

VÁCLAV SMIL

JAK SE VYRÁBÍ DNEŠNÍ SVĚT

Materiály a dematerializace

Kniha, kterou doporučuje **Bill Gates**

Bizbooks

Jak se vyrábí dnešní svět

Vyšlo také v tištěné verzi

Objednat můžete na
www.bizbooks.cz
www.albatrosmedia.cz

Bizbooks®

Václav Smil

Jak se vyrábí dnešní svět – e-kniha

Copyright © Albatros Media a. s., 2017

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

ALBATROS  **MEDIA a.s.**

Obsah

<i>Předmluva: Proč a jak?</i>	5
1. Co bývá součástí	9
2. Jak jsme se sem dostali	19
2.1 Materiály, které jsou používány organismy	20
2.2 Materiály v pravěku	26
2.3 Materiály ve starověku a ve středověku	32
2.4 Materiály raného novověku	43
2.5 Vznik moderní materiálové civilizace	50
2.6 Materiály ve 20. století	61
3. Na čem nejvíce záleží	77
3.1 Materiály biologického původu	78
3.2 Stavební materiály	88
3.3 Kovy	97
3.4 Plasty	104
3.5 Průmyslové plyny	110
3.6 Hnojiva	117
3.7 Materiály v elektronice	120
4. Jak proudí materiálové toky	127
4.1 Účty materiálových toků	129
4.2 Materiálové toky USA	136
4.3 Evropské účty	143
4.4 Materiály v modernizaci Číny	148
4.5 Energetické náklady materiálů	153
4.6 Hodnocení životního cyklu	169
4.7 Recyklace	182

5. Dematerializujeme?	193
5.1 Zdánlivá dematerializace	195
5.2 Relativní dematerializace: snížení konkrétní hmotnosti	198
5.3 Následky dematerializace	209
5.4 Relativní dematerializace v moderních ekonomikách	222
5.5 Klesající energetická náročnost	232
5.6 Dekarbonizace a odsíření	244
6. Materiálové vyhlídky	253
6.1 Přírodní zdroje	255
6.2 Méně plýtvání	265
6.3 Nové materiály a dematerializace	271
6.4 Šance na zásadní změnu	278
Dodatek A Jednotky a jejich násobky	291
Dodatek B Americká materiálová výroba, HDP a obyvatelstvo, 1900–2005	293
Dodatek C Celosvětová populace, hospodářský produkt, výroba potravin, hlavní materiály a paliva, 1900–2010	295
Dodatek D Celosvětové energetické náklady hlavních materiálů v r. 2010	297
Dodatek E	299
<i>O autorovi</i>	301
<i>Odkazy</i>	303
<i>Rejstřík</i>	349

Předmluva: Proč a jak?

Dějiny lidstva – evoluce našeho druhu, prehistorický přechod od lovectví a sběračství ke stálému zemědělství, vzestup a pád antiky, středověkých civilizací i civilizací raného novověku, ekonomické pokroky minulých dvou století, mechanizace zemědělství, diverzifikace a automatizace průmyslové ochrany, obrovský nárůst spotřeby energie, rozšíření nových komunikačních a informačních sítí a impozantní nárůst kvality života – by nebyly možné bez rozmáhajícího se a postupně stále spletitějšího a komplexnějšího využívání materiálů. Lidská vynalézavost přetvořila tyto materiály nejprve v jednoduché oblečení, nástroje, zbraně a přístřešky, později pak do mnohem propracovanějších obydlí, náboženských a pohřebních staveb, vyrobila z nich čisté kovy i slitiny a generace posledních let z nich vyrobily rozsáhlé průmyslové a dopravní infrastruktury, velkoměsta, syntetické a kompozitní sloučeniny, stejně jako substráty a věci umožňující vznik nového elektronického světa.

Tento pokrok neprobíhal lineárně, nýbrž se skládal ze dvou nesrovnatelných období. První se vyznačovalo velmi pomalým růstem, který začal v pravěku a pokračoval až do nástupu rychlé ekonomické modernizace, tj. do 18. století ve větší části Evropy, do 19. století v USA, Kanadě a Japonsku a do druhé poloviny 20. století v Latinské Americe, na Středním Východě a v Číně. Převažující většina lidí žila v těchto společnostech pouze s omezeným počtem kusů jednoduchého majetku, který si sami vyrobili nebo který vyrobili řemeslníci jako jedinečné kusy či případně v malých sériích – zatímco výrobky z velkovýroby, ať už šlo o kovové předměty, pálené cihly a dlaždice nebo sklenice na pití, byly příliš drahé, než aby si je většina mohla dovolit.

Hlavním důvodem omezeného zpracování materiálů byla energie: po tisíciletí limitovala naši schopnost těžit, zpracovávat a přepravovat materiály biologického původu a nerosty kapacita živého pohonu (lidské a zvířecí svaly), které vypomáhala jednoduchá mechanická zařízení a pouze pomalu se zlepšující kapacita tří mechanických pohonů, které lidé znali již ve starověku: plachty, vodní kola a větrné mlý-

ny. Teprve až přeměna chemické energie ve fosilních palivech na energii (nejprve vnějším spalováním uhlí pro pohon parních motorů, později vnitřním spalováním kapalin a plynů pro pohon benzínových a dieselových motorů a ještě o něco později plynových turbín) přinesla podstatnou změnu a v druhé fázi představovala rychle nastupující začátek materiálové spotřeby, tj. éry dále urychlované výrobou elektřiny a rozmachem komerčních chemických syntéz, jejichž výrobou vznikalo ohromné množství sloučenin od hnojiv po plasty a léky.

A tak se svět rozdělil na bohatou menšinu, která ovládá obrovské materiálové toky a začleňuje je do dlouho přetrvávajících struktur a spotřebních produktů trvanlivých, ale i pomíjivých, a na většinu pobírající nízký příjem, jež z materiálů vlastní jen zlomek toho, co se nachází v zásobách a tocích bohatého světa. Seznam věcí, bez kterých si většina Američanů, jak tvrdí, nedokáže svůj život představit, zahrnuje v dnešní době automobily, mikrovlnné trouby, domov, počítače, myčky, sušičky a domácí klimatizaci (Taylor *et al.*, 2006). A přitom zapomněli, jak je jejich původ krátký, protože před pouhými 50 lety většina z nich buď vůbec neexistovala, nebo jen v malém počtu. V r. 1960 méně než 20 % všech amerických domácností mělo myčku, sušičku nebo klimatizaci. V té době se na scéně objevily první barevné televizory a vůbec ještě neexistovaly mikrovlnné trouby, videopřehrávače, počítače, mobilní telefony ani SUV.

Oproti tomu stojí ti, co nic nemají, žijí v zemích s nízkým příjmem a mají tolik štěstí, že mají vlastní místo k bydlení v chabě postavených malých cihlových nebo dřevěných stavbách a něco málo uvnitř, jako je postel, kuchyňské náčiní a pár obnošených kousků oblečení. Čtenáři, kteří si nedokážou konkrétně představit, jak taková situace vypadá, by si měli prohlédnout knihu Petera Menzela *Material World: A Global Family Portrait*, v níž jsou rodiny 30 národů vyfotografovány před jejich příbytky uprostřed veškerého vybavení jejich domácností (Menzel, 1995). A tyto rozdíly v soukromém vlastnictví se odrážejí i ve veřejné sféře, na níž je vidět, jak velmi se liší rozsáhlá a drahá infrastruktura bohatého světa (dopravní sítě, fungující města, zemědělství dodávající značné potravinové přebytky, z velké části automatizovaná výroba) od nedostatečné a selhávající infrastruktury v chudých zemích.

Z těchto kontrastů je zřejmé, že bude potřeba mobilizovat a přetvořit enormní množství materiálu, aby se jen zúžila mezera mezi těmito dvěma světy. Současně je materiálová spotřeba hlavní příčinou znečištění a zhoršování životního prostředí a další násobení současné poptávky bude představovat čím dál větší ohrožení biosféry a jejích částí. Tyto dopady také vzbuzují otázky nastavení analytických hranic: jejich správný výběr je nezbytný, protože zahrnout všechny materiálové toky by bylo nepraktické, a také protože neexistuje jednotně přijímaná definice toho, co by nemělo v každém, relativně obsažném hodnocení moderního využití materiálů chybět. Tuto neexistující standardizaci dále komplikuje skutečnost, že některé analýzy zaujímají maximalistický přístup (tj. zahrnují toky všech zdrojů) a zahrnuly všechny myslitelné vstupy i odpadní toky včetně „skrytých“ toků vznikajících při těžbě nerostů a pěstování plodin a včetně kyslíku potřebného ke spalování, a dále vznikající plynné emise a odpady vypouštěné do vody nebo materiály rozptýlené do půdy.

Naproti tomu se jiné studie ve svých výčtech omezují na mnohem spolehlivěji vyčíslitelné přímé využití organických a anorganických materiálových vstupů, jež národní ekonomiky potřebují. Budu se opírat o tento přístup a zaměřím se blíže na klíčové materiály (klíčové podle jejich rozsahu nebo nenahraditelných charakteristik), které moderní ekonomiky spotřebovávají. Jejich ohromné materiálové požadavky nás nutí klást celou řadu fundamentálních otázek. Jak daleko by ještě bohatý svět měl tlačit materiálovou spotřebu? Existuje spojení mezi dalším zvyšováním spotřeby a zlepšením kvality života? Do jaké míry je možné odloučit ekonomický růst a zlepšování průměrného životního standardu od zvýšené materiálové spotřeby? Jinými slovy – vede relativní dematerializace (snížení materiálové spotřeby na jednotku výrobku či výkonu) k absolutnímu snižování poptávky po materiálech?

Abych dokázal přesvědčivě zodpovědět tyto otázky, musím nastínit evoluci způsobů používání materiálu lidmi, popsat všechny důležité materiály, jejich těžbu, výrobu a hlavní upotřebení a blíže se zaměřit na vzrůstající produktivitu těžby, zpracování, syntézy, finálních úprav a distribuce materiálů a na energetické náklady a ekologické dopady vzrůstající materiálové spotřeby. Nakonec nenabídnu, jako ostatně nikdy ve svých knihách, konkrétní časovou předpověď týkající se globálního a národního využití materiálů v budoucnosti. Místo toho popíšu, jaké činnosti by

mohly umožnit snížení naší závislosti na materiálech a současně bychom si mohli udržet slušnou kvalitu života i snížit mezeru rozevřených nůžek mezi bohatými ekonomikami a ekonomikami s nízkými příjmy.

Musíme si uvědomit, že v dlouhodobém výhledu ani ty nejefektivnější výrobní procesy, stavební i výrobní metody, které co nejméně plýtvají materiálem, ani (což se týká materiálů, které lze recyklovat) nejvyšší praktická dosažitelná míra recyklace nemusí dostačovat, aby vedly k dostatečně vysoké míře dematerializace, která by eliminovala rostoucí poptávku po materiálech vycházející z pokračujícího populačního růstu, zvyšujícího se životního standardu a všeobecné preference lidí hromadit majetek. Na základě toho je vysoce pravděpodobné, že abychom uspokojili naše touhy a současně zachovali integritu biosféry, budeme muset dobře zvolit, co pomůže snížit absolutní úroveň materiálové spotřeby, a tím redefinovat samotnou představu moderních společností, jejichž skutečná existence se zakládá na neustálých a značných materiálových tocích.

Co bývá součástí

Každá studie, jejímž cílem je osvětlit, jak komplexní jsou materiálové toky v moderní společnosti a jaké jsou jejich výchozí podmínky i následky, by se měla pokusit obsáhnout vše, co je pro ni skutečně podstatné a co pokrývá všechny nezbytné aspekty. Ovšem jednoduché vyjádření cíle takového úsilí okamžitě narazí na klíčový kategorický problém: co všechno má patřit k používání moderních materiálů? Neexistuje žádný jasný přehled, žádný obecně přijímaný seznam, jen více či méně liberálně (a také více či méně defenzivně) stanovené hranice zvoleného výběru. Tuto skutečnost nejlépe odráží přehled toho, co si starší komplexní studie zvolily jako svůj předmět zájmu a co převzaly nejdůležitější mezinárodní a národní databáze materiálových toků.

První srovnávací studie toků národních zdrojů (Adriaanse *et al.*, 1997) s podtitulem *The Material Basis of Industrial Economies* nezmiňuje ani vodu ani vzduch, ale zato nejen veškerou zemědělskou sklizeň (nejen suroviny, ale také veškeré potraviny a krmivo), lesnické produkty, rybářské úlovky, výsledky těžby nerostů a fosilních paliv, ale také skryté toky související s těžbou, přesunem či ztrátou materiálů, které mají nějaký dopad na životní prostředí, přičemž se jim současně nepřiznává žádná ekonomická hodnota. Většinu těchto skrytých toků představují přesuny skrývky, kterou je třeba v průběhu čerpáním nerostných zásob odstranit (a to především při povrchové těžbě uhlí nebo rud). Dále pak se jedná o zpracování odpadu (obzvláště ohromné toky související s oddělováním poměrně vzácných kovů z hornin), o půdu, písek a kamení, které je potřeba odstranit a přesunout při velkých stavebních projektech, nebo o půdní erozi z polí a z trvale obhospodařované půdy. Skryté toky nejsou sledovány a určit jejich objemy lze přinejmenším pouze pomocí přibližných odhadů, častěji však odhadů založených na nepřímých informacích.

A to platí dokonce ještě více v případě celkových ročních objemů skrytých toků souvisejících s dovozem surovin: je zřejmé, že tyto odhady budou nepřesné přede-

vším u velkých bohatých ekonomik (USA, Japonsko, Německo), které dováží širokou řadu materiálů ze značného počtu zemí. Není překvapením, že se studie v případě těchto výpočtů rozhodla použít celosvětové průměry: např. na tunu bauxitu počítá průměrně 0,48 t skrývky a na tunu železné rudy vychází 2 t skrývky – jde o celkové zobecnění, které nutně vede ke značným chybám, použije-li se jako národní průměr. Míra eroze je ještě o něco různorodější. Národních studií, které by ji detailně popisovaly, není mnoho a roční úbytky půdy se mohou lišit i v řádech dokonce v rámci relativně malých oblastí. Tato studie však použila pouze poměr odvozený z amerických záznamů. Další nanejvýš nejistou položkou zahrnutou do objemu toků je množství trávy spasené dobyt看em (krmivo pro ostatní zvířata se projevilo v položce sklizně).

Tři roky po této první komparativní studii se objevil další projekt pod záštitou Institutu pro výzkum světových zdrojů, World Resources Institute (WRI) pod názvem *The Weight of Nations* (Matthews *et al.*, 2000). Tato studie popisovala materiálové toky čtyř národů, jichž se týkala i původní studie (USA, Japonsko, Německo a Nizozemsko), a navíc Rakouska, a oproti původní studii (která uváděla poslední data z r. 1993) se vztahovala na období od r. 1975 do r. 1996. Svým podtitulkem *Material Outflows from Industrial Economies* naznačovala, že jejím zájmem jsou výstupy ve formě výsledků metabolismu současných společností. Stejně jako předchozí zpráva zahrnovala i tato studie veškerá fosilní paliva, skryté materiálové toky (s převahou skrývky z povrchové těžby uhlí) a rovněž zpracovávané odpady ropného a uhelného průmyslu.

Podobně byly vypracovány i odhady procesních ztrát a objemu skrývky u všech nepalivových nerostů a kovů, a zpráva rovněž určila objem zeminy přesunutý v rámci veškerých stavebních aktivit (stavby dálnic, veřejných i soukromých staveb, výkopových prací), ztráty z eroze půdy v zemědělství a odpad ze syntetických organických chemikálií a z farmaceutického průmyslu. Na rozdíl od první studie však tato zpráva z r. 2000 obsahovala rovněž údaje o dodatečných vstupech (kyslík pro spalování a dýchání) a výstupech včetně celkového objemu CO₂ jakožto produktu dýchání, a vodních par ze spalování, a odpadní toky rozlišovala podle toho, do jakého prostředí směřují: do vzduchu, půdy či vody. Ze vzdušných odpadů určila objemy pro plynné emise (CO₂, CO, SO_x a NO_x, těkavé organické uhlovodíky) včetně kyslí-

ku z veškerého spalování, odpady končící v půdě zahrnovaly pevný obecní odpad, průmyslový odpad a odpad v rozptýlené podobě (hnůj, hnojiva, posypovou sůl ze silnic, odpad z pneumatik, odpařená rozpouštědla) a dále odpady plynoucí do vody, a kvantifikovala objem organické zátěže a dusíkatých i fosfátových látek.

