

# Vaclav Smil

Jak svět  
doopravdy  
funguje

# Jak svět doopravdy funguje

Vyšlo také v tištěné verzi

Objednat můžete na  
[www.knihazlin.cz](http://www.knihazlin.cz)  
[www.albatrosmedia.cz](http://www.albatrosmedia.cz)

≡ KNIHA ZLIN

Vaclav Smil

**Jak svět doopravdy funguje – e-kniha**

Copyright © Albatros Media a. s., 2022

Všechna práva vyhrazena.  
Žádná část této publikace nesmí být rozšiřována  
bez písemného souhlasu majitelů práv.

  
**ALBATROS** MEDIA

---

**JAK SVĚT  
DOOPRAVDY  
FUNGUJE**



**VACLAV  
SMIL**

# **JAK SVĚT DOOPRAVDY FUNGUJE**

Přeložil Ivo Magera



# Obsah

## Úvod

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| <i>Proč potřebujeme tuto knihu?</i> | 11 |
|-------------------------------------|----|

## 1. Energie

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| <i>Paliva a elektřina</i>               | 25 |
| <i>Zásadní změny</i>                    | 26 |
| <i>Moderní způsoby využití energie</i>  | 32 |
| <i>Co je to energie?</i>                | 36 |
| <i>Vzestup a relativní pokles ropy</i>  | 45 |
| <i>Množství výhod elektřiny</i>         | 49 |
| <i>Než zapnete spínač</i>               | 54 |
| <i>Dekarbonizace: rychlost a rozsah</i> | 56 |

## 2. Produkce potravin

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| <i>Jíme fosilní paliva</i>                                | 64 |
| <i>Tři údolí během dvou staletí</i>                       | 69 |
| <i>Co vstupuje dovnitř</i>                                | 73 |
| <i>Energetické náklady chleba, kuřecího masa a rajčat</i> | 78 |
| <i>Motorová nafta v pozadí mořských plodů</i>             | 86 |
| <i>Paliva a potrava</i>                                   | 89 |
| <i>Je možné se vrátit zpátky?</i>                         | 91 |
| <i>Uskromnit se – nebo se zcela obejít</i>                | 97 |

## 3. Materiální svět

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| <i>Čtyři pilíře moderní civilizace</i>                | 104 |
| <i>Čpavek: plyn, který živí svět</i>                  | 108 |
| <i>Plasty: rozmanité, užitečné, problematické</i>     | 115 |
| <i>Ocel: všudypřítomná a recyklovatelná</i>           | 120 |
| <i>Beton: svět postavený z cementu</i>                | 128 |
| <i>Perspektiva materiálů: nárůst starých i nových</i> | 135 |

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 4. Globalizace                                                 |     |
| <i>Stroje, mikročipy a další</i>                               | 139 |
| <i>Vzdálený původ globalizace</i>                              | 143 |
| <i>Globalizace hnaná větrem</i>                                | 145 |
| <i>Parní stroje a telegraf</i>                                 | 148 |
| <i>První dieselové motory, létání a radiotechnika</i>          | 152 |
| <i>Velké dieselové motory, turbíny, kontejnery a mikročipy</i> | 155 |
| <i>Vstup Číny, Ruska a Indie</i>                               | 164 |
| <i>Násobky globalizace</i>                                     | 167 |
| <i>Dlouhá ruka Moorova zákona</i>                              | 170 |
| <i>Nevyhnutelnost, neúspěchy a neúměrnost</i>                  | 172 |
| 5. Riziko                                                      |     |
| <i>Od virů přes stravu po sluneční erupce</i>                  | 179 |
| <i>Jíst jako v Kjótu – nebo jako v Barceloně</i>               | 183 |
| <i>Vnímání a tolerance rizika</i>                              | 188 |
| <i>Vyčíslení rizik každodenního života</i>                     | 192 |
| <i>Dobrovolná a nedobrovolná rizika</i>                        | 198 |
| <i>Přírodní hrozby; méně rizikové, než vypadají v televizi</i> | 204 |
| <i>Konec naší civilizace</i>                                   | 208 |
| <i>Několik úvah závěrem</i>                                    | 217 |
| 6. Životní prostředí                                           |     |
| <i>Jediná biosféra, kterou máme</i>                            | 222 |
| <i>Kyslík není v ohrožení</i>                                  | 224 |
| <i>Budeme mít dostatek vody a jídla?</i>                       | 227 |
| <i>Proč není Země trvale zamrzlá</i>                           | 233 |
| <i>Kdo objevil globální oteplování?</i>                        | 237 |
| <i>Kyslík, voda a potraviny v teplejším světě</i>              | 241 |
| <i>Nejistota, sliby a realita</i>                              | 247 |
| <i>Přání otcem myšlenky</i>                                    | 253 |
| <i>Modely, pochybnosti a realita</i>                           | 259 |



|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 7. Budoucnost                             |     |
| <i>Mezi apokalypsou a singularitou</i>    | 268 |
| <i>Nezdařené predikce</i>                 | 273 |
| <i>Setrvačnost, rozsah a hmotnost</i>     | 279 |
| <i>Nevědomost, vytěsňování a pokora</i>   | 285 |
| <i>Mimořádné závazky, pozdější přínos</i> | 292 |
| <br>Dodatek: Číslo                        |     |
| <i>Řády jednotek</i>                      | 299 |
| Odkazy a poznámky                         | 304 |
| Poděkování                                | 387 |
| Rejstřík                                  | 389 |



# Úvod

## *Proč potřebujeme tuto knihu?*

Každá doba je něčím jedinečná, ale zatímco zkušenosti předchozích tří generací – tedy desetiletí od konce 2. světové války – nejspíš nebyly tak zásadně přelomové jako ty, co zažily tři generace před 1. světovou válkou, netrpěly ani ony nedostatkem výjimečných událostí a pokroku. Nejpůsobivější na tom je, že si vyšší životní úroveň nyní užívá více lidí, a to déle a v lepší zdravotní kondici než kdykoli předtím v dějinách. Je to však stále dopřáno jen menšině (asi pětině) světové populace, která se celkově blíží 8 miliardám.

Druhým obdivuhodným úspěchem je bezprecedentní rozvoj našeho porozumění fyzickému světu a všem formám života. Naše znalosti sahají od celkového zobecnění složitých systémů ve vesmírném (galaxie, hvězdy) a planetárním (atmosféra, hydrosféra, biosféra) měřítku až po procesy na úrovni atomů a genů: čáry vyleptané do povrchu nejvýkonnějších mikroprocesorů jsou jen dvakrát širší než průměr lidské DNA. Toto porozumění jsme proměnili ve stále se rozrůstající plejádu strojů, zařízení, postupů, pravidel a zásahů, na nichž stojí moderní civilizace, a nesmírný rozsah našich celkových znalostí – a způsobů, jimiž jsme je implementovali tak, aby nám sloužily – je daleko za hranicemi chápání jakéhokoli jednotlivce.

V roce 1500 bylo možné na florentském náměstí Piazza Signoria potkat skutečné renesanční muže – ne však o mnoho později. Ještě

v polovině 18. století mohli dva francouzští učenci, Denis Diderot a Jean le Rond d'Alembert, se skupinou přispěvatelů shrnout znalosti doby do poměrně vyčerpávajících hesel své mnohasvazkové *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. O několik generací později se rozsah a specializace našich znalostí řádově rozšířily, když došlo k zásadním objevům počínaje magnetickou indukcí (Michael Faraday v roce 1831, základ výroby elektřiny) přes metabolismus rostlin (Justus von Liebig, 1840, základ hnojení plodin) až po teorii elektromagnetického pole (James Clerk Maxwell, 1861, základ veškeré bezdrátové komunikace).

