektrarne z dodatno enoto z močjo 1.200 MW. To lahko v Sloveniji zgradimo na površini približno 1 km².¹⁰

Za oskrbo z **20 kWh/d/preb. iz sončne energije** bi morali fotonapetostne naprave, ki bi zagotavljale moč na površino 6 W/m², namestiti na 280 km² velikem fotonapetostnem polju ali pa fotonapetostne module vgraditi na 83 km² poševnih streh (v tem primeru bi upoštevali moč na enoto površine 20 W/m²).¹¹ Preračunano na osebo to pomeni površino 42 m² fotonapetostnih modulov na posameznika.¹²

7 0,5 W/m² je največja povprečna moč energijskih rastlin v obliki biogoriv v Evropi brez upoštevanja energije, potrebne za predelavo. Vir: poglavje 6, slika 6.11 v tej knjigi.

8 0,25 W/m² ali manj. Vir: poglavje 6, slika 6.11 v tej knjigi.

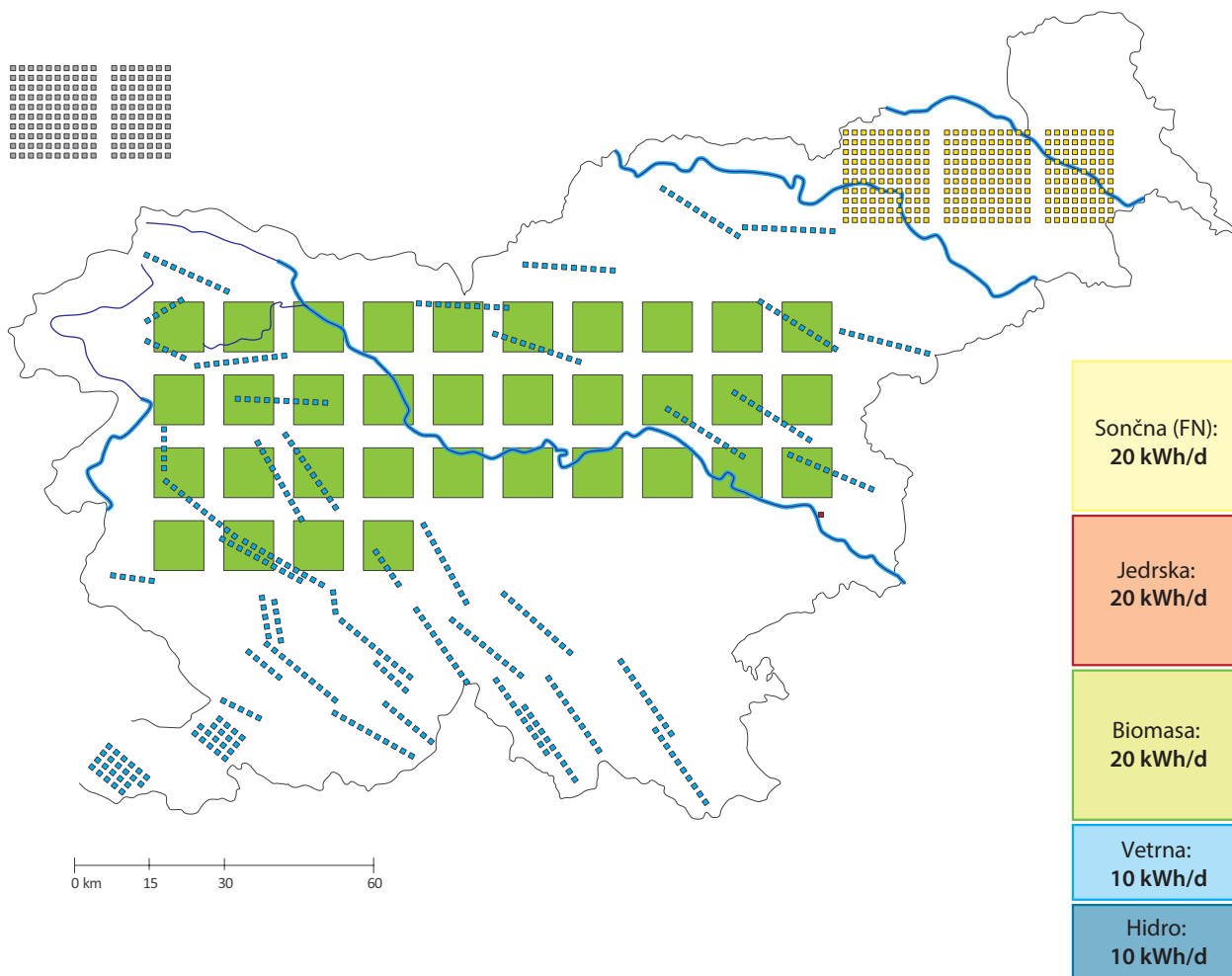
9 Do enakega podatka pridemo tudi, če uporabimo podatek o možnem trajnostnem poseku v Sloveniji, ki znaša približno 7 milijonov m³ na leto. Ob povprečni kurilni vrednosti lesa to pomeni malo manj kot 18 kWh/d/preb.

10 Površina 1 km² zajema prostor, potreben za umestitev jedrske elektrarne z dvema enotama, skupne nazivne moči 1900 MW, in pripadajočega odlagališča radioaktivnih odpadkov.

11 Do podatka 6 W/m² smo prišli na osnovi realnih podatkov obratujočih fotonapetostnih elektrarn na tleh in ravnih strehah v Sloveniji. Ta številka je večja, kot velja na primer za Veliko Britanijo ali Nemčijo, saj je povprečna sončna obsevanost v Sloveniji večja od tiste v državah severno od nas. Če fotonapetostne elektrarne vgradimo v poševne, na jug obrnjene strehe in uporabimo module z večjim izkoristkom, se povprečna moč poveča na 20 W/m². V tem primeru lahko potrebno površino ustrezno zmanjšamo.

12 Tlorisna površina vseh stavb, vrisanih v Kataster RS, znaša 83 m² na prebivalca.

Podatke o površinah, potrebnih za namestitev posameznih tehnologij za proizvodnjo električne energije, prikazujemo na sliki K.3.



Slika K.3 Oris trajnostnih energetskih priložnosti za Slovenijo.

Poudarjeni so deli rek, ki bi jih morali zaježiti, da bi pridobili predvidene količine elektrike iz **hidroelektrarn** (to vključuje Sočo dolvodno od Mosta na Soči, celotno Savo dolvodno od Jesenic ter celotno Dravo in Muro v Sloveniji). Modri kvadrati so površine za **vetrne elektrarne** (vsak kvadrat meri 1 km² in nanj lahko postavimo 100 vetrnih elektrarn), razporejene predvsem po vseh območjih gorskih grebenov oziroma na lokacijah, kjer je povprečna hitrost vetra 50 metrov nad tlemi večja od 3 m/s. Zeleni kvadrati so potrebne površine za njive za proizvodnjo **biomase** (vsak kvadrat predstavlja 100 km²). Rdeč kvadrat prikazuje površino 1 km² za **jedrsko elektrarno**. Rumeni kvadrati (vsak meri 1 km²) predstavljajo potrebne površine za umestitev **fotonapetostnih naprav za izrabo sončne energije**.

Potrebne površine za vse vire energije na zemljevidu prikazujemo v merilu. Za primerjavo smo s sivimi kvadrati prikazali še tlorisno površino vseh stavb v Sloveniji, ki so vrisane v kataster.