Eurostat zveřejňuje od r. 2000 roční souhrny národní materiálové spotřeby všech zemí EU, přičemž je celkový tok uváděn jako souhrn objemů fosilních paliv, biomasy (zemědělské a lesnické produkce), kovových rud a nekovových nerostů (Evropská Komise, 2001; Eurostat 2013). Metodologické pokyny Eurostatu, které se týkají analýzy účtů materiálových toků na národní úrovni, poskytují informace o konkrétních postupech při začleňování biomasy (potravin, krmiv, píce, spásané fytomasy, dřeva, ryb, lovené zvěře a výsledků sběru), kovových rud a nekovových nerostných surovin i veškerých forem fosilních paliv a všech disipativních využití produktů včetně organických a minerálních hnojiv, splaškových kalů, kompostu, pesticidů, semen, posypové soli a rozpouštědel (Eurostat, 2009; Schoer *et al.*, 2012). Soubory navržené Eurostatem rovněž počítají s nevyužitými surovinami (těžební skrývkou, ztrátami doprovázejícími produkci rostlinné biomasy, výkopovou zeminou, vybagrovaným materiálem a vedlejšími mořskými úlovky) a patří k nim stanovení objemu odpadních látek (CO₂, odpadních vod a odpadů na skládkách), ovšem nezahrnují kyslík ani vodu.

V r. 1882 požádal americký Kongres o roční souhrn statistik, které se týkají nerostných komodit produkovaných ve Spojených státech nebo do nich dovážených. Za zpracování těchto údajů byl nejprve zodpovědný Národní úřad pro geologický průzkum (US Geological Survey, USGS), následně Národní báňský úřad (US Bureau of Mines) a od r. 1995 opět Národní úřad pro geologický průzkum. Tyto statistiky představovaly základ prvního připravovaného přehledu materiálových toků v USA v letech 1900 až 1995 rozdělených do základních kategorií (Matos a Wagner, 1998). Jeho aktualizace, která obsahovala celkové údaje pro jednotlivé kategorie až do roku 2006, proběhla v r. 2009 (Matos, 2009). Údaje o jednotlivých prvcích, sloučeninách a materiálech jsou aktualizovány v roční frekvenci (USGS, 2013).

USGS se rozhodl zahrnout do svého národního přehledu materiálových toků pouze třetí ze tří materiálových tříd, vynechal tedy potraviny a palivo a zahrnul

pouze materiály, které jsou využívány na domácím trhu ve všech odvětvích hospodářství. Soubor poskytuje přehled celkových ročních údajů domácí výroby, vývozu, dovozu i domácí spotřeby. Nejsou obsaženy údaje o vodě, kyslíku, skrytých materiálových tocích ani fosilních palivech, naopak zahrnuty jsou veškeré suroviny, které jsou výsledkem zemědělských aktivit (bavlna, výnosy semen, průmyslové oleje, vlna, kožešina, zvířecí kožešiny, hedvábí a tabák), produkty lesnického průmyslu (různé druhy dřeva, překližka, papír a lepenka), kovy (např. hliník, zinek), značně rozsáhlý výčet nekovových nerostů (ať již těžených v jejich původní formě – jako např. sádrovec, grafit, rašelina – či upravovaných před dalším využitím – jako např. kámen z kamenolomů nebo cement – či synteticky vyrobených, jako je např. čpavek) a neobnovitelných organických látek získávaných z fosilních paliv (asfalt, vosky, oleje a maziva a další pevná, kapalná či plynná fosilní paliva používaná k výrobě při chemických syntézách).

Velmi málo těchto vstupů se používá ve své surové, přirozené podobě, prakticky všechny jsou zpracovávány (bavlna předením, dřevo mělněním, rudy tavením, kámen lámáním či řezáním a leštěním) a naopak většina těchto zpracovávaných materiálů se stává vstupem pro výrobu polotovarů a hotových výrobků (z bavlny se stává oblečení, z rozmělněné dřevoviny papír, z tavených kovů strojírenské díly, z drceného kamene se po smíchání s pískem a cementem dělá beton). Tento soubor produktů zemědělského a lesnického původu, průmyslových nerostů a neobnovitelných organických zdrojů poskytuje poměrně přesný přehled ročních úhrnů a dlouhodobých změn v materiálových tocích země. Zatímco se započítávají veškeré importy a exporty surovin, v potaz se neberou materiály, které obsahuje hotové obchodované zboží: vzhledem k jejich objemu a rozmanitosti by bylo velmi složité je vysledovat.

Kam se tak dostáváme? Ty studie materiálových toků, které pojímají předmět svého zkoumání vskutku *sensu lato* (tzn. prakticky jako všechny látky, které člověk využívá), započítávají vše kromě pozoruhodné výjimky – kromě vody. Jejich součástí tedy není jenom materiál biologického původu pro výrobu zboží, veškeré kovy, nekovové nerosty a organické suroviny, ale také veškerá zemědělská fytomasa (sklizené potraviny a krmivo, jejich odpady, pícniny a pastva), a veškerá paliva (biopaliva a fosilní paliva) a kyslík ke spalování. O něco méně restriktivní studie nezahrnují ani

kyslík ani potraviny či krmné plodiny a v potaz berou pouze zemědělské suroviny, které podléhají dalšímu zpracování ve zboží, nicméně zahrnují veškerou fyto masu a fosilní paliva. Na rozdíl od toho představuje přehled zpracovávaný USGS přístup *sensu stricto*, jelikož začleňuje pouze biologické suroviny používané pro další zpracování a nezahrnuje ani kyslík, ani vodu, ani žádná paliva (ať již biopaliva nebo fosilní paliva) a ani žádné skryté materiálové toky (které je vždy obtížné vyčíslit). Můj názor na nastavení hranic analýzy se téměř perfektně shoduje s výběrem USGS, ovšem aniž bych prostě jen odkazoval na tuto autoritu, vysvětlím krátce své vlastní důvody pro tento výběr.

Proč nepočítat s kyslíkem nutným ke spalování paliv, se dá poměrně snadno obhájit na základě volně dostupné nabídky doslova nevyčerpatelné složky naší atmosféry. Tvzení, že existuje vážné nebezpečí vyčerpání O_2 kvůli spalování, bylo vyvráceno již dávno (Broecker, 1970). Úplné spálení 1 kg uhlíku ve formě uhlí znamená spotřebu 2,67 kg kyslíku a spálení 1 kg uhlovodíku vyžaduje 4 kg O_2 . Celosvětové spalování objemu cca 8 Gt fosilního uhlíku v r. 2010 tedy znamenalo požadavek na 21 Gt O_2 neboli 0,0014 % objemu atmosféry z celkových 1,5 Pt O_2 – a dokonce i naprosté spálení (což je zhora nemožné) více než nadhodnocených celosvětových zdrojů fosilních paliv by znamenalo pokles obsahu O_2 v atmosféře o maximálně 2 %.

Neexistuje tedy nebezpečí, že by došlo k závažnému ztenčení zásoby (a to ani nemluvě o vyčerpání) tohoto prvku, a přesto ovládne domácí a mezinárodní statistické soubory, pokud je na základě konkrétního rozhodnutí zařazen do výčtu materiálových toků. Např. jak vychází z výpočtů komparativní studie WRI, kyslík představoval 61 % přímých zpracovaných materiálových výstupů v USA v r. 1996 a v Japonsku podíl této látky v tomtéž roce činil 65 % (Matthews *et al.*, 2000). Z čehož vyplývá, že objem domácích materiálových toků, do nichž zahrneme i spotřebu kyslíku, by představoval pouhý hrubý odhad závisející na rozsahu spalování fosilních paliv v konkrétním hospodářství.

Argument pro to nezahrnout skryté toky do výčtu domácích materiálových toků není o nic méně pádný: pokud z přehledu vynecháme kyslík, ovládnou by tyto toky celou statistiku domácích materiálových výstupů ve všech zemích, které mají buďto vysoký podíl těžebního průmyslu (obzvláště pak povrchové těžby uhlí a rud) nebo

rozsáhlé plochy zemědělské půdy podléhající závažné erozi. Není překvapením, že (pokud vynecháme kyslík) představují tyto skryté toky ve WRI analýze 86 % celkových domácích materiálových výstupů v USA nebo Německu, ale např. v Japonsku, jehož rozsah těžebního průmyslu i pěstování plodin je mnohem menší, byla tato míra nižší – 71 % (Matthews *et al.*, 2000). Nežádoucí dopady těchto přidružených toků na životní prostředí by neměly být při analýze konkrétních těžebních či zemědělských aktivit přehlíženy, ale není možné tyto toky určit s velkou přesností. V nich převažuje nevyužitá vytěžená zemina a kamení, těžební hlušina, odpad ze zpracovávání a půda narušená erozí, zatímco zemina a kamení přesouvané jako součást stavebních činností budou tvořit poměrně malý podíl.

Ale pokud se berou v potaz skryté toky, není hlavním problémem to, že tvoří hlavní část objemu domácích výstupů materiálů ve všech velkých, diverzifikovaných ekonomikách, což nepřekvapí, ale že nevybíravě přidávají na důležitosti některým kvalitativně nesrovnatelným tokům. Nepoužitelná hromada kamení, která zůstane v kamenolomu po jeho uzavření, nemusí být nutně zátěží pro životní prostředí, nemusí ani nijak překážet a navíc, pokud se kamenolom zatopí a vytvoří se umělé jezero, stane se tento skrytý materiál doslova a do písmene skrytým jako součást nového, utěšeného, vzhledu krajiny. Na druhou stranu (abych uvedl jen jeden z mnoha možných běžných příkladů) po zpracování bauxitu na hliník zůstává toxický odpad (který obsahuje těžké kovy), který často bývá lehce radioaktivní a je velmi leptavý (má vysoké pH).

A neméně důležitým bodem je rozdíl mezi skrytými toky *in situ*, které vznikají při těžbě nerostů (opuštěné kamenolomy, šterkovny a pískovny a uhelné či rudné doly s hromadami, kupami, slojemi nebo hlubokými jámami a příkopy zaplněnými nepotřebnými nerosty či odpadem po zpracování vytěženého materiálu), a půdní erozí způsobenou deštěm či větrem, která způsobuje přesun cenné ornice ne desítky či stovky, ale tisíce kilometrů po proudu či po větru. První typ skrytých toků nemusí lahodit oku a může i nemusí být toxický a jejich celkový dopad na životní prostředí mimo bezprostřední okolí může být zanedbatelný nebo se nemusí vůbec projevit, ale eroze je globálně důležitým, často regionálně nanejvýš znepokojivým a pro konkrétní místa devastujícím procesem, který snižuje (či ničí) produktivitu ploch určených

k pěstování zemědělských plodin, způsobuje naplaveniny ve vodních tocích, přispívá k eutrofizaci sladkých i pobřežních vod, vytváří trvalou degradaci ekosystému a přináší značné ekonomické ztráty.

Mé argumenty pro to nezapočítávat vodu vycházejí z několika důvodů, na jejichž základě je vhodnější s tímto nepostradatelným vstupem zacházet spíše odděleně než jej začleňovat do celkových materiálových požadavků moderních ekonomik. Prvním zřejmým, znovu opakovaným důvodem je kvantitativní stránka věci: začleněním vody by tato látka ovládla všechny domácí účty materiálových toků a zavádějícím způsobem by to vedlo ke snížení významu mnoha vstupů, jejichž roční toky představují malý podíl spotřeby vody, ale současně je jejich kvalitativní příspěvek nepostradatelný. Např. v r. 2005 byla celková spotřeba vody v USA něco přes 5 Gt (Kenny *et al.*, 2009), zatímco ostatní materiály využitě přímo hospodářstvím země (s převahou písku, šterku a kamení ve stavebnictví) obnášely méně než 3,8 Gt (USGS, 2013).

Navíc jsou zde podstatné kvalitativní rozdíly mezi těmito dvěma údaji. Největší část spotřeby vody (odpovídající téměř 60 % celkové spotřeby) představuje chladicí voda použitá pro provoz tepelných elektráren, kdy se nejedná o její skutečnou spotřebu, protože téměř všechna, až na malou (vypařenou) část, se téměř okamžitě dá využít k dalším účelům níže po proudu řeky. Na rozdíl od toho buď není vůbec možné znovu využít materiály, které se stanou součástí dlouhodobých struktur a produktů, nebo je recyklovatelná jen jejich část, a to až po poměrně dlouhé době, kdy se nacházejí mimo oběh toků. A ani druhou největší část spotřeby vody, přibližně 30 % celkové spotřeby USA v r. 2005, která se používá na zavlažování, nelze považovat za skutečnou spotřebu, jelikož se téměř všechna, až na drobný podíl, přes pěstované rostliny dostává zpět do atmosféry, projde kondenzací a stane se srážkami. A pokud by se o tom, zda začlenit vodu či ne, rozhodovalo na základě míry nedostatku, pak by bylo potřeba přísně rozlišovat mezi vodou pocházející z nadbytku srážek a vodou získávanou za vysokých nákladů z hlubokých a mizících zásob vody, jež nelze v rámci jedné civilizace nahradit.

Na tomto místě by mohlo být užitečné upozornit na jiný problém (ve srovnání s předešlými problémy menší) ve vztahu k souhrnným údajům o materiálových tocích, o němž se, alespoň pokud vím, doposud nezmínil žádný ze sestavovate-

lů těchto národních či celosvětových přehledů: tj. problém obsahu vody v písku a ve sklizené biomase. I když se zaměříme pouze na ty materiály biologického původu, které se používají jako průmyslové vstupy, pohybuje se jejich obsah vody mezi méně než 15 % v případě surové vlny až po více než 50 % u čerstvě pořezaných kmenů stromů (a rozsah je ještě širší, pokud uvažujeme potravinové plodiny, kdy se obsah vody pohybuje mezi 5 % u suchých semen po více než 90 % u čerstvé zeleniny).

Právě vytěžený písek může obsahovat více než 30 % vody, očištěný písek obsahuje 15–25 %, díky uskladnění v odvodňovacích kontejnerech se tato hladina sníží na 6 % a použitím rotační bubnové sušárny nebo fluidní sušárny se odstraní veškerá vlhkost až na přibližně 0,5 % u písku používaného při takových procesech, jako je odlévání oceli nebo hydraulické štěpení probíhající pod tlakem. Je zřejmé, že nejlepším řešením by bylo započítávat objemy veškerých materiálů vykazujících jakoukoliv úroveň vlhkosti v jejich naprosto suchém stavu, aby bylo možné srovnat jejich toky s těmi materiály, které žádnou vlhkost neobsahují. To však není v praxi možné, a proto všechny celkové údaje o domácích materiálech vykazují zdaleka ne zanedbatelný podíl vody.

Potraviny a paliva jsou zjevně nezbytné pro přežití každé civilizace. Jejich toky jsou v moderních společnostech, pro které je typická vysoká spotřeba energie i bohatá a rozmanitá strava, obzvláště objemné. V mnoha zemích s nízkými příjmy pak přetrvává důležitost tradičních biopaliv. Navíc na rozdíl od vody a kyslíku se jejich začleněním výrazně nezmenší podíl všech ostatních materiálůvých toků: např. dokonce i v USA bohatých na paliva se celková roční spotřeba uhlí, ropy a zemního plynu rovná přibližně 50 % všech neenergetických nerostů. Tak proč je opomíjet? Nezohlednit potraviny a paliva je možné pouze proto, že se tyto dvě velké spotřební kategorie tradičně zkoumají odděleně (výsledkem je bohatá literatura o výsledcích a perspektivách), ale i protože nejsou striktně vzato (*sensu stricto*) materiálem, látkou opakovaně používanou v jejím surovém stavu nebo přetvořenou do více či méně trvalého konečného produktu.

Na rozdíl od surového biologického materiálu (dřevo, vlna, bavlna, kůže, hedvábní), kovů, nekovových nerostů a neobnovitelných organických látek (asfalt, maziva,

vosky, uhlovodíkové vstupní suroviny) se potraviny a paliva nepoužívají při vytváření dlouhodobých struktur a nejsou transformovány ani včleňovány do stále širšího souboru pomíjivých, ale i přetrvávajících průmyslových, dopravních či spotřebních položek. Potraviny jsou rychle využívány k získání energie a živin, které umožňují růst a aktivitu lidských jedinců, zatímco paliva podléhají rychlé oxidační reakci (hoření), jejímž výsledkem jsou, ať už přímo nebo nepřímo, různé formy užitečné energie (teplo, pohyb, světlo): ani v jednom případě tedy nezvyšují materiální zásoby současných společností.