V roce 1872, století po vydání posledního svazku *Encyclopédie*, je jakýkoli soubor znalostí odsouzen jen k povrchnímu zachycení rychle se rozšiřující škály témat, a o další půldruhé století později je nemožné shrnout naše znalosti dokonce ani v úzce vymezených oblastech: pojmy jako „fyzika“ nebo „biologie“ jsou celkem bezobsažné nálepky a odborníci na fyziku částic budou jen velmi složité rozumět už první stránce nové výzkumné zprávy z virologie. Je zřejmé, že tato atomizace znalostí nijak neusnadnila jakékoli veřejné rozhodování. Vysoce specializovaná odvětví současné vědy se stala natolik odbornými, že i mnohým z těch, kteří v nich působí, nezbývá než získávat praxi až do třiceti i více let, aby se dokázali připojit k tomuto novému kněžství.

A i když pak mají v oboru dlouholeté zkušenosti, až příliš často se nedokážou shodnout na nejvhodnějším postupu. Pandemie SARS-CoV-2 jasně ukázala, že neshody mezi experty mohou sahát až k tak zdánlivě jednoduchým rozhodnutím, jako je nošení roušek. Ještě do konce března 2020 (třetí měsíc pandemie) Světová zdravotnická organizace (WHO) jejich nošení nedoporučovala, pokud člověk není nakažený, a k opaku dospěla až začátkem června 2020. Na čí stranu se pak mají přiklonit lidé bez jakýchkoli

zvláštních znalostí a jak mohou chápat smysl těchto rozepří, které dnes často končí odvoláním nebo postupným ústupem od původně rezolutních prohlášení?

Přesto ani přetrvávající nejistota a podobné rozpory neomlouvají to, do jaké míry většina lidí nechápe základní fungování současného světa. Vždyť zajímat se o to, jak se pěstuje pšenice (kapitola 2) nebo vyrábí ocel (kapitola 3), nebo si uvědomit, že globalizace není ani nová, ani nevyhnutelná (kapitola 4), není totéž, jako chtít po někom pochopit femtochemii (studie chemických reakcí v extrémně krátkých časových intervalech  $10^{-15}$  sekund, Ahmed Zewail, držitel Nobelovy ceny za rok 1999) či polymerázovou řetězovou reakci (rychlá replikace DNA, Kary Mullis, držitel Nobelovy ceny za rok 1993).

Proč má tedy většina lidí v rozvinutých společnostech tak povrchní znalosti o tom, jak doopravdy funguje svět? Zřejmým vysvětlením je složitost moderního světa: lidé neustále přicházejí do styku s černými skříňkami, jejichž relativně jednoduché výstupy vyžadují minimální nebo žádné chápání toho, co se děje uvnitř. To platí pro tak rozšířená zařízení, jako jsou mobilní telefony a notebooky (stačí napsat jednoduchý dotaz), stejně jako pro činnosti prováděné v masovém měřítku, jako je očkování (jistě celosvětově nejlepší příklad z roku 2021, při němž je – typicky – jedinou pochopitelnou součástí procesu vyhrnutí si rukávu). Jenže příčiny tohoto nedostatečného chápání jdou za rámec skutečnosti, že rozmach dnešních znalostí vede ke specializaci, jejíž odvrácenou stránkou je čím dál horší chápání – nebo dokonce neznalost – základních principů.

Dvěma výraznými příčinami tohoto nedostatku chápání jsou urbanizace a mechanizace. Od roku 2007 žije více než polovina lidstva ve městech (v rozvinutých zemích více než 80 %) a na rozdíl

od industrializujících se měst v 19. a na začátku 20. století jsou pracovní místa v moderních městských aglomeracích především ve službách. Většina současných hustě osídlených měst je tak odtržena nejen od produkce potravin, ale i od výroby strojů a zařízení, a rostoucí mechanizace všech výrobních činností znamená, že se jen velmi malá část světové populace účastní výroby energií a materiálů, které tvoří náš moderní svět.

V Americe je nyní do produkce potravin přímo zapojeno jen okolo 3 milionů mužů a žen (farmáři a najatí zaměstnanci) – tedy lidí, kteří skutečně orají a osévají pole, aplikují hnojiva, vytrhávají plevel, sklízí úrodu (sběr ovoce a zeleniny je nejpracnější součástí tohoto procesu) a pečují o zvířata. To je méně než 1 % obyvatelstva země, není proto divu, že většina Američanů nemá ani ponětí, nebo jen mlhavou představu o tom, jak vzniká chleba nebo plátky masa, které jí. Pšenici sklízí kombajny, ale sklízí také sójové boby nebo čočku? Jak dlouho trvá, než se selátko promění ve vepřovou kotletu – týdny, nebo roky? Naprostá většina Američanů to prostě neví – a mnohde jinde jim zdatně sekundují. Čína je největším světovým výrobcem oceli – taví, odlévá a válcuje jí každoročně téměř miliardu tun – na tom všem se však podílí méně než 0,25 % z 1,4 miliardy jejích obyvatel. Jen zanedbatelné procento čínské populace se někdy ocitlo poblíž vysoké pece nebo vidělo ocelárnu s kontinuálním litím a rudými pásy tekoucí žhavé oceli. A toto odtržení je typické pro celý svět.

Další významnou příčinou slabého a dále se zhoršujícího chápání těchto základních procesů, díky nimž získáváme energie (ve formě potravy nebo paliv) a trvanlivé materiály (ať už kovy, nekovové nerosty nebo beton), je to, že začaly být považovány za staromódní – ne-li zastaralé – a výrazně nezajímavé ve srovnání se světem informací, dat a obrázků. Příslowecné „nejlepší

mozky“ nechodí studovat pedologii (vědu o půdách) a nesnaží se vyrobit kvalitnější cement; místo toho je přitahují nefyzické informace, jen tok elektronů v myriádách mikrozařízení. Právníci, ekonomové, programátoři či finanční manažeři jsou nepoměrně štědře odměňováni za práci zcela vzdálenou materiální realitě života na Zemi.

Navíc mnozí z těchto uctívačů dat uvěřili, že elektronickými toky se tyto svérázné staré materiální potřeby stanou zbytečnými. Pole budou nahrazena městským výškovým zemědělstvím a syntetické produkty nás v konečném důsledku zbaví potřeby pěstovat jakékoli potraviny úplně. Dematerializace, podporovaná umělou inteligencí, ukončí naši závislost na masách tvarovaných kovů a zpracovaných nerostů, a nakonec se možná obejdeme bez životního prostředí Země: kdo by ho potřeboval, když se chystáme osídlit Mars? To vše samozřejmě nejsou jen hrubě předčasné předpovědi, jde o fantazie podporované společností, v níž se falešné zprávy staly běžnými a kde realita a fikce splývají do takové míry, že důvěřivá mysl, snadno podléhající až kultovním vizím, věří tomu, co by bystřejší pozorovatelé v minulosti nemilosrdně považovali za hraniční nebo vyložený klam.

Nikdo z lidí, kteří čtou tuto knihu, se na Mars nepřestěhuje. Všichni budeme i nadále jíst obilniny vypěstované v půdě na obrovských zemědělských plochách, nikoli v mrakodrapech vymyšlených přívrženci takzvaného městského zemědělství; nikdo z nás nebude žít v dematerializovaném světě, v němž není místo pro tak nenahraditelné přírodní služby, jako je vypařování vody nebo opylování rostlin. Jenže zajišťování těchto existenčních nezbytností bude čím dál náročnější, protože velká část lidstva žije v podmínkách, z nichž se bohatá většina vymanila před generacemi, a protože rostoucí poptávka po energiích a materiálech zatěžuje biosféru

natolik a tak rychle, že jsme ohrozili její schopnost zachovat toky a zásoby v mezích, které by byly v souladu s jejím dlouhodobým fungováním.