Namesto zaključka: Vabilo k začetku

Poudarili smo že in naj na tem mestu ponovimo: navedeni scenarij nikakor ni predlog optimalne energijske mešanice. Je le eden od mnogih možnih energetskih kaŕipotov, ki se po fizikalni in prostorski plati izidejo, četudi temeljijo na grobo zaokroŕenih podatkih in se ne ukvarjajo z nekaterimi ključnimi dejavniki, kot so zanesljivost oskrbe z energijo, konkurenčnost cene, obstoječi prostorski načrti in družbena sprejemljivost umeščanja energetskih objektov v prostor. Prepričani smo tudi, da bodo pravi energetski scenariji vključevali še številne druge ukrepe tako na strani proizvodnje kot tudi porabe energije. Za proizvodnjo so na voljo še drugi trajnostni viri oziroma tehnologije (kot so na primer geotermalna energija, elektrarne na deponijske pline itd.), ki jih tukaj ne omenjamo. Podobno velja za porabo energije, ki jo lahko s spremembami življenjskega sloga (na primer s prehodom z osebnega na javni promet) še koreniteje zmanjšamo.

A osnovno sporočilo bo zelo verjetno ostalo enako: na poti v trajnostno energetsko prihodnost Slovenije bomo potrebovali mnoge, drzne in velikopotezne ukrepe. Upamo, da predstavljene številke prepričljivo nakazujejo obseg potrebnih ukrepov za oblikovanje uresničljivih, tehnično izvedljivih trajnostnih energetskih rešitev.

Œelja pobudnikov projekta krepitve energetske pismenosti EN-LITE in pripravljavcev tega poglavja k slovenskemu prevodu je motiviranje vseh, ki ŕe imate ali si ŕelite pridobiti številke in znanje o energiji za sodelovanje pri oblikovanju možnih, *realističnih*, trajnostnih energetskih kaŕipotov za Slovenijo do 2050 in naprej.

Ekipa projekta krepitve energetske pismenosti EN-LITE, v sodelovanju s prof. Davidom J. C. MacKayem

Bibliografija

- AITCHISON, E. (1996). Methane generation from UK landfill sites and its use as an energy resource. *Energy Conversion and Management*, 37(6/8):1111–1116. doi:10.1016/0196-8904(95)00306-1. www.ingentaconnect.com/content/els/01968904/1996/00000037/00000006/art00306.
- AMOS, W. A. (2004). Updated cost analysis of photobiological hydrogen production from *Chlamydomonas reinhardtii* green algae – milestone completion report. www.nrel.gov/docs/fy04osti/35593.pdf.
- ANDERSON, K., BOWS, A., MANDER, S., SHACKLEY, S., AGNOLUCCI, P. in EKINS, P. (2006). Decarbonising modern societies: Integrated scenarios process and workshops. Technical Report 48, Tyndall Centre. www.tyndall.ac.uk/research/theme2/final_reports/t3_24.pdf.
- ARCHER, M. D. in BARBER, J. (2004). Photosynthesis and photo-conversion. V M. D. Archer in J. Barber, urednika, *Molecular to Global Photosynthesis*. World Scientific. ISBN 978-1-86094-256-3. www.worldscibooks.com/lifesci/p218.html.
- ASHWORTH, W. in PEGG, M. (1986). *The history of the British coal industry. Letnik 5, 1946–1982: the nationalized industry*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282958.
- ASPLUND, G. (2004). Sustainable energy systems with HVDC transmission. V *Power Engineering Society General Meeting*, Letnik 2, str. 2299–2303. IEEE. doi: 10.1109/PES.2004.1373296. www.trec-uk.org.uk/reports/HVDC_Gunnar_Asplund_ABB.pdf.
- ASSELBERGS, B., BOKHORST, J., HARMS, R., VAN HEMERT, J., VAN DER NOORT, L., TEN VELDEN, C., VERVUURT, R., WIJNEN, L. in VAN ZON, L. (2006). Size does matter – the possibilities of cultivating *Jatropha curcas* for biofuel production in Cambodia. environmental.scum.org/biofuel/jatropha/.
- BAER, P. in MASTRANDREA, M. (2006). High stakes: Designing emissions pathways to reduce the risk of dangerous climate change. www.ippr.org/publicationsandreports/.
- BAHRMAN, M. P. in JOHNSON, B. K. (2007). The ABCs of HVDC transmission technology. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(2).
- BAINES, J. A., NEWMAN, V. G., HANNA, I. W., DOUGLAS, T. H., CARLYLE, W. J., JONES, I. L., EATON, D. M. in ZERONIAN, G. (1983). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proceedings pt. 1*, 74:635–718.
- BAINES, J. A., NEWMAN, V. G., HANNA, I. W., DOUGLAS, T. H., CARLYLE, W. J., JONES, I. L., EATON, D. M. in ZERONIAN, G. (1986). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proceedings pt. 1*, 80:493–536.
- BAKER, C., WALBANCKE, J. in LEACH, P. (2006). Tidal lagoon power generation scheme in Swansea Bay. www.dti.gov.uk/files/file30617.pdf. Poročilo naročeno s strani Department of Trade and Industry in Welsh Development Agency.
- BAYER CROP SCIENCE. (2003). Potential of GM winter oilseed rape to reduce the environmental impact of farming whilst improving farmer incomes. tinyurl.com/5j99df.
- BICKLEY, D. T. in RYRIE, S. C. (1982). A two-basin tidal power scheme for the Severn estuary. V *Conference on new approaches to tidal power*.
- BINDER, M., FALTENBACHER, M., KENTZLER, M. in SCHUCKERT, M. (2006). Clean urban transport for Europe. Deliverable D8 – končno poročilo. www.fuel-cell-bus-club.com/.
- BLACK in VEATCH. (2005). The UK tidal stream resource and tidal stream technology. Poročilo pripravljeno za Carbon Trust Marine Energy Challenge. www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/tidal_stream.htm.
- BLUNDEN, L. S. in BAHAI, A. S. (2007). Tidal energy resource assessment for tidal stream generators. *Proc. IMechE*, 221 Del A:137–146.
- BONAN, G. B. (2002). *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Cambridge University Press. ISBN 9780521804769.
- BOYER, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218(4571):443–448. doi: 10.1126/science.218.4571.443.
- BRASLOW, A. L. (1999). *A history of suction-type laminar-flow control with emphasis on flight research*. Number 13 in Monographs in Aerospace History. NASA. www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88792main_Laminar.pdf.
- BROECKER, W. S. in KUNZIG, R. (2008). *Fixing Climate: What Past Climate Changes Reveal About the Current Threat—and How to Counter It*. Hill and Wang. ISBN 0809045028.
- BURNHAM, A., WANG, M. in WU, Y. (2007). Development and applications of GREET 2.7 — the transportation vehicle-cycle model. www.transportation.anl.gov/software/GREET/publications.html.
- CARBON TRUST. (2007). Micro-CHP accelerator – interim report. Tehnično poročilo CTC726. www.carbontrust.co.uk/publications/publicationdetail.htm?productid=CTC726.
- CARLSSON, L. (2002). »Classical« HVDC: still continuing to evolve. *Modern Power Systems*.
- CARTWRIGHT, D. E., EDDEN, A. C., SPENCER, R. in VASSIE, J. M. (1980). The tides of the northeast Atlantic Ocean. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A*, 298(1436):87–139.
- CATLING, D. T. (1966). Principles and practice of train performance applied to London Transport's Victoria line. Prispevek 8, Zborovanje »Convention on Guided Land Transport« (London, 27.-28. oktober 1966).
- CHARLIER, R. H. (2003a). Sustainable co-generation from the tides: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7:187–213.