Na konec musím obhájit konceptuální změnu, která se týká zacházení s materiály, které podle materiálové klasifikace EU patří do kategorie disipativních toků. Podle evropské definice představuje osm kategorií disipativních ztrát soubor různých zbytkových materiálů: některé z nich se sčítají s celkovými objemy malých toků (řeč je zde o rozpouštědlech unikajících při čištění zasucha nebo zbytky z pneumatik po provozu na silnicích), jiné jsou podstatnější (hnůj, kaly z čistíren a kompost na hnojení zemědělské půdy), ale disipativní ztráty z obou těchto materiálových kategorií se nehlídají a je velmi těžké je určit. USGS přistupuje k větším tokům v této kategorii (sůl a další rozmrazovací materiály – včetně písku a drti – používané při posypu silnic v zimě, dusíkatá a fosfátová hnojiva a potaš jako hnojivo pro rostliny a travníky) jako k průmyslovým nerostům.

Zatímco zásoby soli a písku jsou hojné a jejich výroba není energeticky náročná, anorganická hnojiva představují kritické materiálové vstupy ve všech současných společnostech a není možné je přehlížet. Blíže se na ně podíváme, až budu mluvit o pokroku ve výrobě syntetických materiálů. Ale domnívám se, že většina zbývajících disipativních toků tvoří dohromady relativně malé objemy a jelikož již z jejich podstaty vyplývá nemožnost přesně je vyčíslit, převáží tyto negativní stránky veškerá pozitiva, která by plynula z jejich začlenění do konečného součtu spotřebovaného materiálu. A zatímco hnůj a kaly představují poměrně rozsáhlý objem odpadního materiálu, jde mnohem více o recyklaci vody než biomasy: kaly obsahují minimálně 80 % vody, čerstvý hnůj 70–85 %. Navíc v mnoha (možná i ve většině) případech by neměly být kaly z čistíren recyklovány, protože obsahují těžké kovy, patogeny, pesticidy a zbytky léků, steroidů a hormonů.

Zbývá mi tedy již jen jedna položka, kterou bych přidal k seznamu USGS, a to jsou průmyslové plyny. Ačkoliv vzduch (kyslík) je potřeba pro spalování fosilních paliv, hlavní zdroj energie moderní civilizace, jeho přidáním k položce celkového materiálového vstupu by byl vyvolán (jak jsem již vysvětlil) zkreslující a matoucí dopad podobný jako při zahrnutí veškerého využití vody. Ovšem určení množství využití plynů oddělených od vzduchu, které umožňují uskutečnění mnoha průmyslových procesů, je jiná věc. Co se týče jednoduchého množstevního vyčíslení celosvětového využití kyslíku, vodíku, dusíku a vzácných plynů, jako jsou argon či xenon, tvoří tyto prvky dohromady spíše malou položku, ale v kvalitativním ohledu je jejich využití nepostradatelné v nejrůznějších průmyslových odvětvích od výroby oceli (nejdůležitějším způsobem výroby kovu je výroba v kyslíkových konvertorech) až po syntézu amoniaku (s využitím dusíku separovaného ze vzduchu a vodíku z methanu) a efektivní osvětlení.

Jak jsme se sem dostali

Biosféra země je plná organismů, které využívají materiály na více než jen na svůj metabolismus. Kromě toho, co se agregátní hmoty materiálových toků ovládaných lidstvem týče, nejsou nijak zvlášť velké ve srovnání s produkcí anorganických látek mořskými organismy. Ale jedinečným lidským rysem je schopnost kombinovat celkový rozsah, specifické charakteristiky a stále rostoucí komplexnost využívání materiálů (těžba, zpracování a přeměna na konkrétní vstupy vhodné pro infrastrukturu a milióny výrobků). Pro lepší pochopení z evolučního hlediska se nejprve zmíním o nejpozoruhodnějších způsobech používání materiálů organismy mořským fytoplanktonem počínaje a primáty konče, způsobech, které se liší buď svým rozsahem toků, nebo jedinečnými charakteristikami.

Poté budu pokračovat stručným chronologickým přehledem využívání materiálů lidmi, přičemž se zaměřím nejprve na milníky naší prehistorie, především na ony stále jen nedokonale osvětlené výkony při megalitických stavbách, které vyžadovaly lámání kamene, jeho přepravu a často pozoruhodně přesné umístění masivních kvádrů. Dále shrnu a určím množství některých důležitých tradičních materiálů (kámen a dřevo) v antice, středověku a raném novověku (1500–1800), a zaměřím se na pokroky při budování silnic, akvaduktů, obřadních a náboženských staveb a lodí, dále na počátky metalurgie a její rozvoj a na materiály využívané v domácnostech.

Celou kapitolu uzavřu dvěma úzce souvisejícími kapitolami popisujícími vznik moderní materiální civilizace v průběhu 19. století a její prostorové rozpínání a zvyšování komplexnosti po r. 1900. Budu se soustředit na klíčové kvantitativní i kvalitativní body pokroku při používání materiálů, které položily základ společnosti 20. století, neboť umožnily těžbu fosilních paliv, industrializaci, urbanizaci a evoluci současných způsobů pozemní, vodní i vzdušné dopravy. Tyto vývojové procesy se zakládaly na materiálech, jejichž výroba vyžaduje vysoce energeticky náročné vstupy a jejichž zavedení a využívání je dynamicky provázáno s ohromným pokrokem

vědeckých a technických možností lidstva. Naopak nové materiály jsou hlavním motorem zvýšené produkce potravin a zlepšení hygienických podmínek, což vedlo k bezprecedentnímu zlepšení kvality života. Díky nim se rovněž rozšířily možnosti mechanické a automatické výroby i cestování do velkých vzdáleností, sdílení informací a telekomunikace.

2.1 Materiály, které jsou používány organismy

Je nevyhnutelné, aby organismy využívaly materiály: ty představují základ metabolismu. Základ života na naší planetě, fotosyntéza, probíhá všude na světě a vytváří novou biomasu tím, že umožňuje vstřebání více než 60 Gt uhlíku ročně prostřednictvím listů rostlin ve formě CO_2 z atmosféry (Smil, 2013), a miliónů tun tří klíčových makrobiogenních prvků (dusík, fosfor a draslík pronikajících do rostlin jejich kořeny), které pak společně vytvářejí tkáň a orgány rostlin. Ale všechny tyto nezbytné látky – které se odrážejí v nutričních požadavcích heterotrofních jedinců, ať už jsou to býložravci, masožravci nebo všežravci – nejsou obvykle zahrnovány mezi způsoby užití materiálu. Ty jsou vyhrazeny aktivním, mimotělním procesům.

Co se způsobu získávání materiálu týče, můžeme jej rozdělit do pěti hlavních kategorií. Tou nejméně frekventovanou a v celkovém souhrnu poměrně nevýznamnou kategorií je využití nasbíraného přírodního materiálu jako nástrojů. Druhou kategorií s omezeným celkovým dopadem je využívání vylučovaného materiálu pro stavbu ochranných konstrukcí či útvarů sloužících k chytání kořisti (což je případ pavoučích, často velmi uměleckých výtvarů). Další kategorií představuje odstraňování biomasy (a v dnešní době též materiálů vytvořených člověkem) a jejich účelové začlenění do často pozoruhodně navržených konstrukcí (počínaje bobřími přehradami po složité hnízda). Další v řadě je odstraňování a přemísťování půdy a hlíny (nadzemní hnízda termitů, komplikované nory hlodavců) a nakonec nejvydatnější aktivita v podobě získávání minerálů z vody, většinou s cílem vytvořit vnější skeleto. Tento proces převažuje u mořských organismů vytvářejících minerální schránky, jako jsou fytoplankton, koráli a měkkýši.

Činnosti využívající nástrojů jsou důkladně zdokumentovány u nejrůznějších druhů, např. u vyder, mořských racků, slonů i pěnkav (Shumaker *et al.*, 2011), ale

nejvyššího stupně komplexity dosáhly u šimpanzů, kteří používají stébla trávy nebo větvičky při sběru termitů nebo malých kamínků a kamenné kovádky při roztloukání oříšků, a u nich se dokonce rozvinuly v určitou kulturu (Wrangham *et al.*, 1996; Boesch a Tomasello, 1998; Whiten *et al.*, 1999). Pavoučí hedvábí je jistě tím nejpozoruhodnějším vylučovaným materiálem o odolnosti v tahu podobné vlastnostem kvalitní oceli (Brunetta a Craig, 2010). Na druhou stranu však existují i výměšky tak jemné jako ochranná pěnová pouzdra pěnodějek.

Mezi heterotrofními jedinci je poměrně rozšířené využívání nasbíraného materiálu. Dokonce některé jednobuněčné améby mohou vytvářet komplikované přenosné zdobné ulity ze zrněk písku, jejichž průměr je pouhých 150 μm (Hansell, 2007). Pravděpodobně tou nejpozoruhodnější sběračskou činností mezi hmyzem je sběr listů mravenci stříhači (rod *Atta*), kteří listy odstříhnou, odtáhnou do podzemí do důmyslných mravenišť, v nichž pěstují houby jako svou potravu (Hölldobler a Wilson, 1990). I bobři jsou aktivní při shromažďování dřeva pro své přehrady. Nicméně nejroznorodějšími a často i velmi působivými příklady staveb z nasbíraného materiálu jsou ptačí hnízda: vyskytují se hnízda od jednoduchých a spíše chaotických stébel či větviček až po promyšlené stavby, které si buduje čeleď tropických ptáků snovačovitých (*Ploceidae*), a mohou být poskládána z jednoho druhu nasbíraného materiálu nebo z různých pletiv (Gould *et al.*, 2007; Burke, 2012).

Ptáci používají nejen velké množství nasbíraného rostlinného pletiva (stébla trávy i těžké větve, které si nosí čápi a orli), ale i pera jiných druhů a pavoučí hedvábí (většinou vrabcovití). Některá hnízda mohou obsahovat tisíce jednotlivých kousků. Používání bláta (např. vlaštovkami) není až tak běžné, ale mnozí ptáci hnízdící na zemi (včetně tučňáků) si hledají malé kamínky, zatímco propracované stavby některých lemčků z Austrálie a Nové Guiney, jejichž úkolem je přilákat samičky, mohou obsahovat nejen takové barevné přírodní předměty, jako jsou mušle, plody, listy i květiny, ale také odhozený plastový odpad, kov či sklo a některé druhy dokonce vytvářejí nádvoří, aby pro namlouvané samičky připravili vynucenou vizuální perspektivu (Endler *et al.*, 2010). Některé druhy hmyzu si také pro svá hnízda sbírají různý materiál: např. vosíci ukusují drobné kousky dřeva a míchají je se slinným sekretem, kutilky zase tvoří válcovitá hnízda z bláta. Na rozdíl od nich si primáti,

naši nejbližší živočišní příbuzní, staví jednoduché dočasné úkryty jen z větví a listů na zemi nebo na stromech.

Pro druhy, které přemísťují zeminu, je typické především vyhrabávání tunelů, nor a hnízd, ale také využívání půdy a hlíny ke stavbě nadzemních staveb. Nejstarší nory byly hloubeny v oceánech období prekambria (před 650–700 milióny let) a časově se shodují s prvním výskytem makropredátorů (Turner, 2000). Jak ukázal Darwin ve své poslední publikované knize, žížaly dokážou vyvinout tak ohromné úsilí při přemísťování zeminy (kdy protlačují částčky svými hrdly a vyvrhují je na povrch), že by mohly přikrýt hlínou slavné památky lidské činnosti v pozoruhodně krátkém čase (Darwin, 1881). Hlodavci jsou svědomití stavitelé rozsáhlých podzemních sítí tunelů a hnízd, které umožňují řízení teploty i větrání a které jim umožňují snazší únik.

Největší masy dokážou v subtropických a tropických oblastech přemístit a využít termiti, kteří stavějí často impozantně vysoké a objemné stavby, jež nejenže poskytují přístřeší jejich rozsáhlým koloniím, ale také díky rozdílnému tlaku vzduchu umožňují umělou ventilaci (Turner, 2000).

Hustota biomasy tohoto čteného hmyzu žijícího v teplých oblastech se pohybuje od 2 g/m² v amazonském deštném pralese (Barros *et al.*, 2002) až po 5 g/m² v australské oblasti Queensland (Holt a Easy, 1993) a 10 g/m² v deštném pralese severovýchodní Brazílie u Sao Paola a v suchých stálezelených lesích severovýchodního Thajska (Vasconcellos, 2010). V afrických savanách může být hmotnost jimi vyrobené čerstvé biomasy více než dvojnásobná ve srovnání s biomasou vyprodukovanou slony (Inoue *et al.*, 2001). Druhy rodu *Macrotermes* používají částčky hlíny a tvoří kuželovitá hnízda o výšce obvykle 2–3 metry, někdy ovšem i 9 m, a základně typicky 2–3 metry v průměru, ačkoliv ani širší útvary nejsou výjimkou.

Celá masa termitiště (stěny a hlavní část hnízda) typicky váží mezi čtyřmi a sedmi tunami, ovšem prostorová hustota hnízd se značně liší – od jednoho až dvou na 1 ha až po deset na 1 ha (Fleming a Loveridge, 2003; Abe *et al.*, 2011; Tilahun *et al.*, 2012). V konečném výsledku se tedy celková hmota termitích hnízd pohybuje od pouhých 4 až 8 t/ha až po značných 15–60 t/ha. Velmi zdrženlivý odhad, kolik hlíny bylo vynaloženo na vybudování termitišť, se přiklání k 5 Gt

(průměrně 5 t/ha při oblasti s rozlohou cca 10 milionů km² tropických a subtropických savan obydlených tímto hmyzem), ale skutečné číslo by mohlo dosáhnout hodnoty několikanásobně vyšší. V každém případě to znamená, že roční objem materiálu použitého těmito drobnými heterotrofy by představoval stejný rozsah jako celosvětový objem těžby kovových rud a ostatních nepalivových nerostů naší civilizací na počátku 21. století.

V celkových číslech je objem materiálu sbíraného obratlovci za účelem budování úkrytů a objem půdy přemístěný heterotrofy (žížalami a termity) při dolování zanedbatelný ve srovnání s objemem sloučenin vyloučených druhů, které jsou schopny procesu biomineralizace, především pak fytoplanktonem, protisty a bezobratlými. Více než 30 biogenických minerálů (z nichž dvě třetiny jsou uhličitany) vytváří nízký počet cévnatých rostlin (které patří k rodu *Bryophyta* a *Trachaeophyta*), živočišných druhů od *Porifera* po *Chordata*, některé houby, mnozí protisté a někteří zástupci rodu *Monera* (Lowenstam, 1981; Boskey, 2003). Některé tyto organismy schopné procesu biomineralizace ukládají nerosty do organických matic, ale většina z nich vytváří mimobuněčné krystaly podobné krystalům vznikajícím z anorganických roztoků.

Co do objemu jsou největšími uživateli přírodních minerálů mořské organismy s biomineralizačními schopnostmi, které dokážou vylučovat anorganické sloučeniny díky chemikáliím, které získají absorpcí z vody. Tyto mořské organismy vytvářejí z roztoku CaCO₃ vápencové či aragonitové schránky. Tyto dva nerosty jsou téměř identické a liší se pouze strukturou svých krystalů ($2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$). Koráli tvořící útesy (z třídy *Anthozoa*, kteří patří ke kmeni žahavců – *Cnidaria*) jsou nejpozoruhodnějšími producenty biominerálů žijícími v koloniích, bičíkovci rodu *Coccolithophora* (mořský nanoplankton vytvářející vápenaté schránky, který patří ke kmeni *Prymnesiophyceae*) se zase obklopují propracovaným vápenatým mikroútvarem (menším než 20 μm) a dírkonošci (*Foraminifera*, jednobuněční mořští prvoci náležející do stejnojmenného kmene) vytvářejí pórovité mikroschránky (ulity). Jednobuněční *Coccolithophora* se hojně vyskytují v eufotických zónách téměř všech mořských prostředí severní polokoule až po 50° j. z. š. v oblasti Jižního ledového oceánu (O'Brien *et al.*, 2012). Také vytvářejí ohromné oceánské skvrny, které přetr-

vávají celé týdny, pokrývají běžně rozlohu 10^5 km^2 povrchu oceánu a jsou viditelné i na satelitních snímcích.

