

## 4. Uhlíkový cyklus a jeho narušení člověkem

Fyzikální vlastnosti atmosféry byly, jsou a budou výrazně ovlivněny přítomností radiačně aktivních (nebo též skleníkových plynů), zejména oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), metanu ( $\text{CH}_4$ ) a oxidu dusného ( $\text{N}_2\text{O}$ ), jejichž koncentrace v atmosféře se od počátku průmyslové revoluce (přibližně od roku 1750) podstatně zvýšila výrazně nad přirozenou úroveň. Tyto látky emitované člověkem v plynné fázi se stávají součástí globálních biogeochemických cyklů a jsou tedy neoddelitelně spojeny se složitými toky a transformacemi mezi různými složkami zemského systému (atmosféra, oceán, půda, biosféra, litosféra), a to jak biotickými tak abiotickými procesy. Vzhledem k tomu, že většina těchto procesů závisí na vnějších klimatických podmínkách, projevují se antropogenní zásahy do biogeochemických cyklů změnami, které spouští kaskádu pozitivních i negativních zpětných vazeb. V období posledních několika miliónů let, byly koncentrace výše uvedených plynů v atmosféře ovlivňovány klimatickými podmínkami, a proto v jistých mezích kolisaly. Současná situace způsobená výraznými antropogenními emisemi situaci zásadně změnila. V současné době jsou to právě člověkem způsobené změny v geobiochemických cyklech a z toho plynoucí nárůst koncentrací skleníkových plynů, které ovlivňují klimatické podmínky, a nikoliv naopak, jak tomu bylo přibližně do počátku průmyslové revoluce.

### 4.1. Základní zásobníky a procesy v uhlíkovém cyklu

V závislosti na úhlu pohledu je možné zásobníky uhlíku (tzv. carbon pools) rozdělit na řadu dílčích skupin a kategorií. Pro naše potřeby budeme uvažovat čtyři kategorie, které mají největší význam pro globální uhlíkový cyklus, přičemž obr. 4.1 nabízí přibližnou představu o jejich vzájemném poměru. Je třeba mít na paměti, že dělení do níže uvedených kategorií je značně zjednodušující a lze s ním polemizovat, nicméně postačuje pro první přiblížení. Základní jednotkou, se kterou budeme pracovat, jsou petagramy uhlíku (PgC), které odpovídají dříve častějším gigatunám uhlíku (GtC). Tyto jednotky je možné zaměňovat.

**Zemská kůra:** Největší množství uhlíku na Zemi je uloženo v usazených horninách v kůře planety Země. Jedná se jak o břidlice tak uhličitany (např. vápence a dolomity) a odhadujeme, že celkem je v této podobě v zemské kůře přítomno 100.000.000 PgC. Další 1.900-5.000 PgC je uloženo v zemské kůře jako uhlovodíky (uhlí, ropa, zemní plyn), které se tvořily po miliony let z odumřelých těl živých organismů za vysoké teploty a tlaku. Tyto uhlovodíky jsou běžně známé jako fosilní paliva.

**Oceány:** Moře a oceány na Zemi obsahují 38.000-42.000 PgC, z nichž většina je ve formě rozpuštěného anorganického uhlíku uloženého ve velkých hloubkách, kde je tento uhlík „uložen“ na relativně dlouhou dobu. Mnohem menší množství uhlíku, přibližně 1.000 PgC, se nachází v blízkosti hladiny oceánu. Tento uhlík je součástí rychlé výměny mezi oceány a atmosférou skrze rozpouštění plynu  $\text{CO}_2$  ve vodě resp. jeho uvolňování zpět do atmosféry a také prostřednictvím biologických procesů, jako je růst, smrt a rozkladu planktonu. Ačkoli většina uhlíku z povrchové vrstvy je součástí koloběhu s poměrně vysokou dynamikou, určitá část přechází do hlubšího a stabilnějšího zásobníku.