- CHARLIER, R. H. (2003b). A »sleeper« awakes: tidal current power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7:515–529.
- CHARNEY, J. G., ARAKAWA, A., BAKER, D. J., BOLIN, B., DICKINSON, R. E., GOODY, R. M., LEITH, C. E., STOMMEL, H. M. in WUNSCH, C. I. (1979). Carbon dioxide and climate: A scientific assessment. www.nap.edu/catalog.php?record_id=12181.
- CHISHOLM, S. W., FALKOWSKI, P. G. in CULLEN, J. J. (2001). Discrediting ocean fertilisation. *Science*, 294(5541):309–310.
- CHITRAKAR, R., KANO, H., MIYAI, Y. in OOI, K. (2001). Recovery of lithium from seawater using manganese oxide adsorbent ($\text{H}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$) derived from $\text{Li}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40(9):2054–2058. pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/iecred/2001/40/i09/abs/ie000911h.html.
- CHURCH, R. A., HALL, A. in KANEFSKY, J. (1986). *The history of the British coal industry. Letnik 3, 1830–1913: Victorian pre-eminence*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282842.
- COHEN, B. L. (1983). Breeder reactors: A renewable energy source. *American Journal of Physics*, 51(1):75–76. sustainablenuclear.org/PADs/pad11983cohen.pdf.
- COLEY, D. (2001). Emission factors for walking and cycling. www.centres.ex.ac.uk/cee/publications/reports/91.html.
- COMMITTEE ON RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT. (2006). Managing our radioactive waste safely. www.corwm.org.uk/Pages/Current%20Publications/700%20-%20CoRWM%20July%202006%20Recommendations%20to%20Government.pdf.
- CUTE. (2006). Clean urban transport for Europe. detailed summary of achievements. www.fuel-cell-bus-club.com/.
- DAVID, J. in HERZOG, H. (2000). The cost of carbon capture. sequestration.mit.edu/pdf/David_and_Herzog.pdf. Predstavitev na konferenci Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, Australia med 13. In 16. avgustom (2000).
- DAVIDSON, E. A. in JANSSENS, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440:165–173. doi: 10.1038/nature04514. www.nature.com/nature/journal/v440/n7081/full/nature04514.html.
- DEFFEYES, K. S. in MACGREGOR, I. D. (1980). World uranium resources. *Scientific American*, str. 66–76.
- DENHOLM, P., KULCINSKI, G. L. in HOLLOWAY, T. (2005). Emissions and energy efficiency assessment of baseload wind energy systems. *Environ Sci Technol*, 39(6):1903–1911. ISSN 0013-936X. www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15819254.
- DENISON, R. A. (1997). Life-cycle assessment for paper products. V E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring, in P. Schulze, uredniki, *Wood in Our Future: The Role of Life-Cycle Analysis: Proceedings of a Symposium*. National Academy Press. ISBN 0309057450. books.nap.edu/openbook.php?record_id=5734.
- DENNIS, C. (2006). Solar energy: Radiation nation. *Nature*, 443:23–24. doi: 10.1038/443023a.
- DEPARTMENT FOR TRANSPORT. (2007). Transport statistics Great Britain. www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/.
- DEPARTMENT OF DEFENSE. (2008). More fight – less fuel. Report of the Defense Science Board Task Force on DoD Energy Strategy.
- DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. (2004). DTI Atlas of UK marine renewable energy resources. www.offshore-sea.org.uk/.
- DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. (2002a). Energy consumption in the United Kingdom. www.berr.gov.uk/files/file11250.pdf.
- DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. (2002b). Future offshore. www.berr.gov.uk/files/file22791.pdf.
- DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. (2007). Impact of banding the renewables obligation – costs of electricity production. www.berr.gov.uk/files/file39038.pdf.
- DESSLER, A. E. in PARSON, E. A. (2006). *The Science and Politics of Global Climate Change – A Guide to the Debate*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 9780521539418.
- DI PRAMPERO, P. E., CORTILI, G., MOGNONI, P. in SAIBENE, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *J. Appl. Physiology*, 47:201–206. jap.physiology.org/cgi/content/abstract/47/1/201.
- DIAMOND, J. (2004). *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Penguin.
- E4TECH. (2007). A review of the UK innovation system for low carbon road transport technologies. www.dft.gov.uk/pgr/scienceresearch/technology/lctis/e4techlcpdf.
- ECKHARTT, D. (1995). Nuclear fuels for low-beta fusion reactors: Lithium resources revisited. *Journal of Fusion Energy*, 14(4):329–341. ISSN 0164-0313 (tiskana izdaja) 1572-9591 (spletna izdaja). doi: 10.1007/BF02214511. www.springerlink.com/content/35470543rj8t2gk1/.
- EDDINGTON, R. (2006). Transport's role in sustaining the UK's productivity and competitiveness.
- EDEN, R. in BENDING, R. (1985). Gas/electricity competition in the UK. Technical Report 85/6, Cambridge Energy Research Group, Cambridge.
- ELLIOTT, D. L., WENDELL, L. L. in GOWER, G. L. (1991). An assessment of windy land area and wind energy potential in the contiguous United States. www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/5252760-ccu0pk/.
- ENERGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT LTD. (2003). English partnerships sustainable energy review. www.englishpartnerships.co.uk.
- ERDINCLER, A. U. in VESILIND, P. A. (1993). Energy recovery from mixed waste paper. *Waste Management & Research*, 11(6):507–513. doi: 10.1177/0734242X9301100605.

- ETHERIDGE, D., STEELE, L., LANGENFELDS, R., FRANCEY, R., BAR-NOLA, J.-M. in MORGAN, V. (1998). Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. *V Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., ZDA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/lawdome.html.
- EUROPEAN COMMISSION. (2007). Concentrating solar power - from research to implementation. www.solarpaces.org/Library/library.htm.
- EVANS, D. G. (2007). Liquid transport biofuels – technology status report. www.nnfcc.co.uk/.
- EVANS, R. K. (2008). An abundance of lithium. www.worldlithium.com.
- FABER, T. E. (1995). *Fluid dynamics for physicists*. Cambridge University Press, Cambridge.
- FAIMAN, D., RAVIV, D. in ROSENSTREICH, R. (2007). Using solar energy to arrest the increasing rate of fossil-fuel consumption: The southwestern states of the USA as case studies. *Energy Policy*, 35:567–576.
- FIES, B., PETERSON, T. in POWICKI, C. (2007). Solar photovoltaics – expanding electric generation options. mydocs.epri.com/docs/SEIG/1016279_Photovoltaic_White_Paper_1207.pdf.
- FISHER, K., WALLÉN, E., LAENEN, P. P. in COLLINS, M. (2006). Battery waste management life cycle assessment. www.defra.gov.uk/environment/waste/topics/batteries/pdf/erm-lcareport0610.pdf.
- FLATHER, R. A. (1976). A tidal model of the north-west European continental shelf. *Memoires Société Royale des Sciences de Liège*, 10(6):141–164.
- FLINN, M. W. in STOKER, D. (1984). *The history of the British coal industry. Letnik 2, 1700–1830: the Industrial Revolution*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282834.
- FRANCIS, G., EDINGER, R. in BECKER, K. (2005). A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. *Natural Resources Forum*, 29(1):12–24. doi: 10.1111/j.1477-8947.2005.00109.x.
- FRANKLIN, J. (2007). Principles of cycle planning. www.cyclenetwork.org.uk/papers/071119principles.pdf.
- FREESTON, D. H. (1996). Direct uses of geothermal energy 1995. geoheat.oit.edu/bulletin/bull17-1/art1.pdf.
- GABRIELLI, G. in VON KÁRMÁN, T. (1950). What price speed? *Mechanical Engineering*, 72(10).
- GARRETT, C. in CUMMINS, P. (2005). The power potential of tidal currents in channels. *Proceedings of the Royal Society A*, 461(2060):2563–2572. dx.doi.org/10.1098/rspa.2005.1494.
- GARRETT, C. in CUMMINS, P. (2007). The efficiency of a turbine in a tidal channel. *J Fluid Mech*, 588:243–251.
- journals.cambridge.org/production/action/cjoGetFulltext?fulltextid=1346064.
- GELLINGS, C. W. in PARMENTER, K. E. (2004). Energy efficiency in fertilizer production and use. V C. W. Gellings in K. Blok, urednika, *Efficient Use and Conservation of Energy*, Encyclopedia of Life Support Systems. Eolss Publishers, Oxford, UK. www.eolss.net.
- GERMAN AEROSPACE CENTER (DLR) INSTITUTE OF TECHNICAL THERMODYNAMICS SECTION SYSTEMS ANALYSIS AND TECHNOLOGY ASSESSMENT. (2006). Concentrating solar power for the Mediterranean region. www.dlr.de/tt/med-csp. Study commissioned by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany.
- GOODSTEIN, D. (2004). *Out of Gas*. W. W. Norton and Company, New York. ISBN 0393058573.
- GREEN, J. E. (2006). Civil aviation and the environment – the next frontier for the aerodynamicist. *Aeronautical Journal*, 110(1110):469–486.
- GRUBB, M. in NEWBERY, D. (2008). Pricing carbon for electricity generation: national and international dimensions. V M. Grubb, T. Jamasb, in M. G. Pollitt, uredniki, *Delivering a Low Carbon Electricity System: Technologies, Economics and Policy*. Cambridge University Press, Cambridge.
- GUMMER, J., GOLDSMITH, Z., PECK, J., EGGAR, T., HURD, N., MIRAJ, A., NORRIS, S., NORTHCOTE, B., OLIVER, T., STRONG, D., TWITCHEN, K. in WILKIE, K. (2007). Blueprint for a green economy. www.qualityoflifechallenge.com.
- HALKEMA, J. A. (2006). Wind energy: Facts and fiction. www.country-guardian.net/halkema-windenergyfactfiction.pdf.
- HAMMOND, G. in JONES, C. (2006). Inventory of carbon & energy (ICE). www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/verzija1.5aBeta.
- HAMMONS, T. J. (1993). Tidal power. *Proceedings of the IEEE*, 8(3):419–433.
- HANSEN, J., SATO, M., KHARECHA, P., RUSSELL, G., LEA, D. in SIDDALL, M. (2007). Climate change and trace gases. *Phil. Trans. Royal. Soc. A*, 365:1925–1954. doi: 10.1098/rsta.2007.2052. pubs.giss.nasa.gov/abstracts/2007/Hansen_etal_2.html.
- HASTINGS, R. in WALL, M. (2006). *Sustainable Solar Housing: Strategies And Solutions*. Earthscan. ISBN 1844073254.
- HATCHER, J. (1993). *The History of the British Coal Industry: Towards the Age of Coal: Before 1700 Letnik 1*. Clarendon Press.
- HEATON, E., VOIGT, T. in LONG, S. (2004). A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature, and water. *Biomass and Bioenergy*, 27:21–30.
- HELM, D., SMALE, R. in PHILLIPS, J. (2007). Too good to be true? The UK's climate change record. www.dieterhelm.co.uk/publications/Carbon_record_2007.pdf.
- HELWEG-LARSEN, T. in BULL, J. (2007). Zero carbon Britain – an alternative energy strategy. zerocarbonbritain.com/.