Abychom si uvedli jedno klíčové srovnání: v roce 2020 nečinila průměrná roční spotřeba energií na osobu u zhruba 40 % světové populace (3,1 miliardy obyvatel, mezi něž patří téměř všichni lidé v subsaharské Africe) o nic víc než hodnota dosažená v Německu a ve Francii v roce 1860! Aby se tyto 3,1 miliardy lidí přiblížily hranici důstojné životní úrovně, bude potřeba minimálně zdvojnásobit – ale spíše ztrojnásobit – spotřebu na osobu, a tím tedy znásobit výrobu elektřiny, zvýšit produkci potravin a vybudovat základní městskou, průmyslovou a dopravní infrastrukturu. Tyto požadavky nevyhnutelně vystaví biosféru další degradaci.

A jak si poradíme s rozvíjející se klimatickou změnou? Panuje široká shoda v tom, že musíme udělat *něco*, co zabráni řadě vysoce nežádoucích následků. Jenže jaký typ akce, jaká proměna našeho chování by fungovala nejlépe? Pro ty, kdo ignorují energetické a materiální požadavky našeho světa, pro ty, kteří upřednostňují mantry zelených řešení před pochopením, jak jsme se do tohoto bodu dostali, je recept jasný: prostě dekarbonizovat – přejít od spalování fosilního uhlíku ke konverzi nevyčerpatelných toků obnovitelných energií. Vskutku bolestné loučení v praxi: jsme civilizací založenou na fosilních palivech, jejíž technický a vědecký pokrok, kvalita života a prosperita spočívají ve spalování obrovského množství fosilního uhlíku a nemůžeme tento kriticky důležitý faktor našeho bohatství jen tak opustit během několika desetiletí, natož roků.

Úplná dekarbonizace globální ekonomiky do roku 2050 je nyní myslitelná pouze za cenu nepředstavitelného globálního ekonomického útluhu, nebo jako výsledek mimořádně rychlé transformace umožněné téměř zázračným technickým pokrokem. Kdo



však dobrovolně zrealizuje první uvedené, když nám stále chybí jakákoli přesvědčivá, praktická a ekonomicky dostupná globální strategie a k provedení druhého uvedeného technické prostředky? Co se vlastně stane? Propast mezi zbožným přáním a realitou je obrovská, v demokratické společnosti však nemůže žádná soutěž myšlenek a návrhů probíhat racionálním způsobem, pokud všechny strany nemají společnou alespoň špetku relevantních informací o reálném světě, místo omílání zaujatých postojů a prosazování požadavků odtržených od fyzických možností.

Tato kniha je pokusem tento deficit pochopení snížit, vysvětlit některé z nejzákladnějších skutečností, které jsou určující pro naše přežití a naši prosperitu. Mým cílem není ani předpovídat ani nastiňovat ohromující či skličující scénáře toho, co přijde. Není potřeba přispívat k tomuto populárnímu – avšak stále selhávajícímu – žánru; z dlouhodobého hlediska je zde příliš mnoho nečekávaných událostí a řada složitých interakcí, které nedokáže předvídat ani jednotlivec, ani skupina lidí. Nebudu obhajovat ani jakoukoli konkrétní (zaujatou) interpretaci reality, ať už by byla zdrojem zoufalství, nebo bezmezných očekávání. Nejsem pesimista ani optimista; jsem vědec snažící se vysvětlit, jak svět doopravdy funguje, a usilující o to, abychom si lépe uvědomili budoucí limity a příležitosti.

Tento druh poznávání musí být nevyhnutelně selektivní, avšak každé ze sedmi klíčových témat, vybraných k bližšímu prozkoumání, je existenčně dostatečně důležité: do obsahu knihy nebylo nic zařazeno svévolně. První kapitola ukazuje, jak vyspělé společnosti s vysokými energetickými nároky neustále zvyšují svou závislost na fosilních palivech obecně a na elektřině, nejflexibilnější formě energie, obzvlášť. Uvědomit si plně tyto skutečnosti znamená vnést

velmi potřebný narativ do nyní tak běžných tvrzení (vycházejících z nedostatečného pochopení komplikované reality), že můžeme úspěšně dekarbonizovat globální výrobu energií a že potrvá jen dvacet nebo třicet let, než si plně vystačíme s přeměnami obnovitelné energie. I když převádíme rostoucí podíl výroby elektrické energie na nové obnovitelné zdroje (solární a větrné, vedle již dávno zavedených vodních) a vyjíždíme na silnice stále častěji elektrickými auty, podstatně větší výzvou bude dekarbonizovat kamionovou, leteckou a lodní dopravu, stejně jako výrobu všech důležitých materiálů bez spoléhání se na fosilní paliva.

Druhá kapitola knihy je o nejzákladnější existenční nutnosti: produkci potravin. Zaměřuje se na vysvětlení toho, jak má mnoho potřebných věcí, od pšenice přes rajčata po krevety, jedno společné: neobejdou se bez značného – přímého i nepřímého – vstupu fosilních paliv. Uvědoměním si této základní závislosti na fosilních palivech můžeme dojít k realistickému chápání naší trvalé potřeby fosilního uhlíku: je poměrně snadné vyrábět elektrickou energii větrnými turbínami nebo solárními panely místo spalování uhlí či zemního plynu – podstatně složitější by však bylo pohánět bez kapalných fosilních paliv veškerou zemědělskou techniku a vyrábět bez zemního plynu a ropy všechna hnojiva a jiné agrochemikálie. Stručně řečeno: ještě desítky let nebude možné dostatečně nasýtit planetu bez využívání fosilních paliv jakožto zdrojů energie a vstupních surovin.

Třetí kapitola vysvětluje, jak a proč vyspělé společnosti fungují díky materiálům vytvořeným lidskou vynalézavostí, přičemž se zaměřím na to, čemu říkám čtyři pilíře moderní civilizace: čpavek, ocel, beton a plasty. Pochopením této reality vyjde najevo závažná povaha v poslední době módních tvrzení o dematerializaci moderních ekonomik, kterým dominují služby a miniaturizovaná

elektronická zařízení. Relativní pokles potřeby materiálu na jednotku mnoha konečných výrobků se stal jedním z určujících trendů moderního průmyslového rozvoje. V absolutních číslech však materiální nároky stále rostou dokonce i v nejrozvinutějších zemích světa a zůstávají hluboko pod jakoukoli myslitelnou mírou nasycenosti v rozvojových zemích, kde vlastnictví kvalitních bytů, kuchyňských spotřebičů a klimatizace (nemluvě o autech) zůstává snem miliard lidí.

Čtvrtá kapitola je příběhem globalizace neboli toho, jak se svět propojil díky dopravě a komunikaci. Na této historické perspektivě si ukážeme, jak staré (či přímo starověké) jsou počátky tohoto procesu a jak teprve nedávno dospěl ke svému nejvyššímu – a konečně skutečně globálnímu – rozsahu. A při bližším pohledu bude zřejmé, že budoucí vývoj tohoto rozporuplně vnímaného (velmi chváleného, velmi zpochybňovaného i velmi kritizovaného) fenoménu není nijak nezvratný. V poslední době byly zaznamenány jasné projevy jeho celosvětového ústupu a všeobecný trend k populismu a nacionalismu, není však zřejmé, nakolik se tyto změny rozvinou, nebo do jaké míry budou modifikovány v důsledku kombinace ekonomických, bezpečnostních a politických faktorů.

Pátá kapitola přináší realistický rámec pro zhodnocení rizik, s nimiž se setkáváme; moderním společnostem se podařilo vymýtit (dětská obrna) nebo snížit (porod) řadu dříve smrtelných či výrazně poškozujících rizik – mnohá nebezpečí tu však s námi budou navždy a nám se přitom opakovaně nedaří je předem správně odhadnout: buď je podceňujeme, nebo naopak přehnaně zveličujeme. Po přečtení této kapitoly budou čtenáři umět obstojně zhodnotit relativní rizika, jimž jsou běžně nedobrovolně vystaveni, i dobrovolných aktivit (od pádu v domácnosti po mezikontinentální lety, od života ve městě ohrožovaném hurikány po seskok

padákem) – a roztihneme zbytečné spory o nejzdravější typ stravy, když poznáme celou škálu možností, co bychom mohli jíst, abychom se dožili vyššího věku.