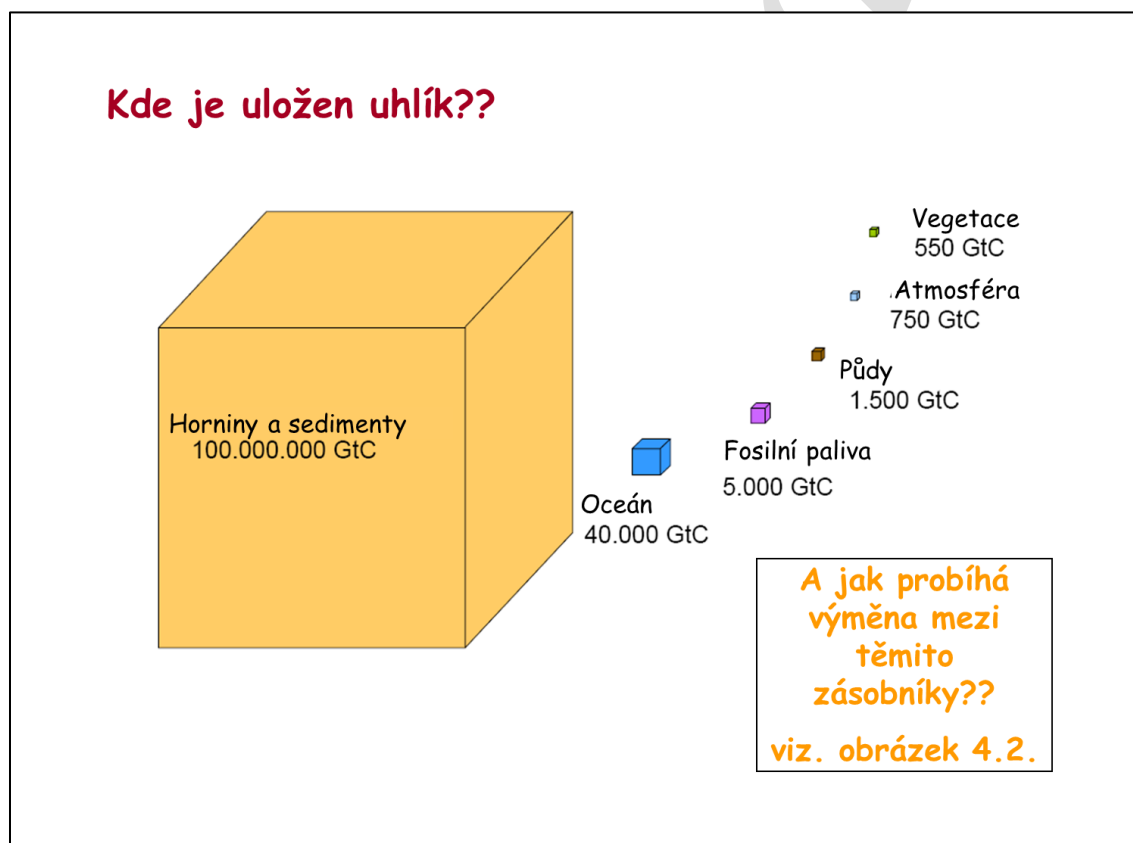
**Atmosféra:** Atmosféra obsahuje „pouze“ 750 PgC, přičemž většina je ve formě oxidu uhličitého a v mnohem menším množství ve formě metanu a dalších sloučenin. I když jde o výrazně menší zásobník než předchozí dva zmíněné, jde o zásobník klíčový z pohledu skleníkového efektu a ovlivnění globálního klimatu. Relativně malá velikost atmosférického zásobníku způsobuje, že je citlivý i na poměrně malé perturbace v geobiochemických cyklech. Je také pravdou, že dnešní hodnota 750 PgC je podstatně vyšší než ta, která existovala před počátkem masivního spalování fosilních paliv a odlesňování, také výrazně nižší než hodnota v období prvohor či druhohor. Před počátkem

průmyslové revoluce (kolem roku 1750), obsahovala atmosféra přibližně 560 PgC a tato hodnota se považuje za tzv. přirozenou hladinu.