Tito bičíkovci se pokrývají kokolity vytvářenými uvnitř buňky a vylučovanými na povrch, aby vytvořili jakousi ochrannou zbroj. Mnoho kokolitů oddělených od buněk se rovněž vznáší volně ve vodě. V zákalu vznikajícím u pobřeží přemnožením těchto bičíkovců se poměr kokolitů vůči buňkám bičíkovců pohybuje od 200 do 400, ale na otevřeném moři je tento poměr mnohem nižší, pohybuje se mezi 20 a 40. *Syracosphaera*, *Umbellosphaera* a *Gephyrocapsa* jsou běžnými rody, největším biosférickým producentem vápence je však *Emiliania huxleyi* (Stanley *et al.*, 2005; Boeckel a Baumann, 2008). Tento druh je neobvyklý i tím, že vytváří poměrně velké kokolity za krátkou dobu, zbavuje se přibližně poloviny z nich a na rozdíl od mnoha jiných druhů planktonu je poměrně novým druhem na scéně, protože pochází z doby před pouhými 270 000 lety.

Hranice eufotické zóny se mohou nacházet jen několik metrů nebo i 200 m pod hladinou a hustota bičíkovců může být pouhých pár tisíců buněk na litr, ovšem v bílých skvrnách zákalu překračuje hodnotu 100 000/l. Rychlost produkce vápence za den se pohybuje od méně než 10 pg až po 80 pg vápence na jednu buňku denně a největší skvrny zákalu tvořeného bičíkovci mohou pokrývat plochu 10^5 km^2 po dobu týdnů, čili celková roční rozloha se vyšplhá až na 1,5 milionu km^2 (Lampert *et al.*, 2002; Boeckel a Baumann, 2008). V souvislosti s touto přirozenou variabilitou je nemožné poskytnout jakýkoliv spolehlivý odhad celosvětové roční produkce vápence v oceánu zprostředkované těmito bičíkovci – nicméně konzervativní odhad by mohl nabídnout alespoň reálnou řádovou hodnotu.

Za předpokladu, že by *Coccolithophora* pokračovaly v nepřetržité produkci na 60 % světového oceánu do hloubky pouhých 50 m při průměrné koncentraci pouhých 25 000 buněk na litr a rychlosti produkce pouhých 10 pg vápence na buňku a den, bylo by výsledkem přibližně 900 Mt vápníku ročně v globálním měřítku. Mnohem volněji pojaté odhady (50 000 buněk/l, 20 pg/buňku a den) by nás přivedly k produkci zhruba 3,7 Gt vápence. Ve srovnání s tímto procesem probíhajícím ve všech oceánech jen nepatrně přispívají opakovaně se vyskytující bílé skvrny zákalu, ať už jsou jakkoliv působivé. Skvrna o rozloze $250 000 \text{ km}^2$ v severovýchodním

Atlantiku v červnu 1991 vykazovala rychlost produkce vápence téměř $1,5 \text{ mg C/m}^3/\text{h}$ a za méně než měsíc se tak izolovala přibližně 1 Mt vápníku ve vápenci (Fernández *et al.*, 1993). To by znamenalo 8 Mt vápence a pokud by se podobná rychlost použila na rozsah $1,5$ milionu km^2 zákalu vytvářeného každoročně těmito *Coccolithophora* ve světovém oceánu, celková produkce by se pohybovala pouze okolo 50 Mt vápence.

Stejného rozsahu lze dosáhnout za předpokladu vysoce produktivní eufotické zóny až do hloubky 50 m, 150 000 buněk/l, denní rychlosti produkce vápence 70 pg/buňku a průměrném přetrvání bílé skvrny v délce 30 dní – z této kombinace vychází přibližně 25 Mt roční produkce vápence pocházející z bílých skvrn tvořených bičíkovci *Coccolithophora*. Nejlepším konzervativním odhadem je tedy produkce vápence prostřednictvím bičíkovců v rozsahu několika gigatun za rok, což je z geologického hlediska poměrně nízký údaj, protože vysoký poměr Mg/Ca a nízká absolutní koncentrace vápníku v současném světovém oceánu omezují produkci většiny dosud existujících druhů (Stanley *et al.*, 2005). Nejzářnějším příkladem vysoké produktivity bičíkovců v minulosti jsou obrovské zásoby křídý (včetně bílých Doverských útesů) z období křídý a třetihor.

Křemík je dalším prvkem, který mořské mikroorganismy masivně asimilují, ze všech nejvíce pak rozsivky, bičíkovci rodu *Silicoflagellida* a mřížovci. Využívají kyselinu ortokřemičitou ($\text{Si}(\text{OH})_4$) a vytvářejí své propracované opálové útvary (z amorfního hydratovaného biogenního oxidu křemičitého $\text{SiO}_2 \cdot 0,4\text{H}_2\text{O}$). Tréguer *et al.* (1995) odhadli rychlost procesu na cca 7 Gt křemíku za rok. To znamená, že celkový objem vápencového a křemičitého materiálu získaného ročně díky mořskému fytoplanktonu je v řádu 10 Gt/rok, což je více než celkový úhrn těžby všech kovových rud a přibližně stejné množství, jaké vykazuje roční produkce všech fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn).

Ve srovnání s mořskými producenty vápníku a křemíku je agregátní spotřeba těchto prvků jinými organismy o řády nižší, nicméně jejich podoby jsou často jednak značně důmyslné, a jednak poměrně pěkné. To lze tvrdit o lasturách mnoha měkkýšů: některé z nich jsou poměrně jednoduché, ale jiné vykazují pozoruhodné geometrické vlastnosti (Abbott a Dance, 2000). Také plazi a ptáci vylučují při tvorbě svých vajec uhličitany, stejně jako šneci při vzniku ulit. Co je však zvláštní, jeden

z předních badatelů v oblasti útvarů vytvořených zvířaty záměrně takovéto činnosti ve svém bádání opomíjí: Hansell (2007) sice uznává, že Velký bariérový útes je možná (jak se obecně tvrdí) největším útvarem vytvořeným živými organismy, ale ve svých knihách se zaměřuje na takové procesy tvorby, jejichž základní charakteristikou je chování, tj. vlastnost, která chybí u korálových polypů nebo bičíkovců, kteří pouze vylučují svůj skeleton.

2.2 Materiály v pravěku

Na evoluci homininů (kteří se vyvinuli z šimpanzů před více než 5 miliony let a jejichž potomky jsou i současní lidé) by se mělo nahlížet přesněji jako na dynamický souběh evolucí různých charakteristik, které z nás vytvořily lidi: vzpřímená chůze, vytrvalost v běhu, spolupráce při lovu, masožravost, symbolický jazyk a vyrábění nástrojů, používání přírodních materiálů jako módních předmětů, které jednoduše, ale praktickým způsobem prodlužují a znásobují lidské fyzické kapacity. Proto archeologie při zkoumání evoluce homininů sleduje vývoj výroby nástrojů téměř stejně bedlivě jako změny v kostře, stravě a socializaci.

Nejstarší kamenné nástroje nejstaršího paleolitu objevené ve Východní Africe (rokle Olduvai v Tanzánii, Afarský trojúhelník, Koobi Fora na východním břehu jezera Turkana) se datují do doby přibližně před 2,6 miliony let, ale nelze vyloučit ani dřívější původ (Davidson a McGraw, 2005). Po miliony let byla kamenná masa využívána k výrobě paleolitických nástrojů (toto období skončilo cca před 10 000 lety) a artefakty z následující neolitické éry pak zůstaly v menšině, jelikož populace homininů čítala jen desítky či stovky tisíc (před 500 000 lety jich určitě nebylo více než 125 000). Počet moderních lidí na celém světě (přičemž *Homo sapiens* lze ve zkamenělinách identifikovat zhruba od doby před 190 000 lety) se v důsledku erupce supervulkánu Toba před 74 000 let snížil na možná méně než 10 000 (Harpending *et al.*, 1998; Ambrose, 1998), a pak vzrostl na pouhých pár milionů lidí v době prvních usedlých zemědělských společností před téměř 10 000 lety.

S ohledem na tuto nízkou četnost populace je zřejmé, že používání kamenů na nástroje nebylo otázkou množství a hromadného využití, jako spíše konkrétního rukodělného zpracování různých požadovaných tvarů a hran a kvality materiálu.

Obsidián (sopečné sklo, které vzniklo rychlým ochlazením magmatu) a pazourek (kryptokrystalická forma křemene) byly nejlepšími materiály pro výrobu ostrých řezacích hran a šídel osekáváním, nástroje na mletí a drcení se vyráběly broušením z bazaltu, ryolitu a zeleného kamene*. Možná nejvíce pozoruhodnou inovací ve výrobě kamenných nástrojů byla úprava kamene zahřátím: existuje jasný důkaz, že před 164 000 let začal náš druh používat oheň jako technický nástroj pro tepelné ošetření kamenů, aby se zlepšila jejich lámavost (Brown *et al.*, 2009).

Jak dosvědčují mnohé nálezy jak ze Starého, tak i z Nového světa, díky kombinaci odborného výběru kamenů a vhodných metod zpracování (tepelné ošetření a řemeslné opracování) vznikaly geniálně navržené tesařské sekery, sekery, kladiva, šídla, šípky, hroty a nože, které byly esteticky krásné, obdivuhodně ergonomické a praktické. Oproti tomu se dřevěné nástroje zachovaly jen v málo případech, především pokud byly pohřbeny do vrstev bez přístupu vzduchu. Není pochyb, že by hominini nepoužívali dřevěné hole na vyhrabávání kořenu a dřevěné palice k usmrcování malých zvířat, ale pečlivě zhotovované zbraně se objevily relativně pozdě. Ačkoliv někteří velcí býložravci mohli být usmrceni bez jakýchkoliv nástrojů – pečlivě naplánovaným nahnáním stáda bizonů na skály, aby jim srazili vaz, jehož nejlepším příkladem je skalní převis využívaný k lovu bizonů (Head-Smashed-In Buffalo Jump) nedaleko Fort McLeod v Albertě (Frison, 1987) – lov megafauny (od mamutů po oryxy) si obecně žádal zbraně s delším dosahem.

Nejstarší a kupodivu velmi dobře zachovalé házecí oštěpy byly nalezeny v Německu v r. 1996: šest 2,25 m dlouhých smrkových oštěpů datovaných do doby před 380 000 až 400 000 let (Thieme, 1997), což je téměř 200 000 let před výskytem našeho druhu (Trinkhaus, 2005). A nové nálezy z naleziště Kathy Pan 1 v Jižní Africe (typy zlomů, úpravy rukojeti, známky poškození ostří) naznačují, že kamenné hroty mohly být k vrcholku oštěpu připevňovány již před 500 000 lety. Díky tomu se původní odhad výskytu prvních vícesložkových nástrojů s rukojetí posouvá přibližně o 200 000 let hlouběji do minulosti (Wilkins *et al.*, 2012).

* pozn.překl. v anglosaské literatuře se v archeologickém smyslu pojmem „greenstone“ označuje celá řada hornin, do českých děl se pak překládají jako „zelenokámen“ nebo zůstávají „greenstone“.

Jiné typy nástrojů k obstarávání jídla pocházejí z mnohem mladšího období. Kdy se objevily první luky (z nejvhodnějších druhů dřeva, především z tisu, jasanu amerického, akátu a pustorylu) a šípy (pouze zešpičatělé dřevo nebo s kamennými hroty), je těžké odhadnout, ovšem v pozdním paleolitu už byly poměrně běžné. Vrhací zbraně vyrobené ze dřeva nebo mamutích klů se používaly v Eurasii dávno před objevem australského bumerangu před 10 000 lety. Nelze odhadnout, kdy se začaly používat rybářské sítě, protože se bezpochyby pletly z pružných stonků či větví rostlin, které podléhaly zkáze, ovšem nejstarší známá síť z tenkých vrbových větviček byla nalezena ve finské Karélii a pochází z doby před 10 000 lety (Miettinen *et al.*, 2008).

Lovci a sběrači, kteří si nebudovali stálá obydlí, nezanechali žádné stopy svých dočasných úkrytů vybudovaných z větví, trávy, rákosu nebo palmových listů. Nejstarší zachované komponenty úkrytů jsou přirozeně kameny uspořádané k ochranným účelům (zdi, střechy) a kosti a kly mamutů tvořící součást zdí, výztuží a skryší. Na rozdíl od nedochovaných obydlí lovců a sběračů (kromě jeskyní, z nichž některé vyzdobili neolitičtí lovci pozoruhodnými malbami zvířat), našli archeologové tisíce základů patřících domům, přístřeškům a skladištím mnoha předzemědělských a raně zemědělských společností. Úplná rekonstrukce většiny z těchto neolitických struktur je většinou nemožná a o skutečném využití dřeva (kmínky malých stromů, větví), rákosí, slámy nebo hlíny v jejich zdech a stropěch lze jen spekulovat. Neolitičtí lovci a sběrači také stavěli první dřevěné lodě: nejstarší vykopané příklady jednoduchého designu (kánoe vydlabané z jediného kmene) jsou téměř 10 000 let staré.

Ačkoliv pravěké společnosti nepotřebovaly vůbec kovy, některé z nich uměly změnit vlastnosti nerostů a vyráběly pálenou keramiku. Vykopávky na některých z nejstarších na stálo obydlených nalezišť naznačují, že používali nehasené vápno (pálené vápno), materiál, jehož výroba představovala způsob zpracování téměř stejně sofistikovaný jako tavení rud. Aby bylo možné extrahovat pálené vápno (CaO) z vápence (CaCO_3), musel se kámen nejprve ručně rozlámat na poměrně malé kousky stejné velikosti (tato směs však nesměla obsahovat prach ani drobné kousky, aby byla zachována poréznost materiálu). Zpočátku se výpal dělal v jámách naplněných vrstvami palivového dříví a nalámaného vápence, později se stavěly malé kamenné

stavby (vypalovací pece), které měly za úkol soustředit proces na jedno místo a udržet teplo potřebné pro uskutečnění kalcinace.

Po delším vypalování přišla na řadu nejnebezpečnější část operace, a sice odstranění vysoce žíravého nehašeného vápna, jež ve styku s vodou (tj. s vlhkou kůží, očima či plícemi) způsobuje závažné podráždění či popálení a jehož požití či vdechnutí způsobuje bolest a zvracení. Řízeným přidáváním vody k nehašenému vápnu vzniká hydratované (hašené) vápno (Ca(OH)_2 , hydroxid vápenatý), základní součást vápeného mléka, malty a sádry. Výroba vápna je jednoznačně komplexním procesem, který vyžaduje značnou míru plánování (nasbírat dostatek dřeva na oheň, připravit vhodnou jámu nebo jednoduchou vypalovací pec) a řízení (teplota uvnitř vypalovací pece musí dosáhnout alespoň 825 °C a musí být tak udržována po delší dobu) – výrobky z vápna datované z doby okolo 9600 př. n. l. byly vykopány v Göbekli Tepe (Courland, 2011). Vypalování vápence v peci bylo tedy prvním úspěšným průmyslovým procesem závislejícím na chemické reakci – a takovým, jehož základy zůstaly téměř identické až do 19. století.

Mnohé z těchto lovecko-sběračských společností dřeva a kamene také dokázaly vypalovat tvarovanou hlínu a vyrábět tak keramiku, což byl první postup, pomocí něhož lidé přetvářeli běžně dostupné minerály a užitečné či okrasné (Cooper, 2000). Vypalováním se odstraní voda z vytvarované hlíny, upevní se její tvar a zpevní její konečná podoba. Pro vypálení malých předmětů z hlíny stačí poměrně nízká teplota od 500 do 600 °C a nejstarším kusem takové keramiky je proslulá Věstonická Venuše nalezená v Dolních Věstonicích na Moravě – 11,1 cm vysoká soška nahé ženy vytvořená paleolitickým člověkem před cca 25 000 až 29 500 lety (Vandiver *et al.*, 1989). Pro výrobu větších užitkových kusů hrnčířského zboží je třeba teploty alespoň 1000 °C, a ačkoliv bylo možné této teploty dosáhnout (na omezenou dobu) v zakrytých ohňových jámách nebo hromadách, v kamenných vypalovacích pecích to šlo mnohem lépe. Nejstarší kusy keramiky bezpochyby pocházely z ohňových jam, ale jejich datace se spolu s novými objevy posunuje čím dál více do minulosti, zvláště pak v Asii.