V šesté kapitole se podíváme na to, jak mohou postupující změny životního prostředí ovlivnit naše tři existenční potřeby: kyslík, vodu a potravu. Ve zbytku kapitoly se zaměříme na globální oteplování – změnu, která ovládla současná ekologická témata a vedla k tomu, že se na jedné straně vynořil nový – téměř apokalyptický – katastrofismus, a na druhé naprosté popírání tohoto procesu. Namísto převypravování či posuzování těchto sporných tvrzení (k tomu již došlo v příliš mnoha knihách) zdůrazním, že na rozdíl od široce zažitého dojmu se nejedná o nedávno odhalený jev: na podstatu tohoto procesu se přišlo už před více než 150 lety.

Navíc jsme si již více než jedno století vědomi skutečného stupně oteplování spojeného se zdvojnásobením obsahu  $\text{CO}_2$  v atmosféře a před více než půlstoletím ( $\text{CO}_2$  se měří bez přerušení a přesně od roku 1958) jsme byli varováni před bezprecedentní (a neopakovatelnou) povahou tohoto celoplanetárního experimentu. Rozhodli jsme se však tato vysvětlení, varování i zjištěné údaje ignorovat. Místo toho jsme naši závislost na spalování fosilních paliv znásobili, a zbavit se jí nepůjde ani snadno, ani bez vysokých nákladů. Zůstává nejasné, jak rychle to dokážeme změnit. Přidejte k tomu všechny další environmentální obavy a dojdete nutně k závěru, že na hlavní existenční otázku – dokáže lidstvo realizovat své ambice v rámci bezpečných hranic zemské biosféry? – neexistují jednoduché odpovědi. Je však nezbytně nutné, abychom faktům týkajícím se tohoto problému rozuměli, protože jen tak jej dokážeme efektivně řešit.

V závěrečné kapitole nahlédneme do budoucnosti, konkrétně na nedávné protichůdné tendence zaujímat katastrofismus (ti, kteří tvrdí, že zbývají jen roky, než se nad moderní civilizací

stáhne závěrečná opona) a technooptimismus (ti, kteří předpovídají, že síla vynálezů otevře neomezené horizonty za hranicemi Země a všechny pozemské problémy zmizí v bezvýznamné historii). Dá se vytušit, že ani pro jeden z těchto postojů nemám pochopení a můj pohled nebude stranit ani jedné z těchto doktrín. Nepředpokládám žádný bezprostředně hrozící dějinný zlom ani jedním směrem, nevidím žádný již nyní předurčený vývoj, ale spíše komplikovanou cestu závisející na našich – zdaleka ne předem vyloučených – krocích.

Tato kniha spočívá na dvou základech: dostatku vědeckých poznatků a půlstoletí mé výzkumné práce a psaní knih. K prvnímu patří tak klasické příspěvky, jako průkopnická objasnění přeměn energií a efektu skleníkových plynů z 19. století, stejně jako nejnovější zhodnocení globálních výzev a pravděpodobností různých rizik. A takto dalekosáhle pojatou knihu bych nemohl napsat bez desítky let sbíraných zkušeností z mezioborových studií, jež jsem již zúročil v řadě svých předchozích knih. Avšak místo uchylování se k dávnému srovnání lišky a ježka (liška ví spoustu věcí, ale ježek ví jednu velkou věc) mívám sklon považovat současné vědce buď za vrtače nejhlubších děr, jaké kdy byly vyvrtány (nyní převládající cesta ke slávě), nebo za prohledávače širokých obzorů (nyní značně omezená skupina).

Vyvrtat tu nejhlubší možnou díru a být nepřekonatelným mistrem malého kousku oblohy viditelného z jejího dna mě nikdy nelákalo. Vždy jsem dával přednost tomu, pátrat tak daleko a široko, jak mi to mé omezené schopnosti dovolovaly. Mým celoživotním zájmem bylo studium energií, protože k uspokojivému pochopení tohoto širokého oboru je potřeba porozumět fyzice, chemii, biologii, geologii a technickým oborům s přihlédnutím k historii a ke společenským, ekonomickým a politickým faktorům.

Téměř polovina z mých nyní již více než 40 (a většinou odbornějších) knih pojednává o různých aspektech energií, od rozsáhlých přehledů obecné energetiky a energie v průběhu dějin až po bližší pohledy na jednotlivé druhy paliv (ropa, zemní plyn, biomasa) a specifické vlastnosti a procesy (energetická hustota, přeměny energií). Zbytek výstupů prozrazuje mé mezioborové choutky: psal jsem o tak základních jevech, jako je růst – ve všech jeho přírodních i antropogenních podobách – a riziko, o globálním životním prostředí (biosféře, biogeochemických cyklech, globální ekologii, fotosyntetické produktivitě a sklizních), potravinách a zemědělství, materiálech (především oceli a hnojivech), technickém pokroku a o vzestupu a poklesu výroby, ale také o dějinách antického Říma či moderní Ameriky i o japonské stravě.

Tato kniha – jakožto produkt mého celoživotního úsilí a napsaná pro laiky – nemůže být ničím jiným než pokračováním mého dlouhodobého úsilí pochopit základní realitu biosféry, historie a světa, který jsme vytvořili. A také opět přichází s tím, co vytrvale dělám již desítky let: obhajuje odklon od extrémních názorů. Současní (a čím dál hlasitější či euforičtější) zastánci takových postojů budou zklamaní; zde nenajdou ani truchlení za světem, jehož konec nastane v roce 2030, ani poblouznění z úžasné transformační síly umělé inteligence, která přijde dříve, než si myslíme. Tato kniha se snaží poskytnout základ pro uvážlivější a nutně agnostický pohled, kdy věci nejde plně prokázat ani vyvrátit. Doufám, že můj racionální, věcný přístup pomůže čtenářům pochopit, jak svět doopravdy funguje a jaká je šance, že se dočkáme toho, že nabídne příštím generacím lepší životní vyhlídky.

Než se však ponoříte do konkrétních témat, musím vás na něco upozornit a zároveň o něco požádat. Tato kniha se hemží čísly (v metrických jednotkách), neboť realitu moderního světa nelze

pochopit jen z kvalitativních popisů. Mnohá čísla jsou nevyhnutelně buď velmi vysoká, nebo velmi nízká, a s takovou realitou se nejlépe zachází v řádech, vyjádřených celosvětově platnými předponami. Pokud vám v této oblasti chybí základy, postará se o to dodatek zaměřený na výklad čísel – velkých i malých –, a pro některé z vás proto může být smysluplnější začít číst tuto knihu od konce. Jinak se sejdeme v kapitole 1, v níž se blíže a kvantitativně podíváme na energie. Tento přístup by nikdy neměl vyjít z módy.





# 1. Energie

## *Paliva a elektřina*

Představme si následující vlivný scénář žánru science fiction: nikoli cestování ke vzdáleným planetám a pátrání po mimozemském životě, ale naopak Země a její obyvatelé jsou cílem vzdáleného sledování mimořádně vyspělou civilizací, jejíž zástupci vysílají sondy k sousedním galaxiím.

Proč to dělají? Jen pro uspokojení ze systematického pochopení, a možná taky proto, aby se nedočkali nebezpečných překvapení, kdyby se snad pro ně stala cizí planeta obíhající okolo bezvýznamné hvězdy ve spirální galaxii hrozbou, nebo kdyby si potřebovali najít druhý domov. Proto obyvatelé této planety periodicky provádějí dálkový průzkum Země.

Představme si dále, že se sonda této civilizace přibližuje k naší planetě jednou za 100 let a že je naprogramována tak, aby ji obletěla znovu (pro bližší prozkoumání), zaznamená-li nezpozorovaný druh konverze energie – změnu jedné formy energie na jinou –, nebo na ní založený nový fyzický projev. V základním fyzikálním smyslu lze jakýkoli proces – ať už déšť, výbuch sopky, růst rostlin, predátorství mezi živočichy nebo zvyšování lidské moudrosti – definovat jako posloupnost energetických konverzí a sondy této civilizace během milionů let po vzniku Země zaznamenaly pouze různorodé, ale v podstatě stále tytéž projevy sopečných erupcí, zemětřesení a atmosférických bouří.