- HERRING, J. (2004). Uranium and thorium resource assessment. V C. J. Cleveland, editor, *Encyclopedia of Energy*. Boston University, Boston, ZDA. ISBN 0-12-176480-X.
- HERZOG, H. (2003). Assessing the feasibility of capturing CO₂ from the air. web.mit.edu/coal/working_folder/pdfs/Air_Capture_Feasibility.pdf.
- HERZOG, H. (2001). What future for carbon capture and sequestration? *Environmental Science and Technology*, 35:148A-153A. sequestration.mit.edu/.
- HIRD, V., EMERSON, C., NOBLE, E., LONGFIELD, J., WILLIAMS, V., GOETZ, D., HOSKINS, R., PAXTON, A. in DUPEE, G. (1999). Still on the road to ruin? An assessment of the debate over the unnecessary transport of food, five years on from the food miles report.
- HODGSON, P. (1999). *Nuclear Power, Energy and the Environment*. Imperial College Press.
- HOPFIELD, J. J. in GOLLUB, J. (1978). Introduction to solar energy. www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/solar/HopfieldGollub78/scan.html.
- HORIE, H., TANJO, Y., MIYAMOTO, T. in KOGA, Y. (1997). Development of a lithium-ion battery pack system for EV. *JSAE Review*, 18(3):295-300.
- HPTCJ. (2007). Heat pumps: Long awaited way out of the global warming. www.hptcj.or.jp/about_e/contribution/index.html.
- INDERMUHLE, A., STOCKER, T., JOOS, F., FISCHER, H., SMITH, H., WAHLEN, M., DECK, B., MASTROIANNI, D., TSCHUMI, J., BLUNIER, T., MEYER, R. in STAUFFER, B. (1999). Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. *Nature*, 398:121-126.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2001). Things that go blip in the night – standby power and how to limit it. www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/blipinthenight01.pdf.
- JACKSON, P. in KERSHAW, S. (1996). Reducing long term methane emissions resulting from coal mining. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8):801-806. doi: 10.1016/0196-8904(95)00259-6.
- JEVONS, W. S. (1866). *The Coal Question; An Inquiry concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-mines*. Macmillan and Co., London, druga izdaja. o11.libertyfund.org/.
- JONES, I. S. F. (2008). The production of additional marine protein by nitrogen nourishment. www.oceannourishment.com/files/Jc08.pdf.
- JONES, P. M. S. (1984). Statistics and nuclear energy. *The Statistician*, 33(1):91-102. www.jstor.org/pss/2987717.
- JUDD, B., HARRISON, D. P. in JONES, I. S. F. (2008). Engineering ocean nourishment. V *World Congress on Engineering WCE 2008*, str.1315-1319. IAENG. ISBN 978-988-98671-9-5.
- JUNIPER, T. (2007). *How Many Lightbulbs does it take To Change a Planet?* Quercus, London.
- KAMMEN, D. M. in HASSENZAHL, D. M. (1999). *Should We Risk It? Exploring Environmental, Health, and Technological Problem Solving*. Princeton University Press.
- KANEKO, T., SHIMADA, M., KUJIRAOKA, S. in KOJIMA, T. (2004). Easy maintenance and environmentally-friendly train traction system. *Hitachi Review*, 53(1):15-19. www.hitachi.com/ICSFiles/afieldfile/2004/05/25/r2004_01_103.pdf.
- KEELING, C. in WHORF, T. (2005). Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., ZDA.
- KEITH, D. W., HA-DUONG, M. in STOLAROFF, J. K. (2005). Climate strategy with CO₂ capture from the air. *Climatic Change*. doi: 10.1007/s10584-005-9026-x. www.ucalgary.ca/keith/papers/51.Keith.2005.ClimateStratWithAirCapture.e.pdf.
- KING, J. (2007). The King review of low-carbon cars. Part I: the potential for CO₂ reduction. hm-treasury.gov.uk/king.
- KING, J. (2008). The King review of low-carbon cars. Part II: recommendations for action. hm-treasury.gov.uk/king.
- KOOMEY, J. G. (2007). Estimating total power consumption by servers in the US and the world. blogs.business2.com/greenwombat/files/serverpowerusecomplete-v3.pdf.
- KOWALIK, Z. (2004). Tide distribution and tapping into tidal energy. *Oceanologia*, 46(3):291-331.
- KUEHR, R. (2003). *Computers and the Environment: Understanding and Managing their Impacts (Eco-Efficiency in Industry and Science)*. Springer. ISBN 1402016808.
- LACKNER, K. S., GRIMES, P. in ZIOCK, H.-J. (2001). Capturing carbon dioxide from air. www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/7b1.pdf. Prispevek predstavljen na First National Conference on Carbon Sequestration, Washington DC.
- LAWSON, B. (1996). Building materials, energy and the environment: Towards ecologically sustainable development.
- LAYZELL, D. B., STEPHEN, J. in WOOD, S. M. (2006). Exploring the potential for biomass power in Ontario. www.biocap.ca/files/Ont_bioenergy_OPA_Feb23_final.pdf.
- LE QUÉRE, C., RÖDENBECK, C., BUITENHUIS, E., CONWAY, T. J., LANGENFELDS, R., GOMEZ, A., LABUSCHAGNE, C., RAMONET, M., NAKAZAWA, T., METZ, N., GILLET, N. in HEIMANN, M. (2007). Saturation of the southern ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science*, 316:1735-1738. doi: 10.1126/science.1136188. lgmacweb.env.uea.ac.uk/e415/publications.html.
- LEMOFOUET-GATSI, S. (2006). *Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors*. Doktorska (PhD) dizertacija, EPFL. library.epfl.ch/theses/?nr=3628.
- LEMOFOUET-GATSI, S. in RUFER, A. (2005). Hybrid energy systems based on compressed air and supercapacitors with