**Suchozemské ekosystémy:** Terestriální ekosystémy obsahují uhlík obsažený v tělech rostlin, zvířat, půdní organické hmoty a mikroorganismů (bakterií a hub). Platí, že rostliny a půda jsou zdaleka největšími zásobníky uhlíku a v globálních bilancích bývají ostatní zásobníky zanedbávány. Mezi rostlinami a atmosférou probíhá relativně rychlá a dynamická výměna uhlíku prostřednictvím fotosyntézy, ve kterém je absorbován  $\text{CO}_2$  ze vzduchu a získaný uhlík je převáděn do nových rostlinných tkání, a proti tomu dýchání, kdy se část předtím zachyceného  $\text{CO}_2$  uvolní zpět do atmosféry jako produkt metabolismu. Ze všech rostlin je nejvíce uhlíku uloženo ve dřevní hmotě. Celkově je ve vegetaci na Zemi uloženo přibližně 560 PgC, přičemž velká část je uložena v podobě dřevní hmoty.

Celkové množství uhlíku ve světových půdách se odhaduje na 1500 PgC. Měření uhlíku v půdě je časově značně náročné a obsah organické hmoty v půdě je značně prostorově variabilní, a proto globální odhady organické hmoty v půdě pracují se dvěma předpoklady. Za prvé, nejčastější forma uhlíku v půdě je organický uhlík odvozený z rostlinných materiálů a mrtvých mikroorganismů. Za druhé, s rostoucí hloubkou klesá organického uhlíku.

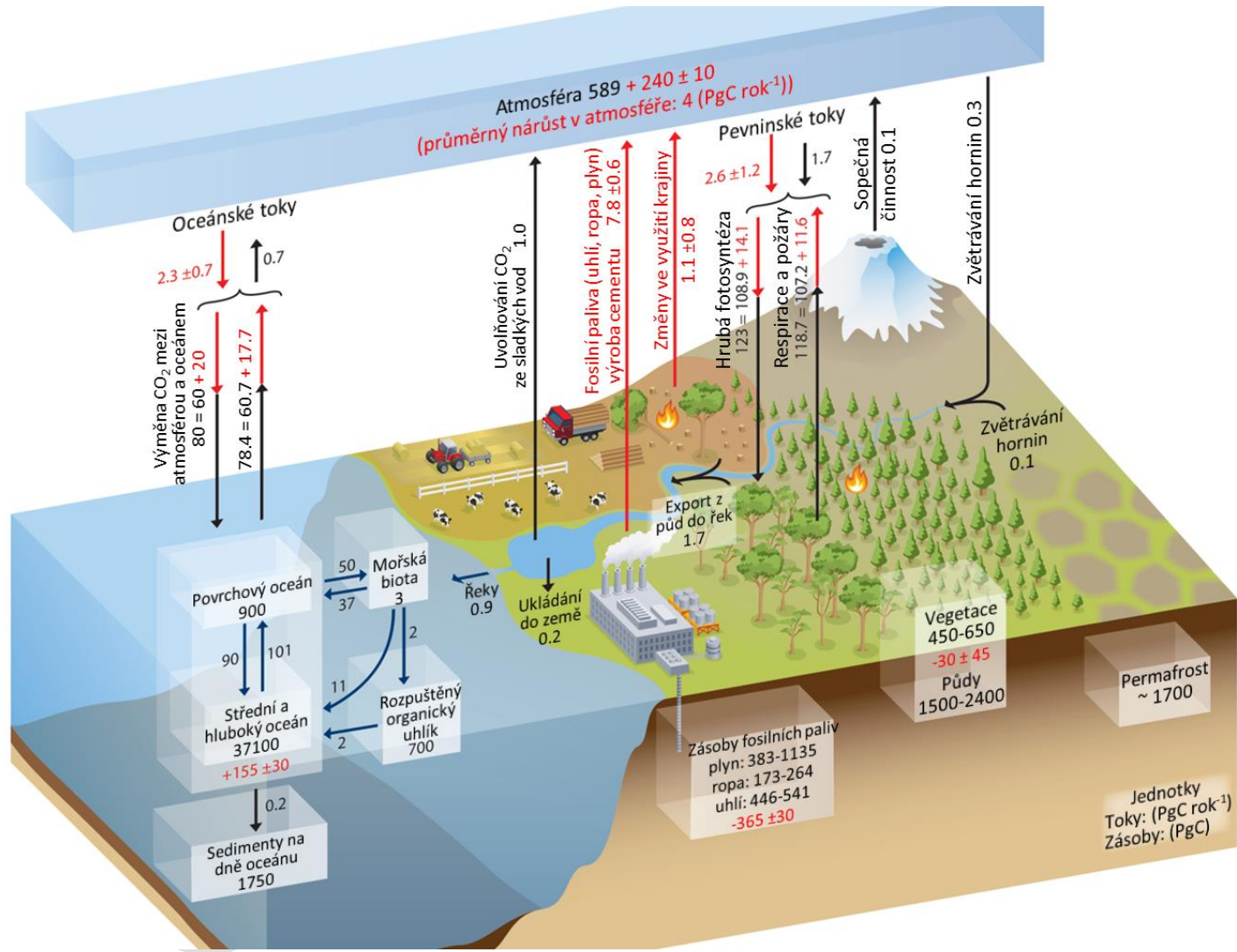
Výše uvedené zásobníky mohou být dále podrobněji děleny, jak ukazují obr. 4.2 a 4.3.