Podle nejnovějších vykopávek z jeskyně Sien-žen-tung (v severní provincii Ťiang-si) je možné, že lovci svrchního paleolitu v Číně byli schopni vypálit jednodu-

ché malé nádoby již před 19 000 až 20 000 lety (Wu *et al.*, 2012). Japonská keramika období Džómon (což znamená provazový vzor, první misky různého tvaru s kulatým dnem až 50 cm vysoké a větší nádoby na uskladnění jídla a na vaření s rovným dnem) je až 12 000 let staré (Habu, 2004). Po 6000 př. n. l. se keramické předměty – nádoby, šálky, vázy, kalichy, talíře, figurky, mnohé z nich velmi jemně ozdobené, jiné vypálené při vyšších teplotách, aby se dosáhlo větší trvanlivosti kameniny – staly běžnými v celé Evropě (jak dosvědčují mnohé nálezy tzv. *Bandkeramik* z doby po 5500 př. n. l. na nalezištích v Německu, v českých zemích a Rakousku), na Středním Východě (zvláště odlišná pak byla egyptská keramika, ať již co do používaných surovin či co do finálních tvarů) a ve Východní Asii. V této době se také začal běžně používat hrnčířský kruh (který umožnil, aby šikovné ruce vytvořily dokonalé tvary).

Předzemědělské a primitivní zemědělské společnosti také zanechaly téměř nezničitelné pozůstatky v podobě megalitických staveb, přičemž prvními z nich byly pozoruhodné kruhy z kamenů s vyřezávaným zvířecím reliéfem v Göbekli Tepe. Západní Evropa (od Iberského poloostrova přes Francii a Británii až po severní Německo) se vyznačuje obzvláště vysokou hustotou megalitických monumentů. Nacházejí se zde menhiry (samostatně stojící kameny, většina ve svislé, některé i v horizontální poloze), skupiny stojící kamenů, jako jsou např. paralelní řady kamenů v Carnacu v jižní Bretani nebo Stonehenge a blízké Avenbury (výstavba začala v pozdním neolitu, přibližně 2800 př. n. l.), a nebo nejčastější kategorie (přibližně 5000) pohřebních komor s krakorcovou střechou nebo klenbou, často s velkými závěrnými klenáky (Daniel, 1980).

Navzdory stoletím spekulací a desetiletím mezioborových vědeckých studií stále nemůžeme nabídnout konečné vysvětlení, co se týče specifické metody lámání těchto masivních kamenů, jejich přesunu často drsným terénem a jejich vztyčování v předem určené pozici, někdy v tak pozoruhodně přesném souladu s periodicky se opakujícím uskupením nebeských těles. Jakým způsobem byly přemísťovány, stále není jasné, neboť šlo o značně velké prvky a značné vzdálenosti. Vnitřní kruh Stonehenge tvoří 80 čtyřtunových modrých kamenů (doleritů), které bylo třeba dovézt z Prescelly Mountains v jihozápadním Walesu přibližně 380 km od Salisburské pláně (a proto musely být součástí transportu jistě i příbřežní plavidla), a ačkoliv vnější

okruh pochází z Marlborough Downs pouhých 32 km severně od místa konstrukce, přesunout 50tunové kameny představovalo ještě větší logistickou výzvu (Thorpe a Williams-Thorpe, 1991).

Konečně, není pochyb, že první oděvní výrobky pocházejí z pravěku, ovšem protože nelze přírodní materiály používané k výrobě oděvů příliš dobře uchovávat, je nemožné nabídnout spolehlivou chronologii (Ginsburg, 1991). Jehly na šití vyrobené z kostí, které byly potřeba k ušití teplého oblečení, aby člověk přežil teploty doby ledové, se začaly běžně používat během solutrénu, fáze mladého paleolitu v Evropě (před 17 000–21 000 lety). První úmyslně nastříhané, zpracované a vytvarované pokrývky těla vyrobené z rostlinného materiálu (listů, kůry) a ze zvířecích kožešin se již dávno rozpadly, takže nelze určit dobu jejich původu. Vydělávání kůží, které umožňovalo udržet kožešiny pružnými i v nízkých teplotách, je zcela určitě původem z pravěku, ale určit konkrétní procesy (používání rostlinného materiálu nebo minerálů) je možné až z doby mezopotamského či egyptského starověku. Kvalitu a funkcionalitu pravěkých oděvů, které vyráběli neolitští lovci a sběrači, nejlépe dokazují *annuraangit*, inuitské oděvy z kůže a kožešiny, které poskytovaly výbornou ochranu i v arktických oblastech (Oakes, 2005).

Lněná plátna se vyráběla dokonce dříve, než byla rostlina domestikována na Středním Východě před více než 10 000 lety, a velikost semen naznačuje, že okolo 3000 př. n. l. se v Evropě severně od Alp pěstovaly již různé formy lnu (na olej i na vlákna) (Zeist a Bakker-Heeres, 1975; Karg, 2011). Pěstování bavlny začalo v Asii před cca 7000 lety, mnohem později pak v Mezopotámii, a fylogenetická analýza ukazuje, že africko-asijské druhy a druhy z Nového Světa pocházejí nezávisle na sobě z divoké formy a že se v průběhu domestikace morfologicky změnily (Wendel *et al.*, 1999). Primitivní stavy sloužící k výrobě hrubých lněných látek se objevily přibližně před 6000 lety, hrubé vlněné oblečení bylo spřádáno a splétáno před více než 10 000 let. Byly domestikovány ovce na vlnu, a to cca před 8000 lety, ovšem trvalo to minimálně další 2000 let, než se objevily první látky utkané z vlny (Broudy, 2000).

2.3 Materiály ve starověku a ve středověku

Materiálový svět nejstarších usedlých společností – jejichž zemědělská produktivita a populační růst umožnily vznik a rozkvět měst – byl určován jejich bezprostředním prostředím. Proto můžeme najít obytné čtvrti vyhloubené v siltových nánosích (Šen-si v Číně) nebo ve vápenci (v centrální Anatolii), lehká dřevěná obydlí se stěnami z bambusu a hlíny (v Japonsku), stavby z vepřovic (v subsaharské Africe), masivní domy z trámů (ve Skandinávii a Rusku) nebo robustně stavěné domy z pálených cihel či kamenů spojených maltou (po celé kontinentální Evropě okolo pobřeží Atlantského oceánu).

Prostředí také hrálo jinou, strategickou, roli. Jak zdůraznil Adshead (1997), hlavním důvodem, proč se v Číně (a obecněji ve Východní Asii) stavěla obydlí z nepříliš trvanlivého dřeva na rozdíl od dlouhou dobu přetrvávajících staveb z kamene a cihel v Evropě, byla častá ničivá zemětřesení, a dodal bych k tomu také každoroční tajfuny a velké záplavy. Číňané také dávali přednost nízkému počátečnímu kapitálovému výdaji a vysokým nákladům na udržování, což byl pravý opak evropského přístupu. Svou roli hrála i historická realita – středověká a renesanční Evropa obdivovala a napodobovala příklady římských kamenných staveb.

Některé z raných usedlých společností brzy zvládly stavbu monumentálních konstrukcí, jež vyžadovaly nejen důmyslnou těžbu a přepravu kameniva na stavebníště, ale také, na rozdíl od pravěkých megalitů, pečlivé (a často detailní a extrémně přesné) opracování a komplikované sestavení masivních prvků, nebo výrobu a sestavení nesmírného množství cihel. Některé starověké společnosti také vyvinuly pozoruhodně důmyslnou infrastrukturu, která měla sloužit potřebám jejich měst. Snad nejlepším příkladem těchto vymožeností byly římské akvadukty. První usedlé společnosti Středního Východu, Středomoří a Východní Asie byly také prvními komplexními civilizacemi, které používaly tavené kovy, zpočátku jen v omezeném rozsahu měď nebo cín (jako ozdoby nebo v omezeném rozsahu pro vojenské účely), a později si také dokázaly poradit s výrobou zinku, olova, železa, rtuti, stříbra a zlata.

Železo se na Středním Východě, v Indii a v Evropě stalo hlavním používaným kovem až přibližně po r. 1200 př. n. l. a jeho výroba byla v dostatečně rozsáhlá, takže bylo možné uspokojit poptávku po poměrně levných hřebech pro domy a stavbu lodí,

podkovách pro koně a různých ručních nástrojích a dílech ke strojům, a zbraních různých druhů. Kvůli těmto metalurgickým pokrokům rozdělil Christian Thomsen (1836) období evoluce materiálů na dobu kamennou, bronzovou a železnou, ovšem toto pořadí nebylo všude stejné, protože některé společnosti (snad nejlepším příkladem je Egypt před r. 2000 př. n. l.) měly i měděné období a od kamenných předmětů se přesunuly přímo k železným. V každém případě, co se týče celkových materiálových toků, zůstávaly všechny předprůmyslové společnosti v době dřeva: v zalesněných oblastech nebyl žádný jiný materiál tak všudypřítomný jako stavební dříví a dřevo na výrobu nástrojů, užitkových předmětů, doplňků a strojů.

První dřevěná fytohmota používaná při stavbách se skládala z malých kmínků, větví stromů a keřů a teprve až se začaly používat kamenné tesařské sekery (a později sekery z kovu) a lidé si osvojili tesařské řemeslo, bylo možné postavit první masivní sruby z tvarovaných a spojovaných trámů. O něco později přišly kovové pily, které umožnily výrobu dlouhých prken a dalších precizně nařezaných částí. Většina předprůmyslových dřevěných domů byla postavena nekvalitně a neměla dlouhou životnost, ale důkladně postavené dřevěné stavby pak byly překvapivě trvanlivé, dokonce i v monzunových oblastech, kde musely každoročně odolat silným deštům: dřevo na pagodu Hōryūji v japonském městě Nara, dosud existující nejstarší dřevěnou stavbu světa, bylo pokáceno před 1400 lety.

Je s podivem, že tyto japonské (a korejské a čínské) stavby nepoužívaly žádné spojovací prvky, jejich rámy, trámy a střechy držely dohromady díky precizním čepovým spojům, které nejenže umožňovaly, aby se dřevo rozpínalo a smršťovalo podle změny vlhkosti, ale také aby odolalo častému zemětřesení. Navíc vysoké pagody v podstatě velmi dobře odolávaly zemětřesení, protože centrální pilíř *shinbashira* nepodpírá celou konstrukci, ale slouží jako mohutné stacionární kyvadlo (Atsushi, 1995). Jeho úloha je podobná ohromným závažím v moderních mrakodrapech vyrobeným z betonu nebo oceli a zavěšeným v horních patrech těchto vysokých budov.

Dřevo bylo rovněž jediným materiálem, který se ve starověku a středověku používal na stavbu trupu a stěžňů zaoceánských lodí. Malé říční čluny se stavěly z jednoho kmene stromu, ale od Homéra víme, že Odysseus pokácel na stavbu své lodi 20 stromů (*Odysseia* 5:23), což by odpovídalo hmotnosti asi 10–12 t. Egyptské čluny

pro přepravu kamenných obelisků byly mnohem těžší, ale lodě, které poprvé překročily Atlantik, byly pozoruhodně lehké: na výrobu Vikingské lodě (podle zachovalé lodi Gokstad postavené okolo r. 890 n. l.) se spotřebovalo dřevo ze 74 dubů (včetně 16 párů vesel). Typické středomořské plavidlo bylo také malé a jeho velikost se sotva zvýšila v průběhu tisíciletí od zániku říše římské po první mezikontinentální cesty konce 15. století.

Pro užitkové stavby, které měly sloužit dlouho (akvadukty, silnice), a stavby, které sloužily k pohřebním (pyramidy, hrobky) nebo náboženským a obřadním účelům (chrámy, brány, paláce, věže, obelisky, sochy) se díky své trvanlivosti nejlépe hodil kámen. Mnohé kamenné stavby udivují svou mohutností, ale unikátní jsou mezi nimi egyptské pyramidy v Gíze: Cheopsova pyramida nejenže je největší kamennou stavbou, která kdy byla postavena (195 m vysoká, spotřebovala 2,5 milionu kamenů, jejichž průměrná hmotnost byla 2,5 t), ale proslula i přesností, s níž bylo toto množství více než 6 Mt kamenů položeno. Ve srovnání s ní nejsou pyramidy mezoamerických kultur (v Teotihuacánu a Cholule) tak impozantní, nejen proto, že pyramida boha Slunce v Teotihuacánu zakončená plošinou se zvedá do výše něco málo přes 70 m (včetně chrámu), ale i protože její základ tvoří hromada hlíny, drtě a vepřovicových cihel, a pouze zvnějšku byly položeny kameny zpevněné zapencovou maltou.

Některé kamenné stavby jsou typické svou všudypřítomností, jiné zato komplexností a lehkostí, která popírala tíhu materiálu (středověké katedrály) a některé se vyznačují téměř neuvěřitelnou těsností a přesností umístění kamenů. Za doby říše římské směřovaly největší masy kamenů na stavby akvaduktů (včetně nadzemních mostů, shybek a distribuční sítě v rámci měst) a na rozsáhlý systém silnic (*cursus publicus*), ovšem většina z jejich monumentálních staveb (s výjimkou triumfálních oblouků) byla postavena z cihel opláštěných mramorem. Jižní a jihovýchodní Asii (počítaje v to Angkor Wat, nejrozsáhlejší hinduistický chrám na světě nacházející se v Kambodži, a Borobodur, nejrozsáhlejší buddhistický monument na světě stojící na ostrově Jáva), ale i střední a jižní Americe (Mayské, Aztécké a Incké říše, včetně Pumapunku stojícího v blízkosti naleziště Tiahuanaco v Bolívii) dominují složité navržené kamenné monumenty. A nejmasivnější kamenná stavba Afriky, 240 m

dlouhá oválná ohrada Velkého Zimbabwe (Dzimbabwe), jejíž výstavba započala po r. 1100 n. l., vyžadovala odhadem 1 milion kamenných bloků (Ndoro, 1997).

Středověká Evropa přivedla kamennou architekturu k bezprecedentním výškám (doslova i obrazně) díky svým odvážným a promyšleným návrhům velkých katedrál s obloukovou klenbou, opěrných pilířových oblouků a vysokých špiček kostelních věží (Fitchen, 1961; Schultz, 2002). Prak (2011) ukázal, že toho bylo možné dosáhnout díky překvapivě jednoduchým principům modulového designu (děděného z osoby na osobu jednotlivými architekty/staviteli) spolu s experimentováním přímo na místě. Hlavním a nejzřetelnějším společným znakem kamenných staveb bylo promyšlené lámání kamene (vezmeme-li v potaz, že během raných období, jako např. ve starověkém Egyptě, měli kameníci k dispozici pouze měděné majzlíky a do-leritové paličky, je tento úkol o to pozoruhodnější), často vysoce přesné opracování, nezřídka nutnost dlouhé přepravy po pevnině i vodě na místo určení a důmyslné způsoby umísťování masivních prvků. Ještě dnes na nás činí dojem vynalézavost a zručnost uplatňovaná při lámání, přepravě i tvarování těchto masivních kamenů a při plánování a organizaci jejich konečného zasazení, často v obdivuhodně malých odchylkách.

A to platí především pro monolity (ve formě soch, stél či obelisků: Řím osm z nich dopravil ze starověkého Egypta) pocházejících od tradičních civilizací. Stále můžeme pouze spekulovat o oněch mnoha uměleckých technikách a způsobech řízení staveb, díky nimž byly postaveny pyramidy na planině v Gíze nebo sestaveny masivní incké zdi z polygonálních kamenů v Sacsayhuamánu a Ollantaytambu s neuvěřitelnou neprodyšností. Ani přesně nevíme, jak starověcí Egypťané zorganizovali přepravu 1000 tunových kamenných soch po Nilu přes 270 km od Aswanu do Théb. Není překvapením, že konkrétní způsoby stavění mnoha z těchto staveb jsou stále nejasné: jedinou jistotou je, že jejich stavba vyžadovala pečlivé plánování a dokonalé řízení dodávek materiálu i stavby samotné, zvláště pak u těch staveb, které byly dokončeny za, jak se zdá, neuvěřitelně krátkou dobu.