- maximum efficiency point tracking. leiwwww.epfl.ch/publications/lemofouet_rufer_epe_05.pdf.
- LOMBORG, B. (2001). *The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 0-521-80447-7.
- MABEE, W. E., SADDLER, J. N., NIELSEN, C., HENRIK, L. in STEEN JENSEN, E. (2006). Renewable-based fuels for transport. www.risoe.dk/rispubl/Energy-report5/ris-r-1557_49-52.pdf. Riso Energy Report 5.
- MACDONALD, J. M. (2008). The economic organization of US broiler production. www.ers.usda.gov/Publications/EIB38/EIB38.pdf. Economic Information Bulletin No. 38. Economic Research Service, US Dept. of Agriculture.
- MACDONALD, P., STEDMAN, A. in SYMONS, G. (1992). The UK geothermal hot dry rock R&D programme. V *Seventeenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- MACKAY, D. J. C. (2007a). Enhancing electrical supply by pumped storage in tidal lagoons. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/Lagoons.html.
- MACKAY, D. J. C. (2007b). Under-estimation of the UK tidal resource. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/TideEstimate.html.
- MACLEAY, I., HARRIS, K. in MICHAELS, C. (2007). Digest of United Kingdom energy statistics 2007. www.berr.gov.uk.
- MALANIMA, P. (2006). Energy crisis and growth 1650–1850: the European deviation in a comparative perspective. *Journal of Global History*, 1:101–121. doi: 10.1017/S1740022806000064.
- MARLAND, G., BODEN, T. in ANDRES, R. J. (2007). Global, regional, and national CO₂ emissions. V *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., ZDA. cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm.
- MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. (2006). The future of geothermal energy. geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf.
- MCBRIDE, J. P., MOORE, R. E., WITHERSPOON, J. P. in BLANCO, R. E. (1978). Radiological impact of airborne effluents of coal and nuclear plants. *Science*, 202(4372):1045–1050. doi: 10.1126/science.202.4372.1045.
- MEADOWS, M. (1996). Estimating landfill methane emissions. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8):1099–1104. doi: 10.1016/0196-8904(95)00304-5.
- METZ, B., DAVIDSON, O., DE CONINCK, H., LOOS, M. in MEYER, L., uredniki. (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 978-0-521-68551-1. www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.
- MILLS, D. R. in LIÈVRE, P. L. (2004). Competitive solar electricity. www.ausra.com/pdfs/Paper_CompetitiveSolarElectricity.pdf.
- MILLS, D. R. in MORGAN, R. G. (2008). Solar thermal electricity as the primary replacement for coal and oil in US generation and transportation. www.ausra.com/technology/reports.html.
- MILLS, D. R. in MORRISON, G. L. (2000). Compact Linear Fresnel Reflector solar thermal powerplants. *Solar Energy*, 68(3):263–283. doi: 10.1016/S0038-092X(99)00068-7.
- MILLS, D. R., LE LIÈVRE, P. in MORRISON, G. L. (2004). First results from Compact Linear Fresnel Reflector installation. solarheatpower.veritel.com.au/MILLS_CLFR_ANZ-SES_FINAL.pdf.
- MINDL, P. (2003). Hybrid drives super-capacitor energy storage calculation. www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap6_EDPE.pdf.
- MOLLISON, D. (1986). Wave climate and the wave power resource. V D. Evans in A. de O. Falcao, urednika, *Hydrodynamic of Ocean Wave-Energy Utilization*, str. 133–156, Berlin. Springer. www.ma.hw.ac.uk/denis/wave.html.
- MOLLISON, D. (1991). The UK wave power resource. V *Wave Energy (Institution of Mechanical Engineers – Seminar)*, str. 1–6. John Wiley & Sons. www.ma.hw.ac.uk/denis/wave.html.
- MOLLISON, D., BUNEMAN, O. P. in SALTER, S. H. (1976). Wave power availability in the NE Atlantic. *Nature*, 263(5574):223–226. www.ma.hw.ac.uk/denis/wave.html.
- MONTEITH, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 281:277–294.
- NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH. (2001). NBER macrohistory database. www.nber.org/databases/macrohistory/contents/.
- NEFTEL, A., FRIEDLI, H., MOOR, E., LÖTSCHER, H., OESCHGER, H., SIEGENTHALER, U. in STAUFFER, B. (1994). Historical CO₂ record from the Siple station ice core. V *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., ZDA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/siple.htm.
- NETHERLANDS ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AGENCY. (2006). History database of the global environment. www.mnp.nl/hyde/.
- NICKOL, C. L. (2008). Silent Aircraft Initiative concept risk assessment. ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080012497_2008011089.pdf.
- NORRSTRÖM, H. (1980). Low waste technology in pulp and paper industries. *Pure & Appl. Chem.*, 52:1999–2004. www.iupac.org/publications/pac/1980/pdf/5208x1999.pdf.
- NUTTALL, W. J. (2004). *Nuclear Renaissance*. Institute of Physics Publishing.
- OECD Nuclear Energy Agency. (2006). *Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in perspective*. OECD Publishing. ISBN 9264028064. books.google.com/books?id=HIT1o985uKYC.