Obr. 4.1: Velikost základních zásobníků uhlíku vyjádřené v GigaTunách uhlíku (odpovídá jednotce PgC – petagramy uhlíku). Velikost krychlí neodpovídá skutečnému poměru.

## 4.2. Vztahy mezi zásobníky uhlíku

Obr. 4.2 reprezentuje zjednodušené schéma globálního cyklu uhlíku a obsahuje údaje o velikosti zásobníků i roční výměně v PgC. Schéma ukazuje jak stav před průmyslovou revolucí (černě značené údaje), tak změny související s činností člověka (červené údaje). Schéma opomíjí většinu horninového zásobníku s ohledem na jeho mimořádnou stabilitu a naopak zaznamenává řadu dílčích zásobníků, které jsme v předchozím textu zanedbali. V atmosféře je  $\text{CO}_2$  dominantní podobou uhlíku a jeho současná koncentrace je přibližně 390,5 ppm, což odpovídá 828 PgC. Mezi další stopové plyny patří



Autoři: Trnka M., Žalud Z., Hlavinka P, Bartošová L a kol.

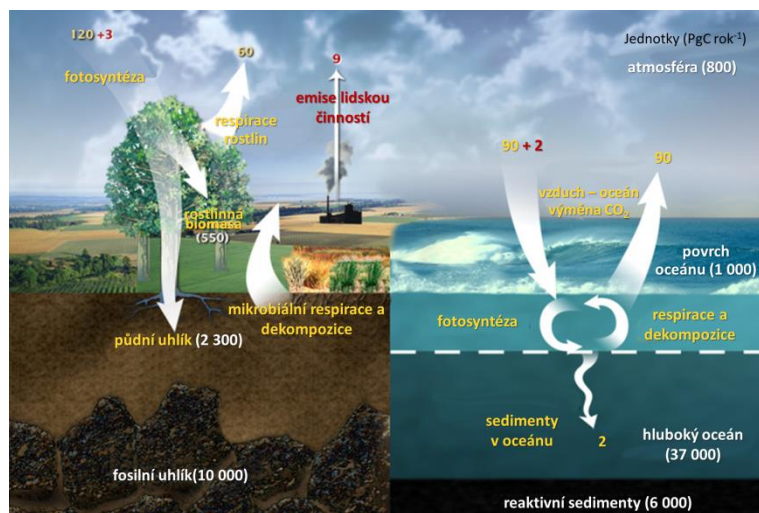
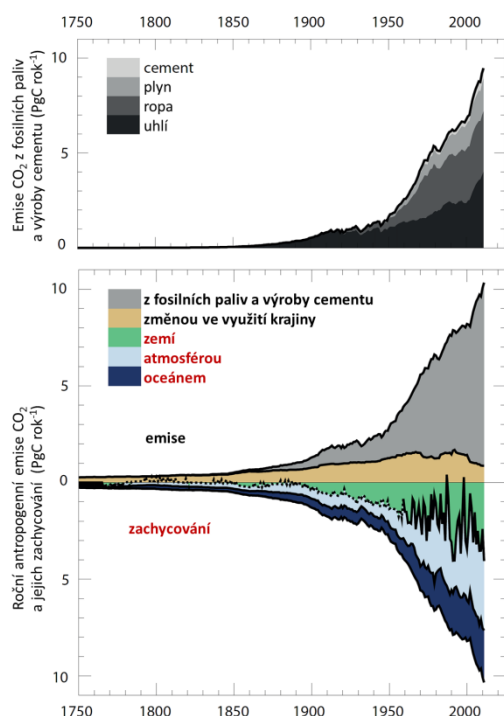
*Obr. 4.2: Zjednodušené schéma globálního cyklu uhlíku. Číselné údaje představují velikost zásobníku v PgC a objem roční výměny v PgC za rok. Černé čísla a šipky označují objem zásobníku a toky odhadované pro období kolem roku 1750. Červená čísla představují roční antropogenní tok v průměru za období 2000-2009. Zdroj: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_Chapter06\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf)*

CZECH ADAPTING