## *Zásadní změny*

První mikroorganismy se na Zemi objevily přibližně před 4 miliardami let, oblétaající sondy vzdálené civilizace je však nezaregistrovaly, neboť se jednalo o vzácné a skryté formy života v blízkosti alkalických hydrotermálních prúdů na dně oceánů. První příležitost k bližšímu prozkoumání Země vyvstává již před 3,5 miliardou let, kdy oblétaující sonda zaznamenaná v mělkých mořích první jednoduché, jednobuněčné, fotosyntetické mikroby: absorbují blízké infračervené záření – tedy záření těsně za viditelným spektrem – a neprodukují kyslík.<sup>1</sup> Pak uplynou stovky milionů let bez známek změny, než začnou sinice využívat energie viditelného dopadajícího slunečního záření k přeměně CO<sub>2</sub> a vody na nové organické sloučeniny a uvolňovat přitom kyslík.<sup>2</sup>

To je radikální posun, díky němuž se začne okolo Země vytvářet okysličená atmosféra, ačkoli uplyne ještě dlouhá doba, než se za další 1,2 miliardy let objeví složitější vodní organismy, kdy sondy zaznamenají vznik a rozšíření nádherně zbarvených červených řas (díky fotosyntetickému pigmentu fykoerytrinu) a mnohem větších hnědých řas. Zelené řasy přicházejí o necelou půlmiliardu let později a kvůli tomuto zrychlujícímu se rozšiřování mořských rostlin jsou sondy vybavovány kvalitnějšími senzory pro monitorování mořského dna. To se ukáže jako užitečné, když před více než 600 miliony lety učiní další epochální objev: zjistí existenci prvních organismů tvořených diferencovanými buňkami. Tato plochá, měkká stvoření přisedlá ke dnu (známá podle svého australského původu pod označením ediakarská fauna) jsou prvními jednoduchými živočichy vyžadujícími ke svému metabolismu kyslík a na rozdíl od řas, které jsou pouze unášeny vlnami a proudy, se dokážou sama pohybovat.<sup>3</sup>

A poté začnou sondy dokumentovat změny, které lze ve srovnání s předchozím vývojem označit za rychlé; místo přelétávání nad kontinenty bez života a čekání stovky milionů let na další epochální změny zaznamenávají rostoucí, vrcholící a klesající vlny vzniku, rozšiřování a vyhynutí pestré palety živočišných druhů. Toto období začíná kambrickou explozí malých mořských přisedlých živočichů (před 541 miliony let, nejprve mezi nimi převládali trilobiti), pokračuje nástupem prvních druhů ryb, obojživelníků, suchozemských rostlin a čtyřnohých (a proto nebyvale pohyblivých) zvířat. Periodickým vymíráním dochází ke snižování, někdy téměř k úplnému vymizení této rozmanitosti, a ještě před pouhými 6 miliony lety sondy neobjeví žádný organismus, který by planetě dominoval.<sup>4</sup> Nedlouho poté však sondám málem unikne důležitost mechanického posunu s obrovskými energetickými důsledky: mnozí čtyřnozí tvorové se rychle vzpřímí, neboli začnou nemožně chodit po dvou končetinách, a před více než 4 miliony lety se tento druh pohybu stává normou pro menší bytosti podobné opicím, které začínají trávit více času na zemi než na stromech.<sup>5</sup>

Nyní se intervaly mezi reportováním zaznamenáníhodných událostí zásadně zkracují ze stovek milionů na pouhé statisíce let. Nakonec nástupci těchto raných dvounožců (které řadíme mezi lidoopy, patřící do rodu *Homo*, spolu s dlouhou řadou našich předků) provedou něco, co je uvede na cestu zrychleného přechodu k dominanci na planetě. Před několika sty tisíci lety totiž sondy našich mimozemšťanů detekují první extrasomatické využití energie – tedy její použití mimo tělo neboli jakoukoli přeměnu energie kromě požívání potravy –, když někteří z těchto vzpřímených chodců ovládnou oheň a začnou ho úmyslně používat k vaření, svému pohodlí a zajištění bezpečí.<sup>6</sup> Tímto řízeným spalováním se mění chemická energie rostlin na tepelnou energii

a na světlo, což lidoopům umožňuje konzumovat jídla, která byla předtím těžko stravitelná, ohřívat se za chladných nocí a chránit se před nebezpečnými zvířaty.<sup>7</sup> Jde o první kroky směrem k vědomému přetváření a ovládání životního prostředí v do té doby nebývalém měřítku.

Tento trend zesiluje s další podstatnou změnou: s osvojením si pěstování plodin. Zhruba před 10 tisíci lety sondy zaznamenávají první políčka úmyslně pěstovaných rostlin, čímž se malý zlomek celkové fotosyntézy na Zemi stává řízeným a ovládaným lidmi, kteří domestikují rostliny, tj. vybírají si, vysazují, ošetřují a sklízí plodiny pro svůj (pozdější) užitek.<sup>8</sup> Brzy následuje první domestikace zvířat. Než k ní dojde, jsou lidské svaly jediným existujícím primárním zdrojem pohybu – tedy konvertory chemické energie (potravy) na kinetickou (mechanickou) energii práce. Domestikací pracovních zvířat, počínaje dobytkem před nějakými 9 000 lety, je extrasomatická energie dodávána poprvé jinak než lidskými svaly; tato zvířata jsou využívána pro práci na poli, k čerpání vody ze studní, k tažení nebo nošení nákladů a k dopravě osob.<sup>9</sup> A mnohem později přichází první neživé primární zdroje pohybu: plachty před více než 5 tisíci lety, vodní kola před více než 2 tisíci lety a větrné mlýny před více než tisícem let.<sup>10</sup>

Poté nemají sondy příliš co pozorovat, protože následuje další období (relativního) zpomalení; století za stoletím se vše jen opakuje, vývoj stagnuje nebo dochází k velmi pomalému růstu a rozšiřování těchto dávno zavedených konverzí. V Americe a Austrálii (bez tažných zvířat i jakýchkoli jednoduchých mechanických zdrojů pohybu) je až do příchodu Evropanů veškerá práce vykonávána pouze lidskými svaly. V některých předindustriálních oblastech Starého světa se zapřažená zvířata, vítr a tekoucí voda významně podílejí na dodávání energie pro mletí obilí, lisování

oleje, broušení a kování, a tažná zvířata se stávají nepostradatelnými při těžkých polních pracích (především orání, zatímco sklizeň probíhá nadále manuálně), při přepravě zboží a vedení válek.

V tomto okamžiku však – a to i ve společnostech majících domestikovaná zvířata a mechanické primární zdroje pohybu –, většinu práce stále vykonává člověk. Můj odhad je – nevyhnutelně jen na základě přibližných historických celkových počtů pracovních zvířat a lidí a za předpokladu typických podílů denní práce vycházejících ze současných měření fyzické námahy –, že – ať už jde o začátek druhého tisíciletí našeho věku nebo o 500 let později (k roku 1500, na začátku raného novověku) – více než 90 % veškeré užitečné mechanické energie pocházelo z živočišné síly, zhruba rovnoměrně rozdělené mezi lidi a zvířata, a všechna tepelná energie vzešla ze spalování rostlinných paliv (hlavně dřeva a dřevěného uhlí, ale také slámy a sušeného zvířecího hnoje).