- ONGENA, J. in VAN OOST, G. (2006). Energy for future centuries. Will fusion be an inexhaustible, safe and clean energy source? www.fusie-energie.nl/artikelen/ongena.pdf.
- OSWALD, J., RAINE, M. in ASHRAF-BALL, H. (2008). Will British weather provide reliable electricity? *Energy Policy*, v tisku. doi: 10.1016/j.enpol.2008.04.03.
- PRICE, R. in BLAISE, J. (2002). Nuclear fuel resources: Enough to last? www.ingentaconnect.com/content/oecd/16059581/2002/00000020/00000002/6802021e.
- PUTT, R. (2007). Algae as a biodiesel feedstock: A feasibility assessment. www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/algae.pdf.
- QUAYLE, R. G. in CHANGERY, M. J. (1981). Estimates of coastal deepwater wave energy potential for the world. *Oceans*, 13:903–907. ieeexplore.ieee.org/iel6/8271/25889/01151590.pdf.
- RICE, T. in OWEN, P. (1999). *Decommissioning the Brent Spar*. Taylor and Francis.
- RICHARDS, B. S. in WATT, M. E. (2007). Permanently dispelling a myth of photovoltaics via the adoption of a new net energy indicator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(1):162–172. www.sciencedirect.com/science/journal/13640321.
- RICHARDS, H. G., PARKER, R. H., GREEN, A. S. P., JONES, R. H., NICHOLLS, J. D. M., NICOL, D. A. C., RANDALL, M. M., RICHARDS, S., STEWART, R. C. in WILLIS-RICHARDS, J. (1994). The performance and characteristics of the experimental hot dry rock geothermal reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985–1988). *Geothermics*, 23(2):73–109. ISSN 0375-6505.
- RIDLEY, T. M. in CATLING, D. T. (1982). The energy implications of the design of mass transit railways. Prispevek predstavljen na Tunnelling '82 (Third International Symposium), Brighton.
- ROGNER, H.-H. (2000). Energy resources. V *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, 5. poglavje. UNDP, New York, ZDA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- ROSS, A. (2008). The Loch Sloy hydro-electric scheme 1950. www.arrocharheritage.com/LochSloyHydroElectricScheme.htm.
- ROYAL COMMISSION ON ENVIRONMENTAL POLLUTION. (2004). Biomass as a renewable energy source. www.rcep.org.uk.
- ROYAL SOCIETY WORKING GROUP ON BIOFUELS. (2008). Sustainable biofuels: prospects and challenges. royalsociety.org. Policy document 01/08.
- RUBBIA, C., RUBIO, J., BUONO, S., CARMINATI, F., FIÉTIER, N., GALVEZ, J., GELÈS, C., KADI, Y., KLAISCH, R., MANDRILLON, P., REVOL, J. in ROCHE, C. (1995). Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier. Tehnično poročilo CERN/AT/95-44 (ET), European Organization for Nuclear Research. doc.cern.ch/archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf.
- RUDELL, A. (2003). Investigation on storage technologies for intermittent renewable energies: Evaluation and recommended r&d strategy. www.itpower.co.uk/investire/pdfs/flywheelrep.pdf.
- RYDH, C. J. in KARLSTRÖM, M. (2002). Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 34:289–309. homepage.te.hik.se/personal/tryca/battery/abstracts.htm.
- SALTER, S. H. (2005). Possible under-estimation of the UK tidal resource. www.berr.gov.uk/files/file31313.pdf. Prispevek za DTI Energy Review.
- SCHELLNHUBER, H. J., CRAMER, W., NAKICENOVIC, N., WIGLEY, T. in YOHE, G. (2006). *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge University Press. www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf.
- SCHIERMEIER, Q., TOLLEFSON, J., SCULLY, T., WITZE, A. in MORTON, O. (2008). Energy alternatives: Electricity without carbon. *Nature*, 454:816–823. doi: 10.1038/454816a.
- SCHLAICH, J. in SCHIEL, W. (2001). »Solar Chimneys«. V R. A. Meyers (ur.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. 3. izdaja, Academic Press, London. ISBN 0-12-227410-5. www.solarmillennium.de/pdf/SolarCh.pdf.
- SCHLAICH, J., BERGERMANN, R., SCHIEL, W. in WEINREBE, G. (2005). »Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems – Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation«. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127(1):117–124. doi: 10.1115/1.1823493.
- SCHMER, M. R., VOGEL, K. P., MITCHELL, R. B. in PERRIN, R. K. (2008). Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *PNAS*, 105(2):464–469. doi: 10.1073/pnas.0704767105. www.pnas.org/cgi/content/full/105/2/464.
- SCHUILING, R. in KRIJGSMAN, P. (2006). Enhanced weathering: an effective and cheap tool to sequester CO₂. *Climatic Change*, 74(1-3):349–354.
- SCHWARTZ, S. I., urednik. (1998). *Atomic Audit: Costs and Consequences of US Nuclear Weapons Since 1940*. Brookings Institution Press, Washington, D.C. www.brook.edu/fp/projects/nucwcost/schwartz.htm.
- SEKO, N., KATAKAI, A., HASEGAWA, S., TAMADA, M., KASAI, N., TAKEDA, H., SUGO, T. in SAITO, K. (2003). Aquaculture of uranium in seawater by a fabric-adsorbent submerged system. *Nuclear Technology*, 144(2):274–278.
- SHAPOURI, H., DUFFIELD, J. A. in GRABOSKI, M. S. (1995). Estimating the net energy balance of corn ethanol. www.ethanol-gec.org/corn_eth.htm. United States Department of Agriculture Agricultural Economic Report Number 721.
- SHARMAN, H. (2005). Why wind power works for Denmark. *Proceedings of ICE Civil Engineering*, 158:66–72. incoteco.com/upload/CIEN.158.2.66.pdf.
- SHAW, T. L. in WATSON, M. J. (2003a). The effects of pumping on the energy potential of a tidal power barrage. *Engineering Sustainability*, 156(2):111–117. ISSN 1478-4637. doi: 10.1680/ensu.156.2.111.37018.

- SHAW, T. L. in WATSON, M. J. (2006). Flexible power generation from a Severn barrage. www.dti.gov.uk/files/file31332.pdf.
- SHAW, T. L. in WATSON, M. J. (2003b). Flexible power generation from the tides. *Engineering Sustainability*, 156(2):119–123. ISSN 1478-4629.
- SHEPHERD, D. W. (2003). *Energy Studies*. Imperial College Press.
- SHOCKLEY, W. in QUEISSER, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p - n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3):510–519.
- SHYY, W., BERG, M. in LJUNGQVIST, D. (1999). Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 35(5):455–505.
- SIEGENTHALER, U., MONNIN, E., KAWAMURA, K., SPAHNI, R., SCHWANDER, J., STAUFFER, B., STOCKER, T., BARNOLA, J.-M. in FISCHER, H. (2005). Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO_2 changes during the past millennium. *Tellus B*, 57(1):51–57. doi:10.1111/j.1600-0889.2005.00131.x. <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/maud/edml-co2-2005.xls>.
- SIMS, R., SCHOCK, R., ADEGBULULGBE, A., FENHANN, J., KONSTANTINAVICIUTE, I., MOOMAW, W., NIMIR, H., SCHLAMADINGER, B., TORRES-MARTÍNEZ, J., TURNER, C., UCHIYAMA, Y., VUORI, S., WAMUKONYA, N. in ZHANG, X. (2007). Energy supply. V B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, in L. Meyer, uredniki, *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter4.pdf.
- SINDEN, G. (2005). Variability of UK marine resources. Tehnično poročilo, Oxford. www.carbontrust.co.uk/NR/rdonlyres/EC293061-611D-4BC8-A75C-9F84138184D3/0/variability_uk_marine_energy_resources.pdf.
- SLEATH, J. F. A. (1984). *Sea bed mechanics*. Wiley, New York. ISBN 047189091X.
- SOCOLOW, R. (2006). Stabilization wedges: An elaboration of the concept. V H. J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley in G. Yohe, uredniki, *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge University Press.
- STEINBERG, M. in DANG, V. (1975). Preliminary design and analysis of a process for the extraction of lithium from seawater. Tehnično poročilo 20535-R, Brookhaven National Lab, Upton, N.Y. (ZDA). www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7351225. Predstavljeno na simpoziju o virih litija v ZDA ter zahtevah do leta 2000; 22. januar 1976; Lakewood, CO, ZDA.
- STERN, N. (2007). *The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- SUBCOMMITTEE ON POULTRY NUTRITION, NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (1994). *Nutrient Requirements of Poultry*. National Academy Press, Washington, deveta popravljena izdaja. www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923.
- SUPPLE, B. (1987). *The history of the British coal industry. Letnik 4, 1913–1946: the political economy of decline*. Clarendon, Oxford. ISBN 019828294X.
- TAYLOR, G. I. (1920). Tidal friction in the Irish Sea. *R. Soc. Lond. Ser. A*, 220:1–33. doi: 10.1098/rsta.1920.0001.
- TAYLOR, G. K. (2002a). Are you missing the boat? the ekranoplan in the 21st century – its possibilities and limitations. www.hypercraft-associates.com/areyoumissingtheboat2002.pdf. Predstavljeno na 18. Fast Ferry Conference, Nica, Francija.
- TAYLOR, S. J. (2002b). The Severn barrage – definition study for a new appraisal of the project. www.dti.gov.uk/files/file15363.pdf. ETSU POROČILO ŠT. T/09/00212/00/REP.
- TENNEKES, H. (1997). *The Simple Science of Flight*. MIT Press.
- THAKUR, P. C., LITTLE, H. G. in KARIS, W. G. (1996). Global coalbed methane recovery and use. *Energy Conversion and Management*, 37(6/8):789–794.
- THE EARTHWORKS GROUP. (1989). *50 Simple things you can do to save the earth*. The Earthworks Press, Berkeley, California. ISBN 0-929634-06-3.
- TRELOAR, G. J., LOVE, P. E. D. in CRAWFORD, R. H. (2004). Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. *J. Constr. Engrg. and Mgmt.*, 130(1):43–49.
- TRIEB, F. in KNIES, G. (2004). A renewable energy and development partnership EU-ME-NA for large scale solar thermal power and desalination in the Middle East and in North Africa. www.gezen.nl/wordpress/wp-content/uploads/2006/09/sanaa-paper-and-annex_15-04-2004.pdf.
- TSURUTA, T. (2005). Removal and recovery of lithium using various microorganisms. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100(5):562–566. www.jstage.jst.go.jp/article/jbb/100/5/100_562/_article.
- TURKENBURG, W. C. (2000). Renewable energy technologies. V *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, 7. poglavje. UNDP, New York, ZDA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- UCUNCU, A. (1993). Energy recovery from mixed paper waste. Tehnično poročilo, NC, ZDA. www.p2pays.org/ref/11/10059.pdf.
- VAN DEN BERG, G. (2004). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, 277:955–970. www.nowap.co.uk/docs/windnoise.pdf.
- VAN VOORTHUYSEN, E. D. M. (2008). Two scenarios for a solar world economy. *Int. J. Global Environmental Issues*, 8(3):233–247.
- VENTOUR, L. (2008). The food we waste. news.bbc.co.uk/1/shared/bsp/hi/pdfs/foodwewaste_fullreport08_05_08.pdf.