Největší pyramida v Egyptě se stavěla jen 20 let (2703–2683 př. n. l.). Parthenon, jednoduchá stavba z pilířů a oken, která se vyznačuje snad nejlepšími proporcemi, které kdy stavba měla, byl hotov za 15 let (447–432 př. n. l.). A Hagia Sofia v Kon-

stantinopoli, poměrně lehká stavba proslavená svými enormními klenbami, se nestavěla ani celých pět let (527–532). Na rozdíl od toho mohla uplynout i století mezi položením základního kamene a vysvěcením mnoha evropských katedrál: stavba Notre Dame trvala téměř dvě století, od r. 1163–1345, a dominanta Pražského hradu, katedrála Sv. Víta, započala v r. 1344 a byla dokončena až v r. 1929.

Evidentně nelze ani určit hmotnost, ani objem stavebního kamení použitého ročně starověkými a středověkými společnostmi, ale je možné provést výpočty s odhadem požadavků na některé velké projekty. Spočítat objem materiálu použitého Římany při stavbě silnic je možné, pokud budeme uvažovat průměrnou šířku silnice 4 m (římské silnice na území Itálie neboli *via*, které se zachovaly, mají šířku mezi 2,4 a 7,5 m) a hloubku minimálně 1 m (jednotlivé vrstvy obsahovaly kameny nad šterkem, oblázky, hlínou a pískem): pokud neuvažujeme následné opravy, pak by na samotné zbudování 85 000 km hlavních silnic bylo potřeba 425 Mm^3 agregátního materiálu (písku a šterku) a vytěženého kamene.

V naplaveninových oblastech byla hlína využívána na výrobu cihel jako převažující materiál na stavbu: Mezopotamská království stavěla své zikkuraty, paláce, a zdi z cihel (z vepřovic i kvalitnějších pálených cihel). Také císařský Řím nutně potřeboval v době stavebního rozmachu cihly, protože byly poměrně levné, daly se vyrobit rychle (a v místních podmínkách) a sloužily i k výrobě mohutných staveb, jež pak byly zvenčí pokryty mramorem. První cihly se vyráběly z jílové hlíny (pouhá směs hlíny a vody s příměsí písku, nasekaných stébel nebo chlévské mrvy). Tato směs se tvarovala v dřevěných formách a pak se sušila na slunci.

Rané kultury Mezopotámie (Sumerové, Babyloňané a Asyřané) vyráběly ohromná množství těchto cihel (v Babylónii měly klasickou formu kvádrů se čtvercovou základnou, $40 \times 40 \times 10 \text{ cm}$), které se pak používaly na stavbě domů, paláců a věží. Kvůli špatné kvalitě těchto cihel se dokonce i ty nejmasivnější stavby změnilly v hromady hlíny, zůstalo jen pár výjimek – především Čogha Zanbil, starobylé město Elamské kultury, které se částečně zachovalo na území dnešního Íránu (v Chúzistánu). Zachovala se tři z pěti podlaží (Porada, 1965). Většina mezopotamských stupňovitých chrámových věží s terasou na vrcholu (zikkuraty) postavených po r. 2200 př. n. l. nejsou nic jiného než kopečky na vyprahlé pláni. Cihly vypálené ve vypalo-

vacích pecích, ve kterých se topilo dřevem či dřevěným uhlím, se začaly používat ve starověké Mezopotámii, běžně se používaly též ve starověku v Evropě i Asii a přetrvaly jako nejdůležitější každodenní stavební materiál v mnoha kulturách Starého světa až do příchodu betonu a stavební oceli.

Štíhlé obdélníkové římské cihly ($45 \times 30 \times 3,75$ cm) se pokrývaly mramorem u všech význačnějších budov, ale i když se ochranná vrstva odloupala, přežívaly poměrně dobře v suchém středomořském klimatu, kde jejich špatná tepelná vodivost pomáhala udržovat v létě stavby chladnými. Římané také používali cihly na stavbu pozoruhodně rozsáhlých klenutých stropů. Existovalo mnoho různých metod, jak klást cihly a kombinovat je s kameny a dřevem (běžnými římskými typy byly *opus reticulatum*, *vittatum*, *mixtum* a *testaceum*), z nichž všechny lze najít v pozůstatcích staveb bez jejich mramorové vrstvy.

Stavby postavené z pálených cihel se ukázaly jako mnohem trvanlivější (samozřejmě také vyžadovaly opravy) dokonce i v asijském tropickém podnebí: mnohé *stúpy* (což v sanskrtu doslova znamená hromada či kupa), obrovské, pahorkům podobné stavby, budované pro buddhistické relikvie, přetrvaly více než tisíciletí (Longhurst, 1979). Stúpa Mahábódhi (chrám v indické Bodhgaji) byl před 2 500 lety postaven na místě Buddhova probuzení, Velká stúpa pokrytá pískovcem Sánčí nedaleko Bhópálu (36 m v průměru základny, 15 m vysoká), stúpa Phra Pathom Chedi v Thajsku a 120 m vysoká Jetavanaramaja v Anurádhapuře na Srí Lance postavená před přibližně 1 700 lety patří mezi nejlepší příklady těchto obrovských staveb z pálených cihel (Bandaranayake, 1974; Pant, 1976). Počet cihel (vyráběných z 60 % z jemného písku a z 35 % z hlíny) potřebný na stavbu Jetavanaramaji se odhaduje mezi 93 a 200 miliony (Leach, 1959).

Pálená keramika a kamenina (druhý jmenovaný materiál má mnohem nižší schopnost absorpce vody po vypálení) se také používaly na střechy, podlahy a dekorativní dlaždice. Keramické střešní tašky se ve Středozeří používaly běžně už od starověku, zatímco první ukázky glazovaných cihel a dekorativních dlaždic je možné najít na ještě starších mezopotamských budovách. Podlaha a dlaždice na zeď se vyráběly v široké nabídce povrchů (neglazované, glazované, mozaikové, ručně malované) a obzvláště komplikované vzory dlaždic se staly jedním z poznávacích zna-

mení středověkých muslimských stavitelů, kteří vynikali ve spojování barev a tvarů. V řadě evropských zemí, zvláště v Itálii, Španělsku a Portugalsku, se také rozvinula barvitá antická tradice zdobených dlaždic.

Hliněné amfory byly nejčastějšími nádobami sloužícími k obchodování ve Středomoří (Twede, 2002). Tyto keramické nádoby se používaly při dopravě vína, olivového oleje a také již zpracovaných potravin, jako bylo např. *garum*, římská rybí omáčka. Římané také používali sudy vyrobené specializovanými řemeslníky (bednáři) z tvrdého dřeva spojené železnými obručemi, kdy se na výrobu takového sudu typicky spotřebovalo 50–60 kg dřeva (Twede, 2005). Ve středověku ovládly tyto nádoby evropský trh s tekutinami a s nakládáními či solenými potravinami. Porcelán, materiál nejvyšší kvality vyráběný z pálené hlíny (konkrétně z kaolínu, jemné bílé kaolinitové hlíny nezbytné pro výrobu jemné keramiky), byl vynalezen v 16. století př. n. l. (v období dynastie Šang) v Číně a brzy se vyráběl také v Korei i Japonsku. Tento východoasijský monopol byl prolomen až během počátku 18. století výrobou pravého porcelánu v Evropě, nejprve v Německu a Francii a brzy poté i v Anglii (Atterbury, 1982).

Odolné stavby z cihel (a dlaždic) musely mít dobrý pojící materiál, ale první malta z hlíny a bláta byla slabá. Díky kalcinaci vápence (CaCO_3) na pálené vápno (CaO), jehož hydratací vznikne hašené vápno Ca(OH)_2 , získal člověk výborný materiál jako součást malty. Jak již bylo zmíněno, pálení vápence v pecích předchází éře nejstarších centralizovaných impérií a hašené vápno se běžně používalo již ve starověkém Egyptě. Davidovits (2002) rozpoutal polemiku tím, že prohlásil, že bloky použité na stavbu pyramid v Gíze nebyly vytěžené kusy kamene, ale směsi granulovaného vápence a alkalicky aktivovaného pojiva na bázi aluminium silikátu, které byly vyrobeny *in situ*. Ačkoliv tuto hypotézu odmítla většina egyptologů, badatelé v oblasti materiálů ji stále ještě zcela neodložili.

Římanům se připisuje vynález betonu, ale to není úplně přesné. Beton je směs cementu, kameniva (písku, oblázků) a vody, a cement je jemně mletou směsí vápna, hlíny a oxidů kovu vypálenou v peci při vysoké teplotě. V římském *opus cementitium* nebyl žádný cement, a proto nemohla být tato směs dostatečně pevná na udržení rozsáhlé klenby a klenuté stavby tím, co známe jako beton. *Opus cementitium* obsahovalo kamenivo (písek, štěrk, kameny, rozbité cihly nebo dlaždice) a vodu, ale poji-

vem zde byla vápenná malta (Adam, 1994). Kombinace hašeného vápna a sopečného písku z oblasti Puteoli v blízkosti Vesuvu (*pulvere puteolano*, taktéž známého jako pozzolana) vytvářela vynikající směs, která mohla ztvrdnout dokonce i pod vodou a mohla být tedy použita nejen na rozsáhlé a trvanlivé zdi, ale i na honosné klenby. Kazetový strop Pantheonu (118–126 n. l.) s rozpětím kupole 43,2 m ještě stále nebyl po dvě tisíciletí překonán (ačkoliv chrám Sv. Petra navržený Michelanželem a dokončený v r. 1590 se mu docela přiblížil se svými 41,75 m).

Posledním starověkým vynálezem materiálu, který se zakládal na tepelném zpracování, bylo sklo (Macfarlane a Martin, 2002). Nejstarší malé mezopotamské kousky jsou cca 5 000 let staré, umění vyrábět skleněné předměty se rozšířilo v období Nového království starověkého Egypta a není neobvyklé najít sklo na římských nalezištích – ale důležitým materiálem se stalo až ve středověku, a to jak při stavbách (jak dosvědčují složité vzorovaná mnohobarevná okna katedrál), tak i v každodenním životě (propracované skleněné číše z benátského či českého skla). Výroba skleněných bucen byla až do poloviny 19. století jediným praktickým způsobem, jak vyrobit skleněnou výplň omezené velikosti. Roztavený materiál se vyfouknul do velké bubliny a následně zploštil do deskovitého tvaru (měl uprostřed kruh a v průměru maximálně 1 m) a po ochlazení se rozřezal na skleněné tabulky. Toto sklo bylo pro zasklení běžných domů příliš drahé, takže skleněná okna se stala běžnými až během počátku novověku.

Ovšem žádný rozvoj využívání materiálu ve starověku ani běžné používání širokého spektra biologických materiálů (dřeva, kostí, kůží, textilií z rostlin i zvířat) ani obvyklé stavební materiály (kámen, hlína, písek, beton) nebo zdobné materiály (dlaždice, sklo) neměl takový vliv jako schopnost tavit kovy a tvarovat čím dál širší nabídku kovů. Těžba rud a tavení kovů vedlo k epochálním pokrokům, které začaly s používáním mědi a jejích slitin a pokračovaly tavením železných rud. Tak vznikla výroba železa, kovu převažujícího ve starověkém Řecku a Římě, dvou středozezemních civilizací, jejichž úspěchy ovlivnily v takovém rozsahu evropskou, ba celosvětovou historii.

Měď, tak měkká a kujná v čisté formě, tvořila snadno slitiny a byla prvním kovem používaným společnostmi doby kamenné už před téměř 10 000 lety, původně

bez tavení, jelikož kousky nalezeného čistého kovu byly tvarovány za studena nebo podrobovány opakovanému zahřívání a kování kladivem (chlazení). Tavení a odlévání mědi začalo před více než 6 000 lety původně v Mezopotámii (Gilgameš, velký sumerský epos – přibližně 2500 př. n. l. – se zmiňuje o měděné schránce a bronzové zástrčce a vykopávky v oblasti starověkých civilizací našly měděné nože, sekery a oštěpy), o tisíciletí později v Egyptě a cca před 3500 i v Číně. Díky relativní hojnosti sulfidových rud obsahujících měď se tento prvek stal dominantním kovem mezi lety 3000 a 1000 př. n. l.

Redukce rud (Cu má poměrně vysoký bod tání – 1083 °C) probíhala za pomoci spalování dřeva nebo dřevěného uhlí, nejprve v jámách vymazaných hlínou, později v malých hliněných vypalovacích pecích, a kov byl čištěn dalším zahříváním. Výroba mědi z vydatných zásob sulfidových rud (chalkopyritů) byla komplikovanější: rozdrčená ruda (ručně, nebo později koňskou silou či vodními kladivy) se musela nejprve pražit, aby se odstranila síra a různé další kovy (As, Fe, Pb, Sn, Zn). Vzniklý produkt se roztavil v šachtových pecích a pak znovu, aby se dosáhlo 95 – 97% čistoty kovu. Tento proces devastoval místní i oblastní zdroje dřeva a výroba mědi byla hlavní příčinou odlesnění Středozeří, obzvláště ve Španělsku a na Kypru.

Ovšem žíhaná měď byla měkkým kovem a měla nízkou pevnost v tahu. Také proto se mnohem pevnější a tvrdší bronz stal první praktickou slitinou v dějinách a proto jej Christian Thomsen vybral jako součást dnes již klasické periodizace doby kamenné, bronzové a železné (Thomsen, 1836). Bronz, slitina mědi s 5–30 % cínu (typicky 10 %), má pevnost v tahu téměř čtyřikrát vyšší než žíhaná měď a je téměř šestkrát tvrdší, čili dostatečně kvalitní na výrobu nožů, mečů, seker i medailí (a také zvonů či hudebních nástrojů). Mosaz je slitinou mědi (v rozmezí od méně než 50 % po přibližně 85 %) a zinku. Její výroba začala v prvním století př. n. l., ale až ve středověku se stala poměrně běžnou. Zinek zvyšuje pevnost v tahu a tvrdost slitiny přibližně 1,7 krát oproti mědi tažené za studena, aniž by se snížila její kujnost a odolnost vůči korozi. Cínová slitina je slitina, kde převažuje cín (přibližně 90 %), který doplňují antimon a měď.

Kromě mědi, cínu, bronzu a mosazi uměli starověcí hutníci mistři zpracovat i jiné barevné kovy (neželezné), jako jsou zinek, olovo, rtuť, stříbro a zlato. Analýza

olova v ledovcovém vrtu z Grónska umožnila rekonstruovat nejdelší sérii výroby kovů na světě. Hong *et al.* (1994) odhadli, že Řekové a Římané díky zolovňování neboli rozpouštění stříbra v olovu zvýšili celkovou produkci olova z přibližně 250 t za rok v r. 750 př. n. l. na téměř 80 000 t v r. 50 n. l. Díky nízkému bodu tání a dobré kujnosti se olovo brzy stalo horkým kandidátem pro výrobu vodovodního potrubí v římských městech, ale největší poptávka po tomto kovu byla kvůli shybkám (trubky ve tvaru U spojující cisternu s vodou udržující tlak v potrubí na jedné straně a níže položenou jinou cisternou na protějším svahu), metodou upřednostňovanou římskými staviteli pro překonávání údolí, kde by musely být postaveny kamenné mosty více než 50–60 m vysoké. Úpadek a stagnace po zániku Říma způsobily, že se produkce olova o 1 000 let později snížila na pouhých 12 500 t ročně, a celosvětová produkce dosáhla vyššího rozsahu než ta antická teprve v polovině 18. století.

Zlato a stříbro se používalo ve starověku k dekoraci (Tutanchamonova posmrtná maska přibližně z r. 1320 je asi tím nejznámějším zlatým předmětem té doby) a na výrobu šperků jak ve Starém, tak i Novém světě, a používaly se rovněž při ražbě mincí, často znehodnocovaných přidáním levnějších kovů: postupné znehodnocení římské mince *denarius* je nejspíš nejznámějším příkladem této praxe (Salmon, 1999). Patterson (1972) zhruba odhadl roční řecko-římskou produkci stříbra v tomto rozsahu: 25 t v letech 350 až 250 př. n. l., 200 t v letech 50 př. n. l. až 100 n. l. a v průběhu 4 století n. l. opět 25 t. Rtuť se používala do mastí a kosmetiky (ten nejhorší z možných způsobů použití) a později se stala klíčovou ingrediencí pro experimentální alchymii.