A když se sonda mimozemšťanů v roce 1600 přiblíží k Zemi, zpozoruje nebyvalou věc. Jedna ostrovní společnost přestává být odkázána výhradně na dřevo a spaluje stále více uhlí, paliva vzniklého fotosyntézou před desítkami milionů let a zkamenělého teplem a tlakem během svého dlouhého pobytu v zemi. Nejdůkladnější rekonstrukce ukazují, že uhlí jako zdroj tepla v Anglii předčí využití biomasových paliv okolo roku 1620 (nebo možná ještě dříve), někdy kolem roku 1650 se spalováním fosilního uhlíku získávají dvě třetiny veškerého tepla a podíl 75 % dosahuje okolo roku 1700.<sup>11</sup> Anglie tím výrazně předstihla okolní svět; všechny uhelné pánve, díky nimž se Velká Británie stala v 19. století největší světovou ekonomikou, produkují uhlí už před rokem 1640.<sup>12</sup> A již na začátku 18. století se začínají v některých anglických dolech používat parní stroje, první neživé primární zdroje pohybu poháněné spalováním fosilního paliva.

Tyto rané stroje jsou tak neefektivní, že je lze používat pouze v dolech s pohodově dostupnou zásobou paliva bez nutnosti dopravy.<sup>13</sup> Velká Británie však zůstává pro sondy mimozemšťanů po generace nejzajímavějším státem, protože je výjimečným inovátorem. Ještě v roce 1800 dosahuje těžba uhlí v několika evropských zemích a Spojených státech dohromady jen malého zlomku britské produkce.

V roce 1800 sonda zaznamenává, že na celé planetě dodávají rostlinná paliva stále více než 98 % veškerého tepla a světla, které dominantní dvounožci využívají, a že svaly lidí a zvířat poskytují stále více než 90 % veškeré mechanické energie potřebné v zemědělství, ve stavebnictví a výrobě. Ve Velké Británii, kde v 70. letech 18. století představil James Watt zdokonalený parní stroj, začíná firma Boulton & Watt vyrábět stroje, jejichž průměrný výkon odpovídá práci 25 silných koní, avšak do roku 1800 neprodala ani 500 těchto strojů, čímž sotva znatelně snížila celkovou práci vykonávanou tažnými koni a těžce pracujícími dělníky.<sup>14</sup>

Dokonce ještě okolo roku 1850 rostoucí těžba uhlí v Evropě a Severní Americe dodává jen 7 % veškeré energie z paliv, téměř polovina veškeré užitečné kinetické energie pochází z tažných zvířat, okolo 40 % z lidských svalů a jen 15 % ze tří neživých primárních zdrojů pohybu: vodních kol, větrných mlýnů a pomalu se rozšiřujících parních strojů. Svět poloviny 19. století se mnohem více podobá světu roku 1700, či dokonce 1600 než světu roku 2000.

Avšak v roce 1900 se již podíl fosilních a obnovitelných paliv a primárních zdrojů pohybu celosvětově významně zvyšuje, neboť polovina veškeré primární energie pochází z moderních zdrojů (uhlí a částečně už i ropa) a druhá polovina z tradičních paliv (dřevo, dřevěné uhlí, sláma). V průběhu 80. let 19. století generují první primární elektrinu turbíny ve vodních elektrárnách, později

pochází elektřina z geotermálních zdrojů a po 2. světové válce z jaderných, solárních a větrných zdrojů (nové obnovitelné zdroje). Ale také v roce 2020 bude stále více než polovina elektřiny světa vyráběna spalováním fosilních paliv, především uhlí a zemního plynu.

V roce 1900 dodávají neživé primární zdroje pohybu téměř polovinu veškeré mechanické energie; nejvíce k tomu přispívají parní stroje spalující uhlí, následují účinnější vodní kola a nové vodní turbíny (první se začaly používat po roce 1830), větrné mlýny, zcela nové parní turbíny (před rokem 1890) a motory s vnitřním spalováním (benzínové, objevující se rovněž po roce 1880).<sup>15</sup>

V roce 1950 jsou fosilní paliva zdrojem téměř tří čtvrtin primární energie (mezi nimiž nadále vede uhlí) a neživé primární zdroje pohybu – nyní v čele s benzínovými a dieselovými motory s vnitřním spalováním – produkují více než 80 % veškeré mechanické energie. V roce 2000 jsou na palivech z biomasy závislí pouze chudí lidé v rozvojových zemích, kdy dřevo a sláma tvoří jen okolo 12 % primární světové energie. Na živé primární zdroje pohybu připadá pouze 5% podíl mechanické energie, kdy námaha lidí a práce tažných zvířat je téměř zcela nahrazena stroji poháněnými kapalnými palivy nebo elektromotory.

V průběhu posledních dvou století jsou sondy našich fiktivních mimozemšťanů svědkem rychlého celosvětového nahrazování zdrojů primární energie, doprovázeného expanzí a diverzifikací zdrojů fosilní energie a neméně rychlého zavádění, osvojování a růstu kapacit nových neživých primárních zdrojů pohybu: prvních parních strojů poháněných uhlím a poté motorů s vnitřním spalováním (písty a turbíny). Nejnovější návštěva z vesmíru by byla svědkem skutečně globální společnosti, založené a závislé na stacionární i mobilní konverzi fosilního uhlíku v masovém měřítku, využívané všude snad až na několik neobydlených částí planety.

## *Moderní způsoby využití energie*

Co využití extrasomatické energie k pohybu znamenalo v praxi? Globální dodávkou primární energie se obvykle myslí její celková (hrubá) výroba, více vypovídající však je brát v úvahu jen energii, která je k dispozici pro převedení na jiné užitečné formy. Pro tento účel je třeba odečíst ztráty, k nimž dochází před spotřebou (během třídění a praní uhlí, rafinace ropy, zpracování zemního plynu), neenergetické využití (především jako vstupní suroviny chemického průmyslu, ale také jako maziva strojů od čerpadel přes turbíny letadel až po materiál pro povrch silnic) a úbytky při přenosu elektřiny. Vezme-li je v úvahu – a výrazně je zaokrouhlíme, abychom nenavodili nepodložený dojem vysoké přesnosti –, ukazují mé výpočty 60násobný nárůst využití fosilních paliv během 19. století, 16násobný v průběhu 20. století a za posledních 220 let zhruba 1500násobný.<sup>16</sup>

Tento růst závislosti na fosilních palivech je nejdůležitějším klíčem k vysvětlení pokroku moderní civilizace – ale i souvisejících obav z možné zranitelnosti jejich dodávek a vlivu jejich spalování na životní prostředí. Ve skutečnosti byl nárůst spotřeby energie výrazně vyšší než uvedený 1500násobek, protože musíme vzít v úvahu souběžný nárůst průměrné účinnosti konverze energií.<sup>17</sup> V roce 1800 nedosahovalo spalování uhlí v pecích a kotlech pro výrobu tepla a ohřívání vody více než 25–30% účinnosti a u parních strojů byly v užitečnou práci přeměněny jen 2 % spotřebovaného uhlí, což vedlo k celkové účinnosti energetické konverze nejvýše 15 %. O století později bylo efektivnějšími pecemi, kotli a stroji dosaženo celkové účinnosti téměř 20 % a do roku 2000 činil průměrný konverzní poměr okolo 50 %. Díky tomu došlo během 20. století k téměř 40násobnému nárůstu užitečné energie, od roku 1800 pak zhruba 3500násobného.



Abychom získali ještě jasnější obrázek rozsahu těchto změn, měli bychom tyto poměry vyjádřit v přepočtu na obyvatele. Světová populace vzrostla z 1 miliardy v roce 1800 na 1,6 miliardy v roce 1900 a na 6,1 miliardy v roce 2000. Proto stouply dodávky užitečné energie (všechny hodnoty jsou v gigajoulech na osobu) z 0,05 v roce 1800 na 2,7 v roce 1900 a přibližně na 28 v roce 2000. Hlavní příčinou dalšího celosvětového růstu na zhruba 34 GJ/osobu v roce 2020 byl hospodářský vzestup Číny po roce 2000. Průměrný obyvatel zeměkoule má dnes k dispozici téměř 700krát více užitečné energie než naši předchůdci na začátku 19. století.