- WARWICK HRI. (2007). Direct energy use in agriculture: opportunities for reducing fossil fuel inputs. www2.warwick.ac.uk/fac/sci/whri/research/climatechange/energy/direct_energy__use_in_agriculture.pdf.
- WATERUK. (2006). Towards sustainability 2005–2006. www.water.org.uk/home/policy/reports/sustainability/indicators-2005-06/towards-sustainability-2005-2006.pdf.
- WATSON, J., HERTIN, J., RANDALL, T. in GOUGH, C. (2002). Renewable energy and combined heat and power resources in the UK. Tehnično poročilo. www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/wp22.pdf. Working Paper 22.
- WAVEGEN. (2002). Islay Limpet project monitoring – final report. www.wavegen.co.uk/pdf/art.1707.pdf.
- WEBER, C. L. in MATTHEWS, H. S. (2008). Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environ. Sci. Technol.*, 42(10):3508–3513. doi: 10.1021/es702969f.
- WEIGHTMAN, M. (2007). Report of the investigation into the leak of dissolver product liquor at the Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP), Sellafield, notified to HSE on 20 April 2005. www.hse.gov.uk/nuclear/thorpreport.pdf.
- WIEDMANN, T., WOOD, R., LENZEN, M., MINX, J., GUAN, D. in BARRETT, J. (2008). Development of an embedded carbon emissions indicator – producing a time series of input-output tables and embedded carbon dioxide emissions for the UK by using a MRIO data optimisation system. randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=EV02033_7331_FRP.pdf.
- WILLIAMS, D. in BAVERSTOCK, K. (2006). Chernobyl and the future: Too soon for a final diagnosis. *Nature*, 440:993–994. doi: 10.1038/440993a.
- WILLIAMS, E. (2004). Energy intensity of computer manufacturing: hybrid assessment combining process and economic input-output methods. *Environ Sci Technol*, 38(22):6166–6174. ISSN 0013-936X. www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15573621.
- WILLIAMS, R. H. (2000). Advanced energy supply technologies. V *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, 8. poglavje. UNDP, New York, ZDA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- WILSON, E. M. in BALLS, M. (1990). Tidal power generation. V P. Novak, editor, *Developments in Hydraulic Engineering*, 2. poglavje. Taylor & Francis. ISBN 185166095X.
- WOOD, B. (1985). Economic district heating from existing turbines. *Institution of Civil Engineers Proceedings pt. 1*, 77:27–48.
- YAROS, B. (1997). Life-cycle thinking for wood and paper products. V E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring in P. Schulze, uredniki, *Wood in Our Future: The Role of Life-Cycle Analysis: Proceedings of a Symposium*.
- ZALESKI, C. P. (2005). The future of nuclear power in France, the EU and the world for the next quarter-century. www.npec-web.org/Essays/Essay050120_Zalenski_Future_of_Nuclear_Power.pdf. tinyurl.com/32louu.
- ZHU, X.-G., LONG, S. P. in ORT, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology*, 19:153–159.

Trajnostna energija – brez razgretega ozračja

David J. C. MacKay

O avtorju

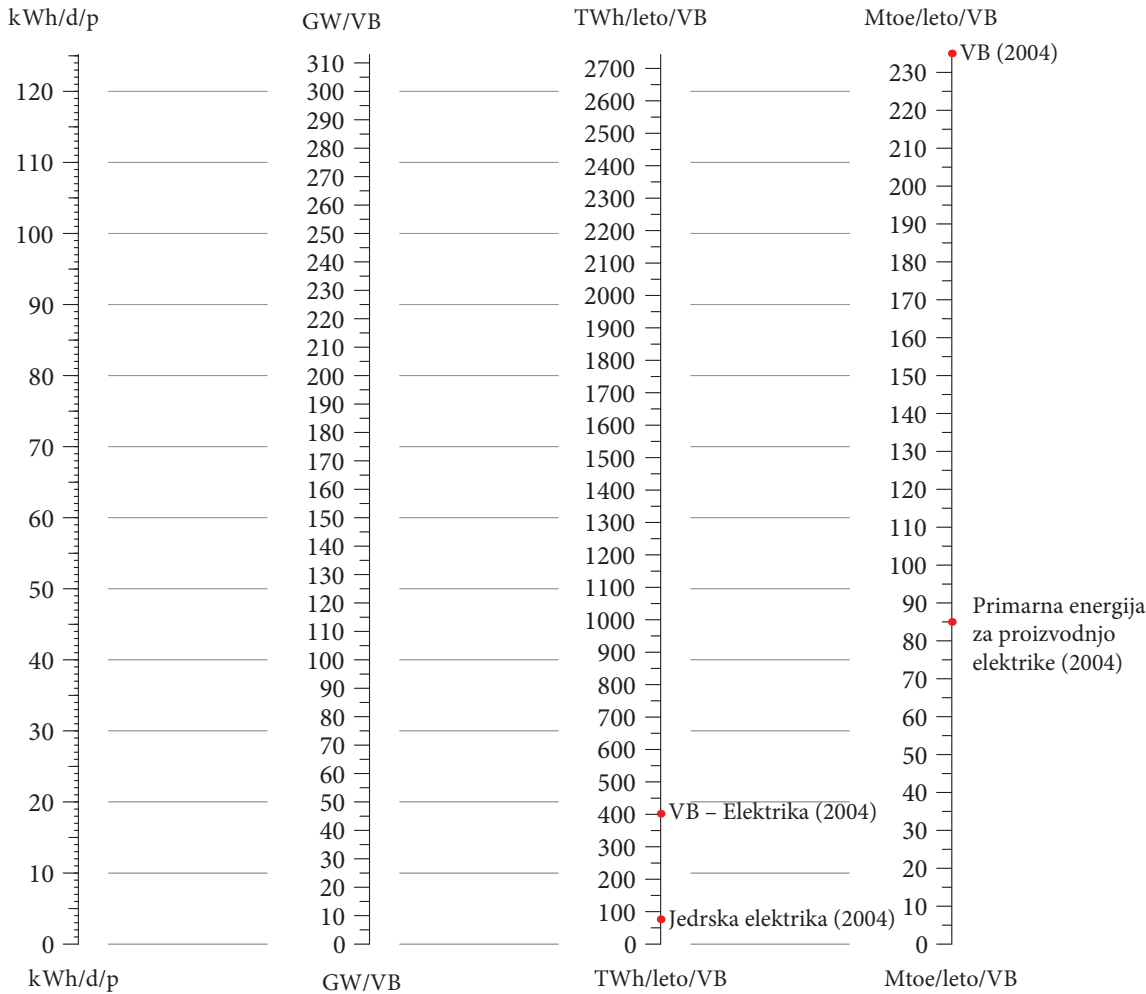
David MacKay je profesor tehniških ved na Univerzi v Cambridgeu. V Cambridgeu je študiral naravoslovne vede, nato pa pridobil doktorski naslov iz programa Računalništvo in živčni sistemi na Kalifornijskem tehnološkem inštitutu. V Cambridge se je kot raziskovalec strokovnega združenja Royal Society vrnil na Darwin College. Širša mednarodna javnost ga pozna po njegovih raziskavah na področju strojnega učenja, informacijske teorije ter komunikacijskih sistemov ter po izumu programskega vmesnika Dasher, ki omogoča učinkovito komuniciranje v kateremkoli jeziku z uporabo katerekoli mišice. Mesto predavatelja na Oddelku za fiziko Univerze v Cambridgeu je prevzel leta 1995, delo profesorja na omenjenem oddelku pa opravljal med letoma 2003 in 2013. Od leta 2005 posveča veliko svojega časa izobraževanju javnosti o energiji. Je tudi član društva Royal Society.