Železné rudy lze nalézt na rozsáhlém území, mnohá raná naleziště byla bohatá na kov (čistý magnetit obsahuje 72 % Fe) a na mnoha místech bylo možné těžit povrchově, ale tavení kovů vyžaduje vyšší teploty než výroba mědi nebo olova. První železné artefakty se datují přibližně do r. 5000 př. n. l., ale do běžného používání se železo dostalo před méně než 3 000 lety ve starověkém Egyptě i v Asii. Nejsnazší bylo vyrobit litinu, slitinu kovu s uhlíkem, ale její pevnost v tahu nebyla o nic vyšší než pevnost v tahu za studena tažené mědi a její tvrdost byla podobná, nebo jen o něco málo vyšší než tvrdost bronzů. Ale vyšší dostupnost železných rud a pomalé pokroky tavení kovů nakonec způsobily, že se železo stalo jedním z nejdůležitějších

kovů starověku a že, v celkovém objemu produkce, si tuto převahu udrželo i nyní: jak ukáží později detailněji ve třetí kapitole, náš věk je stále dobou železnou, přičemž celková spotřeba ostatních kovů ještě navyšuje rozsah využívání železa.

Kvůli svému relativně vysokému obsahu uhlíku (mezi 2 a 4,3 %) má surové železo (v angličtině pro svou podobu po odlití nazývaná „pig iron“ čili prasátkové železo, v češtině pak „housky“ nebo surové železo) nízkou pevnost v tahu (nižší než bronz nebo mosaz), nízkou rázovou houževnatost a také velmi nízkou průtažnost. Ale jeho pevnost je možné zlepšit působením tlaku, takže se hodí pro výrobu široké škály nástrojů, potřeb a předmětů (od hřebíků po koňské podkovy a od hrnců po rošty do krbů), ale i zbraní (včetně těžkých zbraní a dělových koulí), nicméně nehodilo se k výrobě předmětů, jejichž použitím by vznikly na železo vyšší požadavky v tahu: železné sloupy mohou vyhovovat, ale železné trámy by nikdy nedokázaly nést vysoké budovy. Tavení železa začínalo v jednoduchých, částečně uzavřených nístějích, přičemž výsledkem byly malé (okolo 50 kg), struskou kontaminované objemy železa.

Dýmařské pece se postupně změnily v malé šachtové pece, jejichž vylepšením vznikly první vysoké pece (v průběhu 14. století v oblasti Rýna a Mázy), v jejichž sloupcových konstrukcích se ruda taví tím, že horké plyny bohaté na CO stoupají vzhůru a redukují oxidy železa na železu při teplotách přesahujících více než 1600 °C. V následujících pěti stoletích byla velikost vysokých pecí omezená, protože dřevěné uhlí nedokázalo nést těžší náklad železných rud a vápence (používaného kvůli odstraňování nečistot). Klíčovou inovací, která umožnila masovou výrobu levného železa, se v průběhu konce 18. století stalo nahrazení dřevěného uhlí hutním koksem.

Nejstarším způsobem, jak vyrobit ocel, je tavením a současným nauhličováním, či cementací, tj. přidáváním uhlíku do pórovitého železa, které nemá prakticky žádný uhlík (malá porézní množství železa a strusky z dýmařských pecí), pomocí delšího zahřívání na dřevěném uhlí. Tak vznikne vnější vrstva tvrzené oceli a rovnoměrné rozložení uhlíku (nezbytné k výrobě oceli používané na zbraně), kterého se dá dosáhnout pouze opakovaným kováním (Birch, 1968). Odstraňování uhlíku oxygenací z litiny se poprvé objevilo v Číně za dynastie Chan, kdy byla vyrobena slitina dostatečně vhodná pro výrobu řetězů k padacím mostům přes hluboké propasti. Ovšem

takovýto způsob použití byl spíše výjimkou a ocel i nadále zůstávala drahá, čili byla používána jen omezeně až do 19. století.

2.4 Materiály raného novověku

Dávám přednost jednoduchému vymezení raného novověku jako období tří století mezi lety 1500 a 1800. Pokud bych měl vybrat přesnou dataci, zvolil bych (ze zřejmých důvodů) rozmezí 1492 a 1789. Byla to fascinující století a působila jako amalgám na mnoho přetrvávajících, starých, středověkých skutečností a nových (zřetelných v retrospektivním pohledu) klíčových momentů, které bezpochyby položily základ modernímu světu. Co se materiálů týče, bylo toto období charakterizováno novými kvalitami, ale ještě o něco více zvýšenou kvantitou. Ani ve stavebnictví ani v (stále převládající) řemeslné výrobě nebyly zaváděny nové materiály, ale vyšší poptávka po dvou základních, vysoce kvalitních stavebních materiálech – dřevě a železe – byla vyvolána rostoucí velikostí měst a také tím, že oceán brázdily lodě, více se využívala vodní kola a větrné mlýny, stavěly se větší pevnosti a komplikované kanály, přístavy i silnice a (což začalo v Anglii a Walesu) těžilo se více uhlí, což následně vedlo ke zvýšení objemů odstraněné a přemístěné zeminy, písku, štěrku i kamení.

Raný novověk se vyznačoval vyšší mírou populačního růstu, počínající urbanizací a protoindustrializací a tyto procesy stimulovaly změny v materiální spotřebě. Nejlepší dostupné rekonstrukce naznačují, že se populace na celém světě zvýšila o méně než 60 % během 500 let mezi lety 1000 a 1500, ovšem v dalším období se více než zdvojnásobila (z přibližně 460 milionů na téměř miliardu) do r. 1800 – přesto zůstala převážně zemědělská, ve městech bydlelo méně než 5 % všeho lidstva (Klein Goldewijk *et al.*, 2010). Protoindustrializace spoležala na levné vesnické bydlení a městskou práci v manufakturách a jejich produkce se dostala na trhy v celé zemi, dokonce i do zahraničí.

V Evropě byly tímto procesem dotčeny části Britských ostrovů (Cotswolds, Ulster), Francie (Picardie) a Německo (Vestfálsko, Sasko a Slezsko). V Asii byly velkapacitní řemeslné manufaktury soustředěny v pobřežních oblastech čínské oblasti Čching, indického Mughalu a v městech japonské Tokugawy a rostoucí podíl výrobků ze všech těchto oblastí si našel cestu na trhy v ostatních asijských a evropských

oblastech. Zvýšení objemu řemeslné produkce s sebou nese počátky masové spotřeby a, jak Mukerji (1981) prokázal, orientace na hmotnou spotřebu tedy nebyla následkem industrializace, protože byla poměrně zřejmá během 16. století v některých oblastech Evropy na pobřeží Atlantského oceánu.

Malby nizozemských umělců, kteří působili v období nizozemského Zlatého věku (1581–1701, nebo v podstatě po celé 17. století), ukazují mnohé prostorné útulné domy v Amsterdamu, Haarlemu nebo Delftách s malými, ale roztomilými dvorky, čistými podlahami pokrytými dlažbou, velkými skleněnými okny, stěnami ozdobenými obrazy či mapami, hudebními nástroji a hojností masivního nábytku a lůžkovin. Interiéry malované Janem Molenaarem, Pieterem de Hoochem a Janem Vermeerem v nás zanechávají nezaměnitelný dojem materiálního pohodlí a počínajícího nadbytku, kterému se těšili mnozí nizozemští měšťané dávno předtím, než evropská industrializace iniciovala následné vlny moderní hromadné spotřeby. Navíc majitelé těchto domů byli dychtivými odběrateli rostoucího výběru zboží, lepším kuchyňským vybavením a vkusnými šaty počínaje a rytinami a porcelánem dováženým z Číny a Japonska konče (Nizozemci měli obchodní monopol s šógunátem Tokugawa).

Největší zdroj informací o úspěších raného novověku – první encyklopedie na světě publikovaná mezi lety 1751 a 1777 pod vedením Denise Diderota a Jeana le Rond D'Alemberta – je plná popisů a rytin široké řady strojů, včetně mnoha komplexních a složitých konstrukcí, jejichž osvojení bylo předzvěstí dokonce větších pokroků industrializace v 19. století (Diderot a D'Alembert, 1751–1777). Současně běžně přetrvávalo primitivní a nevhodné bydlení: dokonce ve Francii se v 16. století ve vesnicích většinou bydlelo v hliněných chatrčích pokrytých slámou nebo sítinou a ve městech byly obytné čtvrti často kombinovány s dílnami nebo obchody (nebo k nim přiléhaly; podobně jako tomu bylo u kjótských tmavých, dlouhých domů *machiya*). Budovy byly také špatně vytápěné a špatně osvětlené: hlavní ohniště bylo nevhodné a nevykonné a mnohem efektivnější kamna (z nichž nejpozoruhodnější byla německá *Kachelofen* a holandské a skandinávské vzory dlaždic) se jen pomalu rozšiřovala z oblasti svého původu.

Výsledkem rozmachu bylo, že ohniště a koše na oheň vyžadovaly obrovské množství palivového dříví a dřevěného uhlí, aby se uspokojila poptávka rozšiřující-

cích se měst této éry před používáním uhlí. V Paříži se poptávka zvýšila z více než 400 000 fůr dřeva v r. 1735 na více než 750 000 fůr v r. 1789 (přibližně 1,6 Mm³) a to samé množství dřevěného uhlí, což v konečném výsledku dávalo více než tunu paliva na osobu (Roche, 2000). V stísněných místnostech venkovských domů se všude povalovalo jen nářadí a dokonce i v městských obydlích bylo často jen velmi málo nábytku. Židle, kterou nebylo ve středověku možné nalézt v téměř žádném domě (lidé sedávali na zemi, lavicích, římsách nebo polštářích), se stala běžným kusem nábytku, ale např. dobrá postel byla stále hodně drahá: před r. 1700 její cena ve Francii představovala minimálně 25 % celkové ceny nábytku nízkopříjmových rodin a téměř 40 % celkové ceny nábytku pro sloužící (Roche, 2000).

Dokonce v průběhu 17. století bylo stále ještě běžné vařit a jíst z těch samých nádob. Ludvík XIV. jedl na počátku své vlády prsty (v 60. letech 17. století), ale už o století později se dokonce na stolech středostavovských měšťanů objevilo množství různých předmětů určených ke speciálním účelům od kalíšků na vejce po šálky na čaj. Takovýto posun byl doprovázen ústupem ušlechtilých materiálů (méně předmětů se vyrábělo ze stříbra nebo křišťálu) a vzrostl počet levnějších předmětů vyrobených z běžných kovů, porcelánu a hnědého skla. Tato změna znamenala nástup pomíjivé spotřeby a rychle se měnící módy. Chudoba byla stále široce rozšířena, ale pro čím dál více lidí se život už netočil jen kolem životních nezbytností. Jak Roche (2000, s. 77) píše: „začal se prosazovat nový vzorec kulturního chování tvořený úsilím dosáhnout blahobytu a důstojnosti“.

Na venkově se v některých zemích začala stavět lepší obydlí a jejich požadavky na dřevo odrážely místní prostředí: lehké stavby v oblastech náchylných k zemětřesení, pevné domy z trámů v určitých částech západní Evropy na pobřeží Atlantiku a na východě Severní Ameriky. Japonské domy *minka* se stavěly jako konstrukce z podpůrných pilířů, stěny byly z hlíny nebo bambusu, měly posuvné dveře, papírové přepážky a hliněné podlahy. Čili na 100 m² velký *minka* se spotřebovalo více než 8 m³ borovicového, cedrového nebo cypřišového dřeva (Kawashima, 1986) – zatímco na stejně velký skandinávský srub (*stock hus*) se spotřebovalo 100 m³ dřeva na stěny, dveře, stropy a střechy a velké statky v Německu nebo Švýcarsku si běžně

vyžádaly 1000 m³ stavebního dříví (Mitscherlich, 1963). Ke spotřebě dřeva ještě přispívaly časté opravy a přestavby.

Dřevo bylo nepostradatelnou surovinou nejen pro stavbu domů a dopravních prostředků (vozíky, nákladní povozy, kočáry, čluny, lodě), ale také – jelikož se v některých částech Evropy zvyšovala produkce železa – pro výrobu dřevěného uhlí využívaného ve vysokých pecích (teprve v druhé polovině 18. století se začalo nahrazovat koksem, a navíc jen ve VB). A evropské námořní mocnosti (Španělsko, Portugalsko, Anglie, Francie a Nizozemsko) soutěžily ve stavbě velkých zaoceánských plavidel – obchodních i vojenských – a rostoucí počet takových lodí a jejich čím dál větší velikost s sebou přinášela nebývalou poptávku po stavebním dříví vysoké kvality pro stavbu trupů, palub i stěžňů lodí. Na samém počátku raného novověku se plavila Kolumbova *Santa Maria* o výtlaku přibližně 110 t, zatímco Magalhaesova *Victoria*, první loď, která obeplula svět, měla výtlak 85 t. Asi 70 % celkové hmotnosti připadalo na dřevěné trupy, stěžně a ráhna (zbytek pokrývala zátěž, zásoby, plachty, výzbroj a posádka), takže tato první plavidla obsahovala 60–75 t stavebního dříví (Fernández-Gonzalez, 2006).

Koncem 18. století se vyráběly 54 m dlouhé, velké dvojpalubové námořní bojové lodě (původně francouzského typu), které uvezly na palubě 74 děl a až 750 mužů posádky (Watts, 1905). Na výrobu takové lodi bylo potřeba 3 700 fůr dubového dřeva (z nichž každá činila přibližně 1,4 m³) nebo přibližně (při hustotě 650 kg/m³) 3 400 t dřeva, čili zhruba padesátkrát více, než bylo použito na první zaoceánské plachetnice před třemi stoletími. Ovšem protože přibližně 60 % stavebního dříví nakoupeného na stavbu lodí zmizelo – protože menší kousky dřeva si běžně brali dělníci z doků na palivo, jednoduchý nábytek nebo na prodej (Linebaugh, 1993) – rovnalo se skutečné množství odvezené z lesa typicky více než 5 000 t na každou loď.

Bitevní lodě raného novověku také nabízejí výborný názorný příklad postupně čím dál mohutnější výroby zbraní. Lodě na počátku 16. století byly typicky vyzbrojeny méně než 10 děly, v r. 1588 měla anglická plavidla, která porazila španělskou Armadu, v průměru 12 děl, před koncem 17. století již lodě nesly až 100 děl a během bitvy u La Hogue v r. 1692 využili britští a nizozemští kapitáni všech 6 756 děl (Anderson a Anderson, 1926). A železo pro vyzbrojení bitevních plavidel nebylo

jediným důvodem zvýšení spotřeby tohoto kovu. Vyšší poptávka přicházela také kvůli rozkvětu hornictví a většímu objemu výroby hřebíků, drátů, podkov a zbraní pro pozemní jednotky. Anglické statistiky vykazují, že produkce surového železa se zvýšila z pouhých 10 000 t v r. 1700 na 26 000 t do r. 1750 a na 156 000 t do r. 1800 (Bell, 1884).

Výroba železa v malých hutních pecích vyžadovala enormní množství dřevěného uhlí, a to ve spojení s neefektivním konverzním poměrem dřeva na dřevěné uhlí vedlo k rozsáhlému odlesnění v oblastech hutnictví železa: do r. 1700 spotřebovala typická anglická hutní pec 12 000 t dřeva ročně (Hyde, 1977). Lesům se odlehčilo až teprve s pomalým zaváděním metalurgického koksu: ten byl poprvé použit v hutní peci v r. 1709, ale dokonce i ve VB převážil až o století později. Ocel byla i v polovině 18. století stále komoditou s omezenou dodávkou. Ke konci 40. let 18. století začal Benjamin Huntsman (1704–1776) vyrábět svou tyglíkovou (kelímkovou) ocel nauhličováním kovaného železa, ale takový kov se používal jen pro speciální účely s omezeným objemem, jako byly drahé zbraně (proslavené damascénské nebo japonské meče), žiletky, příbory, hodinová pera a nástroje pro strojírenství (především pro řezání kovů), jejichž kvalita omlouvala vysokou cenu (Bell, 1884). V Evropě se rozšířila těžba všech možných druhů rud a zvláštní pozornost si zaslouží inovace v Německu, Francii a Itálii.

Ale největší změna přišla s využíváním ložisek kovů Nového světa díky nebyvalému rozvoji těžby zlata a stříbra. První věc, na kterou se Kolumbus ptal domorodců poté, co přistál u břehů Nového světa, bylo zlato, ale bohatství Španělska se značně zvětšilo až po objevení nalezišť zlata a stříbra v Mexiku (Zacatecas), v Peru a Bolívii (Potosí, 1545). V následujících 250 letech obohatilo americké stříbro španělské království přímými transfery, ale převoz kovu přes Tichý oceán na Filipíny a pak do Číny znamenal vytvoření skutečného světového systému výměny (Frank, 1998).