Kromě toho se během života lidí narozených těsně po 2. světové válce tato hodnota mezi roky 1950 a 2020 více než ztrojnásobila, z cca 10 na 34 GJ na osobu. Převědeme-li poslední hodnotu na snáze představitelné ekvivalenty, je to, jako by měl průměrný pozemšťan každý rok k dispozici asi 800 kilogramů (0,8 tuny, tedy skoro 6 barelů) ropy nebo přibližně 1,5 tuny kvalitního bituminózního uhlí. A použijeme-li přirovnání z hlediska fyzické práce, je to, jako by 60 dospělých pracovalo nepřetržitě ve dne v noci, a v ekonomicky vyspělých zemích by tento ekvivalent nepřetržitě pracujících dospělých osob činil, v závislosti na konkrétní zemi, většinou mezi 200 a 240. V průměru má nyní lidstvo k dispozici naprosto nebývalé množství energie.

Důsledky, pokud jde o lidskou námahu, počet hodin fyzické práce, množství volného času a celkovou životní úroveň, asi není potřeba vysvětlovat. Dostatek užitečné energie je základem i vysvětlením všech těchto vymožeností – od lepší stravy po masové cestování, od mechanizace výroby a dopravy po okamžitou osobní elektronickou komunikaci –, které se staly ve všech bohatších zemích spíše pravidlem než výjimkou. Nedávné změny se v celostátním měřítku značně liší ve své míře; jak lze očekávat, menší nárůsty

jsou v těch vyspělých zemích, kde spotřeba energie na obyvatele byla poměrně vysoká již v předchozím století, větší nárůsty jsou pak ve státech, které se dočkaly nejrychlejší modernizace svých ekonomik po roce 1950, především Japonsko, Jižní Korea a Čína. Ve Spojených státech se mezi roky 1950 a 2020 užitečná energie na obyvatele zdvojnásobila přispěním fosilních paliv a primární elektřiny (cca na 150 GJ), v Japonsku se více než zpětinasobila (téměř na 80 GJ/na osobu) a v Číně se zvýšila více než 120násobně (na necelých 50 GJ/na osobu).<sup>18</sup>

Sledování trajektorie využívání užitečné energie je velmi vypovídající, protože energie není jen jednou ze součástí složité struktury biosféry, lidských společností a jejich ekonomik, ani pouhou další proměnnou v důmyslné rovnici určující vývoj těchto vzájemně interagujících systémů. Přeměny forem energie jsou přímo základní podstatou života a evoluce. Na moderní historii lze nahlížet jako na nebyvale rychlou posloupnost přechodů k novým zdrojům energií a moderní svět je pak kumulativním výsledkem jejich přeměn.

Byli to fyzikové, kdo jako první rozpoznal zásadní význam energie ve věcech lidského života. V roce 1886 Ludwig Boltzmann, jeden ze zakladatelů termodynamiky, hovořil o volné energii – energii, která je k dispozici ke konverzi – jako o životním *kamp-fobjektu* (předmětu boje), který primárně vychází z dopadajícího slunečního záření.<sup>19</sup> Erwin Schrödinger, držitel Nobelovy ceny za fyziku z roku 1933, shrnul podstatu života takto: „Živá hmota se živí negativní entropií“ (negativní entropie neboli negentropie = volná energie).<sup>20</sup> Ve 20. letech 20. století, navazuje na tento fundamentální příspěvek fyziků 19. a počátku 20. století, došel americký matematik a statistik Alfred Lotka k závěru, že organismy, které dostupnou energii nejlépe zachycují, mají evoluční výhodu.<sup>21</sup>

Začátkem 70. let 20. století vysvětlil americký ekolog Howard Odum, jak „k pokroku vždy dochází díky zvláštním dodávkám energií, a pokrok se zastaví, kdykoli a kdekoli tyto dodávky chybí“.<sup>22</sup> A mnohem později fyzik Robert Ayres ve svých dílech opakovaně zdůrazňoval ústřední pojem energie ve všech ekonomikách: „Ekonomický systém je ve své podstatě systém na získávání, zpracování a přeměnu energie ve formě zdrojů na energii vtělenou do výrobků a služeb.“<sup>23</sup> Zjednodušeně řečeno, energie je jedinou skutečně univerzální měnou, a nic (od galaktických rotací až po jepičí život hmyzu) se nemůže uskutečnit bez jejích přeměn.<sup>24</sup>

Při takto poměrně snadno ověřitelných skutečnostech je těžké pochopit, proč moderní ekonomie, tento nástroj k vysvětlování reality a hledání zákonitostí, jehož proponenti mají větší vliv na veřejnou politiku než experti z jiných oborů, energii do značné míry ignoruje. Jak poznamenal Ayres, ekonomie nejen že postrádá jakékoli systematické povědomí o významu energie pro fyzikální proces výroby, ale dokonce předpokládá, „že na energii (příliš) nezáleží, protože podíl nákladů na energii v ekonomice je tak nízký, že ho lze zanedbat... jako by výstup bylo možné vyprodukovat pouhou prací a kapitálem – nebo jako by energie byla jen určitou formou člověkem vytvářeného kapitálu, který lze vyrábět (nikoli tedy těžit) prací a kapitálem“.<sup>25</sup>

Moderní ekonomové nedostávají odměny a ocenění za to, že by se zabývali energií, a moderní společnost se o ni zajímá pouze tehdy, když se dodávky některé základní komerční formy energie jeví ohroženy a její ceny stoupají. Google Ngram Viewer, nástroj umožňující zjišťovat popularitu pojmů, které se objevily v tištěných zdrojích od roku 1500 do roku 2019, tuto skutečnost ilustruje: během 20. století zůstávala frekvence výskytu pojmu „cena energie“ (v angličtině) celkem zanedbatelná až do náhlého zvýšení,

teré začalo počátkem 70. let 20. století (kdy OPEC zvýšil cenu ropy pětinasobně, čímž se budeme v této kapitole ještě podrobněji zabývat) a vyvrcholilo začátkem 80. let. Jakmile pak ceny znovu klesly, následoval podobně strmý sestup frekvence výskytu tohoto spojení a do roku 2019 nebyl pojem „cena energie“ zmiňován o nic častěji než v roce 1972.

Pochopit, jak svět doopravdy funguje, není možné bez alespoň špetky zběhlosti v „energetické gramotnosti“. V této kapitole si nejprve vysvětlíme, že energii nemusí být snadné definovat, je však snadné nedělat obvyklou chybu spočívající v jejím zaměňování s výkonem.

Ukážeme si, jak různé formy energie (se svými specifickými výhodami a nevýhodami) a rozdílné hustoty energie (energie obsažená v jednotce hmotnosti nebo objemu, zásadně důležitá pro uložení a přenositelnost energie) ovlivnily různá stadia ekonomického vývoje, a nabídneme několik realistických hodnocení problémů, které stojí před společností, jež se chce zbavit závislosti na fosilním uhlíku. Jak uvidíte, naše civilizace je na fosilních palivech tak vysoce závislá, že nadcházející přechod bude trvat mnohem déle, než si většina lidí myslí.

### *Co je to energie?*

Jak definujeme tuto základní veličinu? Řecká etymologie je v tomto smyslu jasná. Aristoteles ve svém díle *Metafyzika*, spojil *ἐν* (v) s *ἐργον* (práci) a usoudil, že existenci každého předmětu udržuje *ἐνέργεια* (energie).<sup>26</sup> Ta dává všem předmětům potenciál k akci, pohybu a změně, což není špatné vystižení schopnosti být přeměňována na jiné formy, ať už zvedáním, házením nebo hořením.

Během následujících dvou tisíciletí se změnilo jen málo. Až Isaac Newton (1643–1727) formuloval základní fyzikální zákony týkající se hmotnosti, síly a hybnosti a z jeho druhého pohybového zákona lze odvodit základní jednotky energie. V moderním vědeckém vyjádření je 1 joule síla 1 newtonu zrychlující těleso o hmotnosti 1 kilogramu o  $1 \text{ m/s}^2$  na dráze 1 metru.<sup>27</sup> Tato definice se však týká pouze kinetické (mechanické) energie a rozhodně neposkytuje intuitivní pochopení energie ve všech jejích formách.