Devet mesecev po izdaji knjige »Sustainable Energy – without the hot air« je David MacKay prevzel mesto glavnega znanstvenega svetovalca britanskega ministrstva za energijo in podnebne spremembe.



Avtor, julij 2008.
Avtor fotografije: David Stern.

Pretvorbena lestvica za moč



1 kWh/d enako kot 1/24 kW
 GW pogosto se uporablja za »zmogljivost«
 (maksimalna izhodna moč)
 TWh/y pogosto se uporablja za povprečno
 izhodno moč
 1 Mtoe »en milijon ton naftnega ekvivalenta«

VB (Velika Britanija) = 60 milijonov ljudi

ZDA povprečna raba: 250 kWh/d na prebivalca

Evropa povprečna raba: 125 kWh/d na prebivalca

Najpogosteje uporabljene enote v javnih dokumentih o različnih vrstah energije so:
 teravatne ure na leto (TWh/y)

1000 TWh/y v Veliki Britaniji je približno enako
 45 kWh/d na prebivalca.

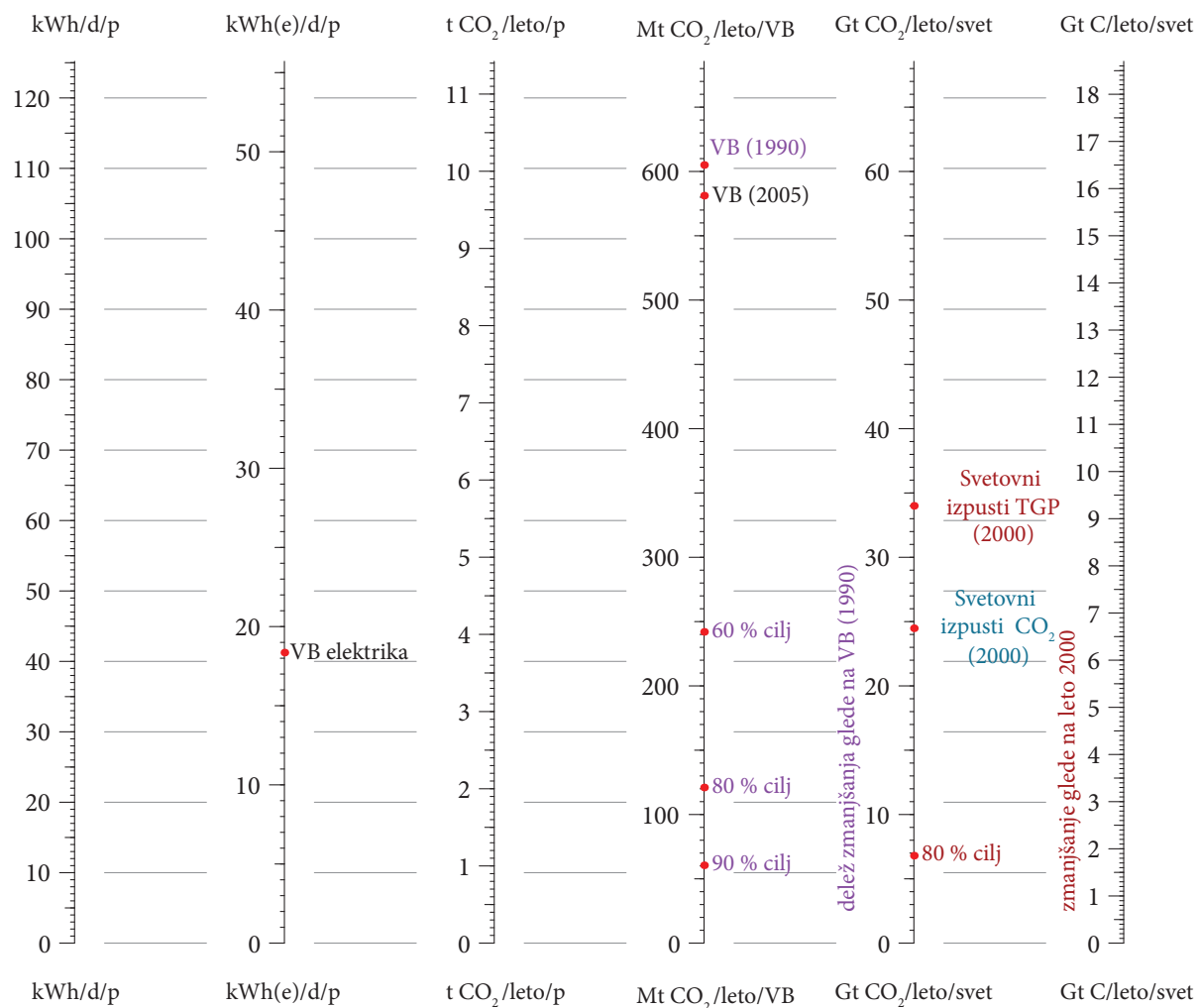
gigavati (GW)

2,5 GW v Veliki Britaniji je enako 1 kWh/d
 na prebivalca.

milijoni ton naftnega ekvivalenta na leto (Mtoe/y)

2 Mtoe/y v Veliki Britaniji je približno 1 kWh/d
 na prebivalca.

Pretvorbena lestvica za ogljik



kWh stopnja pretvorbe kemične energije:

1 kWh ↔ 250 g CO₂ (nafta, bencin)

(pri plinu: 1 kWh ↔ 200 g CO₂)

kWh(e) električna energija je dražja:

1 kWh(e) ↔ 445 g CO₂ (plin)

(Pri premogu so izpusti CO₂ dvakrat večji)

t CO₂ tona CO₂

MtC milijon ton ogljika

»VB« = 60 milijonov prebivalcev

»Svet« = 6 milijard prebivalcev

Trajnostna energija - brez razgretega ozračja

Avtor: David J. C. MacKay

Prevajalki: Maja Ropret in Andreja Krašna

Urednici slovenske izdaje: Alenka Žumbar Klopčič in Mojca Drevenšek

Recenzenti slovenske izdaje: doc. dr. Tomaž Žagar,

izr. prof. dr. Andrej Kitanovski, prof. dr. Marko Marhl

Lektoriranje: Breda Munda in Maja Sušin

Ilustracija na naslovnici: Roman Peklaj

Oblikovanje in postavitve: Pasadena IP

Izdajatelj: Energetika.NET, d. o. o.

Elektronska naslova: urednistvo@energetika.net, prodaja@energetika.net

Spletna naslova: www.energetika.net, www.energijadoma.si

Tisk: Tiskarna Januš

Naklada: 1000 izvodov

Izid knjige so omogočili:



British Embassy
Ljubljana