Barettovy (1990) odhady naznačují, že se celkové roční toky stříbra do Evropy zvýšily ze 40 t z počátku 16. století na 600 t v průběhu posledních čtyř desetiletí 18. století. Celkové roční toky stříbra do Asie (přes nizozemské a anglické společnosti a přes Levantskou společnost a také přímo z obou Amerik přes Tichý oceán) vzrostly ze 75 t v průběhu prvního desetiletí 17. století až na téměř 170 t do poloviny 18. sto-

letí. A Flynn a Giráldez (1995) tvrdí, že založením Manily v r. 1571 (s cílem propojit poprvé v historii Asii a Ameriku „významným, přímým a nepřetržitým obchodním spojením“) došlo ke zrození skutečného světa obchodní výměny.

V 18. století jsme také svědky pozoruhodného rozkvětu textilní výroby, protože první kategorií spotřebitelského zboží, které se těšilo očividnému a široce rozšířenému nárůstu výdajů, bylo odívání. Tento proces začal ve městech a rozšířil se na venkov a nakonec způsobil něco, co Roche (2000) nazval „sjednocení oděvních zvyklostí“. Vertikální stavy se používaly už od starověku a mnoho tradičních společností v Asii a Americe používalo přenosné zádové stavy. V obou případech dokázali tkalci vyrobit látku jen takové šířky, jakou zaujímal rozpětí jejich paží, a širší látky vyžadovaly spolupráci dvou tkalců. To se změnilo v r. 1733, kdy John Kay vynalezl létající čunek, který se dal poslat švihem zápěstí z jednoho konce stavu na druhý. Nejdůležitější inovace, která umožnila levnou, masovou výrobu látek, přišla v r. 1785 v podobě prvního mechanického tkacího stavu Edmunda Cartwrighta (na počátku poháněného párou).

Neméně důležitou inovací byla odpověď na dovoz indických bavlněných látek s potiskem (kaliko vyráběné v Kalikatu či Kóžikkótu od 11. století) do Evropy. Evropští řemeslníci začali přebírat tyto indické vzory ve Francii před r. 1650 a do r. 1700 už byly jak francouzské, tak i anglické manufaktury schopné vyrábět trvalé barvy a tato technika se rozšířila do Nizozemska, Německa, Švýcarska a Rakouska. O století později již získávala lancashirská výroba kalika zřetelnou konkurenční výhodu nad indickými produkty, zvláště poté, co Thomas Bell v r. 1785 vynalezl potisk pomocí měděných válečků (Jenkins, 2003). Brzy se podíl na obchodu radikálně změnil a britské statistiky prokazují, že do r. 1835 byl celkový počet kusů látky (přírodní i s potiskem) zasílaných z Británie do Indie 169krát vyšší než množství importované do Británie (Národní archivy, 2012).

A na závěr několik odstavců o kamení a ostatních stavebních materiálech v období raného novověku. Řezaný kámen přetrvával jako dominantní materiál velkolepých staveb, honosných soukromých domů a náboženské architektury. Nádhera pozdní renesance a barokního Říma jsou nejspíše nejlepšími příklady jeho použití na palácích, bazilikách, kostelích a kolonádách navržených takovými mistry, jako byli Mi-

chelangelo Buonarroti, Carlo Maderno, Gian Lorenzo Bernini, Francesco Borromini a Girolamo Rainaldi. S rozkvětem městského bydlení se otevřel nový trh pro řezaný kámen. Snad nejvýznačnějším příkladem tohoto rozvoje je rozrůstání města Paříže. Po staletí probíhala těžba vápence (*pierre de taille*) v podzemních lomech na okraji města, ale rozrůstající se město nad těžními chodbami začalo způsobovat propadání chodeb i celého povrchu (Blanc *et al.*, 1998).

Komise ustavená Jean-Baptiste Colbertem, francouzským ministrem financí za vlády Ludvíka XIV. (v letech 1665–1683) přišla s tím, že pouhých 40 km severně od středu města se nachází lomy v Saint-Maximinu ve Val d'Oise, kde se těží vápenec s téměř perfektním odstínem pro monumentální stavby města (Destination Oise, 2013). Tento měkký kámen se dá snadno řezat, a přesto je poměrně odolných vůči povětrnostním vlivům. Od konce 17. století dával Paříži její nenapodobitelný vzhled v odstínech od bílé po světle žlutou, ať již v podobě masivních bloků pro namáhané základy staveb nebo tenčěji řezané desky na fasády. První velká vlna stavebního rozmachu se uskutečnila mezi lety 1715 a 1752, kdy bylo postaveno 22 000 nových odolných staveb, přičemž téměř jedna pětina se pyšnila *port chochère* (Brice, 1752). Tento pozoruhodný stavební výkon byl překonán až o století později přistavěním 40 000 domů, kdy Haussmann přestavoval celou Paříž mezi lety 1853 a 1870 (Des Cars, 1988).

Ale v mnoha částech Evropy se s kamenem jako stavebním materiálem rozloučili ve prospěch nového druhu cihel používaných na nové, materiálově náročnější typy pevností, které bylo potřeba vybudovat v odpověď na prodloužení dostřelu dělostřelectva. Zatímco typické středověké opevnění spoléhalo na kompaktní (a velmi často vyvýšená) místa a stavělo se s vysokými a tlustými kamennými stěnami, nový styl byl naprosto odlišný: existovaly různé druhy polygonů ve tvaru hvězdy (hexagony, oktagony) přizpůsobené místnímu (a často naprosto rovnému) terénu, ovšem vždy s poměrně nízkými zdmi podpořenými masivními hliněnými valy, které měly pohltit palebný útok dělostřelectva, zakrývat a chránit a současně vymezit jasnou linii obranné palby.

Vojenský architekt a později též maršál Francie Sébastien Le Prestre Vauban byl nejvýznačnějším tvůrcem těchto pevností, které vyžadovaly nevídané množství kon-

strukčního materiálu. V průběhu 40 let v letech 1667 až 1707 modernizoval pevnosti přibližně 300 měst a postavil 37 nových pevností na západní, severní a východní hranici Francie (které jsou nyní na seznamu Světového dědictví UNESCO), včetně tak působivých projektů, jako jsou citadely Le Palais a Mount Louis, města Besançon a Saint Martin-de-Ré (Duffy, 1985; Hebbert, 1990). Pevnost města Lille byla postavena z 60 milionů cihel a jeho největší projekt, opevnění Longwy v severovýchodní Francii, bylo vytvořeno z 640 000 m³ skály a zeminy a 120 000 m³ cihlového zdiva (Anderson, 1988).

2.5 Vznik moderní materiálové civilizace

Pokud budeme posuzovat základní existenční podmínky – tj. sledovat převažující stravu, délku života, typické životní podmínky, spotřebu paliva, hnací sílu a každodenní výběr, použití a dostupnost materiálů – nelišily se nijak radikálně dokonce ani pokročilé preindustriální společnosti konce 18. století (Čína za vlády císaře Kchang-si, konec období Tokugawa v Japonsku, předrevoluční Francie, Rusko za Kateřiny Veliké) od svých pozdně středověkých předchůdců. Hladomory nebyly časté, ale převažující strava byla sotva dostačující, byla monotónní a převážně spočívala na obilovinách. Vysoká novorozenecká úmrtnost snižovala průměrný věk dožití při narození na méně než 40 let, příbytky byly přeplněné, nehygienické a nepohodlné, dřevo (a z něj vyráběné dřevěné uhlí) a posklizňové zbytky (většinou sláma z obilovin) představovaly převažující paliva. Hlavní hnací sílu představovaly lidské a zvířecí svaly a dřevo, kámen a hlína (tvarovaná a vypálená ve formě cihel) byly základními stavebními materiály, ovšem vlastnit jakýkoliv předmět z kovu nebo slitin (železo, měď, bronz, mosaz) nebylo právě běžné.

Pouze v Anglii bylo dřevo vytěsněno uhlím jako převažujícím palivem. Parní stroje Jamese Watta (stále poměrně neefektivní) začaly nabízet první konkurenci větrným mlýnům a vodním kolům jakožto spolehlivá, a postupně čím dál silnější hnací síla. Nahrazením dřevěného uhlí uhlím bylo možné stavět větší vysoké pece, vyrábět více železa a snížit cenu mnoha běžných železných předmětů. Ale dokonce ani ve VB nebyla strava často tím nejdůležitějším, lidé se nedožívali dlouhého věku a materiální vlastnictví většiny lidí bylo omezené. To vše změnilo 19. století – nejpr-

ve ve VB, v některých částech západní Evropy a východních oblastech USA, posléze ve většině evropských zemí a v celé Severní Americe, přičemž Japonsko bylo první asijskou zemí, která se vydala na svou cestu k době moderní po r. 1870. Co se modernizace v oblasti materiálů týče – poháněné industrializací a urbanizací – se toto období vyznačovalo především dvěma procesy: značně rozšířenou těžbou tradičních stavebních materiálů a velmi rychle rostoucí spotřebou kovů.

Rozkvět prvního druhu materiálu je obvykle přehlížen, protože se historikové při popisu industrializace zaměřují na spotřebu fosilních paliv a výrobu kovů a strojů, ovšem bylo to kamení, jehož ohromné množství muselo být nařezáno, odstřeleno, rozlámáno a vytvarováno, a rovněž tak zeminu, písek a hlínu bylo třeba přesunout, umístit nebo z nich udělat cihly a beton, a to za pouhých pár desítek let, aby se jednotlivé země pokryly sítí železnic a lepších cest, aby byly vybudovány domovy pro miliony někdejších rolníků, kteří se každým rokem stěhovali do měst, a aby se vytvořila produktivní infrastruktura moderních ekonomik (doly, přístavy a továrny), která každé zemi umožňovala posunout se od agrární společnosti k hospodářství, v němž převládá manufaktura, za pouhé dvě či tři generace.

Snad nejvíce esteticky působivým příkladem tak značně zvýšené poptávky po řezaném kameni by byla modernizace Paříže, která začala během Druhého francouzského císařství (1852–1870). Tím, že se pod vedením Georgese Eugène Haussmanna v letech 1853 až 1870 přetvořily pařížské ulice a domy (Carmona a Camiller, 2002) a že se město následně rozrostlo, se počet jeho obyvatel mezi lety 1850 a 1900 zvýšil téměř třikrát, což vytvořilo novou vlnu poptávky po charakteristicky krémovém kameni z lomů Saint-Maximin, které byly (jak již bylo vysvětleno) vybrány Colbertem v 17. století, aby nahradily vápenec z místních lomů. Haussmann používal tento kámen na typické, mohutně vyhlížející pětiposchodové budovy s hranatými mansardovými střechami, které obklopovaly jeho rovné, široké bulváry. Je možné alespoň řádově odhadnout množství materiálu, uvažujeme-li, že během Haussmannovy obnovy bylo postaveno přibližně 40 000 nových budov s průměrnou vahou kamení do základů 350 t a na fasádu 250 t – což by znamenalo přibližně 25 Mt kamene, který se musel vytěžít, přepravit, nařezat, a s ohledem na vzniklé odpady by to klidně mohlo znamenat až dvojnásobek tohoto množství.

Urbanizace zvýšila poptávku po oknech, což v konečném důsledku vedlo k zavedení nových technik masové výroby tabulkového skla: v r. 1848 Henry Bessemer (který se později mnohem více proslavil díky zavedení nové a nijak drahé techniky výroby oceli) nechal patentovat výrobu rovného skla tažením lehce ochlazeného materiálu vzhůru přes ploché trysky mezi azbestovými válci. Šlo o skvělé řešení ve srovnání s výrobou korunového skla (jehož největším omezením byla velikost) i s výrobou cylindrického skla počátku 19. století, také omezeného velikostí. Ovšem teprve v průběhu 50. let 19. století zavedl Alastair Pilkington tavení skloviny v cínové vaně, což umožnilo výrobu velmi velkých kusů vyznačujících se téměř dokonalou stejnoměrností (Pilkington, 1969).

Snad nejlepším příkladem toho, jak moc se zvýšilo množství přesouvaného a odstraňovaného stavebního materiálu – včetně zeminy, písku a šterku – je expanze železniční sítě. Výstavba železnic začala v r. 1830 (56 km mezi Liverpoolem a Manchesterem), o 30 let později se jejich celková délka na celém světě vyšplhala na 100 000 km a do r. 1900 dosáhla celková délka na pěti kontinentech 775 000 km, z toho 250 000 km v Evropě, více než 190 000 km v USA, 53 000 km v Rusku a 30 000 km ve VB (Williams, 2006). S ohledem na různorodost terénu, který musely železnice překonávat, je nemožné odhadnout typický objem stavebních materiálů – odkryté a přemístěné zeminy kvůli příkopům či náspům, kamene kvůli prokopání tunelů nebo provedení zářezů do úbočí hor, či těžného šterku pro stavbu přístupových cest a kolejových loží – to vše bylo třeba obstarat kvůli jednomu průměrnému kilometru nové dráhy.

Dokonce i vysoce konzervativní odhad 3 000 m³/km by vedl k téměř 2,5 Gm³ sypkého materiálu v souvislosti s celosvětovou výstavbou železnic v druhé polovině 19. století. Podobně konzervativní odhad ve výši přinejmenším 2 000 t výplně šterkového lože (rozdrcený kámen pod a okolo železničních pražců) na kilometr se rovná přinejmenším 1,5, a spíše i 2 Gt, hrubého šterku použitého na upevnění kolejnic železničních drah postavených v letech 1830–1900. Na stavbu nových továren, rozšiřování přístavů a stavby silnic se zpevněným povrchem byla potřeba rovněž celá řada nerostů v nebývalých objemech. Ovšem éra asfaltových silnic přišla až po r. 1900, a tak tím nejdůležitějším novým materiálem ve stavebnictví 19. století byl

beton vyráběný smícháním cementu s kamenivem a vodou. Hrubost přidávaného kameniva se pohybuje od písku až po různě hrubý štěrk, a hydratace (exotermická reakce) cementu vytvrdí směs dokonce i pod vodou.

Cement vhodný pro výrobu kvalitního betonu se objevil až po r. 1824, kdy Joseph Aspdin, anglický zedník, obdržel patent na hydraulickou maltu/stucco vyráběnou pálením vápence a hlíny při vysokých teplotách. Tento proces mění hlinitany a křemičitany ve sklo a jeho výsledkem jsou slinky, jejichž mletím se získává portlandský cement, jméno, které Aspdin vybral, protože barvou tento materiál připomíná vápenec z Portlandu (Shaeffer, 1992). Hydratací tohoto cementu (jeho reakcí s vodou) vzniká materiál, který lze ihned tvarovat a který je pevný v tlaku, ale málo odolný v tahu. Tento nedostatek lze překonat přidáním železné výztuže, přičemž tato kombinace je možná díky skutečnosti, že beton a železo tvoří pevnou vazbu a protože hydraulický cement ve skutečnosti chrání železo před korozí.

Vývoj a komerční využití vyztuženého betonu byly postupným procesem, přispěli k němu i francouzští vynálezci (François Coignet na počátku 60. let 19. století a Jacques Monier, jenž si nechal patentovat první vyztuženou betonovou příčku, a poté v r. 1878 obecně systém pro vyztužené konstrukce) a v 70. letech 19. století William Ward ve VB a Thaddeus Hyatt v USA (Newby, 2001). Skutečný počátek moderní armatury se datuje do r. 1884, kdy Ernest Ransome patentoval vlastní systém betonu s železnými pruty, jenž se široce rozšířil v rámci koncese, především u staveb nových průmyslových budov (Newby, 2001). V r. 1886 Carl Doehring patentoval důmyslný nápad předepnout železné pruty dříve, než se umístí do betonu: pruty jsou nataženy při umístění do mokrého materiálu a tah je uvolněn až po zatuhnutí betonu (Abeles, 1949). První betonový mrakodrap, Monandnock Building v Chicagu, byl dokončen v r. 1891 a během 90. let 19. století umožnilo zavedení moderních rotačních pecí (s teplotami až 1500 °C) vyrábět cement s nízkými náklady a vysokou kvalitou. A tak všechny tyto předpoklady pro vznik období betonu vyvstaly již před r. 1900.

I když klesala poptávka po dřevě, protože dříví na otop a dřevěné uhlí bylo nahrazeno fosilními palivy a koksem (do poloviny 70. let 19. století začalo ve Francii uhlí uspokojovat více než polovinu poptávky po elektřině), v USA došlo ke zlomu mezi objemem dřeva na otop a objemem uhlí a ropy v letech 1884–1885), a protože