Naše praktické chápání energie se výrazně rozvinulo během 19. století díky éře přibývajících pokusů se spalováním, teplem, zářením a pohybem.<sup>28</sup> Tyto experimenty vedly k tomu, co ještě dnes považujeme za nejobvyklejší definici energie: „ke schopnosti konat práci“ – k definici platné pouze tehdy, pokud pojmem „práce“ míníme nejen určitou vykonanou práci, ale – jak ji popisoval jeden z předních fyziků tohoto období – zobecněný fyzikální „akt vytváření změny uspořádání systému proti působení síly, která se této změně brání“.<sup>29</sup> Pro porozumění je to ale asi příliš newtonovské.

Odpovědět na otázku „co je to energie“ nelze lépe než odkazem na jednoho z nejdůmyslnějších fyziků 20. století, Richarda Feynmana, který se (ve svých slavných *Přednáškách z fyziky*) s tímto problémem vypořádal svým typicky přímočarým způsobem, když zdůraznil, že „energie má mnoho *různých forem* a pro každou z nich máme zvláštní vzorec. Jsou to: gravitační energie, kinetická energie, tepelná energie, elastická energie, elektrická energie, chemická energie, energie záření, jaderná energie a energie hmoty.“ Načež dospívá k odzbrojujícímu, ale nepopíratelnému závěru:

Je důležité si uvědomit, že současná fyzika vlastně neví, co je to energie. Nepředstavujeme si, že by se energie vyskytovala v určitém počtu malých kuliček. Tak to není. Existují však vzorce pro výpočet určité

číselné veličiny a při sčítání všech příspěvků dostáváme... vždy stejné číslo. Je to abstraktní věc v tom smyslu, že neříká nic o mechanismu nebo *příčinách* jednotlivých vzorců.<sup>30</sup>

A tak tomu je. Pomocí vzorců můžeme velmi přesně vypočítat kinetickou energii letícího šípku nebo tryskového letadla, potenciální energii těžkého balvanu před zřícením ze skály, tepelnou energii uvolněnou chemickou reakcí, světelnou energii (energii záření) hořící svíčky nebo zaměřeného laseru –, ale nedokážeme tyto energie redukovat na jedinou snadno popsatelnou entitu v naší mysli.

Ovšem tato těžko uchopitelná povaha energie nijak netrápila armády rychlokvašených odborníků; už od začátku 70. let 20. století, kdy se energie stala významným tématem veřejné debaty, se vyjadřovali k otázkám energie s horlivostí a ignorancí. Energie je jedním z nejhůře uchopitelných a nejčastěji nepochopených principů, a chybné chápání základních skutečností v souvislosti s ní vedlo ke vzniku mnoha iluzí a deziluzí. Jak již bylo uvedeno, energie se vyskytuje v různých formách, a aby byla užitečná, potřebujeme ji převádět z jedné formy v jinou. Stalo se však normou nakládat s tímto mnohostranným pojmem jako s monolitem, jako by různé formy energie byly šmahem vzájemně zaměnitelné.

Některé z takových náhrad jsou relativně snadné a přínosné. Nahrazení svíček (chemická energie vosku transformovaná v energii záření) elektrickými žárovkami napájenými elektřinou generovanou parními turbínami (chemická energie paliv převedených nejprve na teplo a pak na elektrickou energii, která je poté převáděna na energii záření) dává ve výsledku řadu zřejmých přínosů (bezpečnější, jasnější, levnější, spolehlivější druh energie). Nahrazení parních strojů a dieselových motorů v lokomotivách

elektrickým pohonem přineslo levnější, čistší a rychlejší dopravu: všechny elegantní, vysokorychlostní vlaky jsou elektrické. Mnohé vhodné náhrady však zůstávají i nadále dražší, nebo sice existují, ale budou ještě po nějakou dobu reálně cenově nedostupné, nebo je nelze získat v požadovaném množství – bez ohledu na to, jak hlasitě jejich propagátoři vychvalují jejich přednosti.

Obvyklým příkladem prvního typu jsou elektromobily; v současnosti běžně dostupné, nejdražší modely jsou poměrně spolehlivé, avšak v roce 2020 byly stále ještě dražší než vozy podobné velikosti poháněné spalovacími motory. Pokud jde o druhou skupinu, syntéza čpavku potřebného k výrobě dusíkatých hnojiv se nyní prakticky neobejde bez zemního plynu jako zdroje vodíku, jak si blíže ukážeme v příští kapitole.

Vodík sice lze vyrábět rozkladem (elektrolýzou) vody, tento způsob je však stále pětikrát dražší, než když tento prvek získáváme z hojně dostupného a poměrně levného metanu – k tomu je ještě potřeba v masovém měřítku vybudovat vodíkový průmysl. A komerční dálkové lety letadel poháněných elektřinou (ekvivalent Boeingu 787 spalujícího letecký benzín na trase z New Yorku do Tokia) jsou výborným příkladem poslední kategorie: jak si ukážeme, jde o přeměnu energie, která zůstane nereálnou ještě po dlouhou dobu.

První termodynamický zákon říká, že při přeměnách energií se nikdy žádná energie neztratí: ať už jde o chemickou na chemickou při trávení potravy, chemickou na mechanickou při pohybu svalů, chemickou na tepelnou při spalování zemního plynu, tepelnou na mechanickou při rotaci turbíny, mechanickou na elektrickou v generátoru nebo elektrickou na elektromagnetickou, když si svítíme na stránku při čtení. Při všech přeměnách energie však nakonec vzniká ztrátové nízkoteplotní teplo: žádná energie *se neztratila*, ale

její užitečnost, její schopnost vykonávat užitečnou práci, se snížila (druhý termodynamický zákon).<sup>31</sup>

Veškeré formy energie lze měřit ve stejných jednotkách: joule (J) je vědeckou jednotkou, kalorie (cal) se zase často používají ve výživových studiích. V následující kapitole, v níž se budeme podrobněji zabývat velkým množstvím energie vstupující do současné produkce potravin, narazíme na skutečně existenciální realitu rozdílnosti množství energie. Produkce kuřat vyžaduje celkové množství energie několikanásobně vyšší, než je energetický obsah kuřecího masa připraveného k jídlu. A ačkoli můžeme vypočítat energetický poměr (joule dovnitř/joule ven), je mezi vstupy a výstupy samozřejmě diametrální rozdíl; nemůžeme jíst naftu nebo elektřinu, zatímco libové kuřecí maso je téměř ideálně stravitelnou potravinou obsahující vysoce kvalitní bílkoviny, nepostradatelné makroživiny, které nelze nahradit obdobným množstvím energie z tuků a uhlovodíků.

Pokud jde o konverze energií, máme k dispozici řadu možností, z nichž některé jsou vhodnější, jiné méně. Chemická energie s vysokou hustotou v leteckém benzínu a motorové naftě je vynikající pro mezikontinentální lety a plavby, chcete-li však plout Tichým oceánem pod mořskou hladinou, bude nejlepší volbou vyrábět elektřinu štěpením obohaceného uranu v malém reaktoru.<sup>32</sup> A vrátíme-li se zpátky na souš, nejspolehlivějšími generátory elektřiny jsou velké jaderné reaktory; některé z nich dnes vyrábějí elektřinu po 90–95 % času, oproti zhruba 45 % v případě nejlepších pobřežních větrných turbín a 25 % u fotovoltaických článků i v těch nejslunnějších podnebních pásmech, přičemž solární panely v Německu vyrábějí elektřinu jen asi po 12 % času.<sup>33</sup>

Je to jednoduchá fyzika či elektrotechnika, přesto je pozoruhodné, jak často bývají tyto skutečnosti ignorovány. Další obvyklou