metan (s aktuální hmotností ~ 3,7 PgC), oxid uhelnatý (~ 0.2 PgC), a dále pak menší množství uhlovodíků a organických sloučenin. Na pevnině je uhlík obsažen v organických sloučeninách ve vegetaci (450-650 PgC) a v organické hmotě v půdách (1500-2400 PgC). Do tohoto zásobníku je třeba zahrnout i uhlík uložený v mokřadech (300 až 700 PgC) a trvale zmrzlé půdě (~ 1700 PgC). Každoročně odeberou rostliny z atmosféry ~123 ± 8 PgC a uhlík se pak stává součástí těl organismů. Z těl organismů může být oxid uhličitý uvolněn zpět do atmosféry skrze dýchání, rozklad těl, ale i další procesy (např. požáry). Protože k příjmu CO<sub>2</sub> fotosyntézou dochází pouze v průběhu vegetačního období, zatímco k uvolňování CO<sub>2</sub> dýcháním a rozkladnými procesy dochází téměř po celý rok, a protože se většina pevninské vegetace nachází na severní polokouli, existuje výrazná sezonalita toků uhlíku mezi atmosférou a vegetací. Zjednodušeně řečeno v období vegetační sezóny na severní polokouli převažuje globální příjem CO<sub>2</sub> biosférou nad jeho výdejem, zatímco v zimě dominuje uvolňování oxidu uhličitého. Proto má křivka měsíčních koncentrací tohoto plynu charakteristický "pilovitý" sezónní cyklus (obr. 4.4). Atmosférický CO<sub>2</sub> rovněž těsně interaguje s povrchovou vrstvou oceánu. Tato výměna je řízena rozdílem parciálního tlaku CO<sub>2</sub> mezi vzduchem a mořskou vodou. V oceánu se uhlík nachází převážně jako rozpuštěný anorganický uhlík (~ 38.000 Pg) v podobě kyseliny uhličitě a v podobě hydrogen-uhličitanových a uhličitanových iontů. Současně se v oceánu nachází cca 700 PgC v podobě organického uhlíku, který má dlouhou dobu obratu (cca 1000 let). Velmi nízké je pak množství obsažené v tělech živočichů a rostlin, převážně fytoplanktonu (~ 3 PgC), s dobou obratu pouhých několik týdnů.

### 4.3. Člověkem zaviněné perturbace uhlíkového cyklu

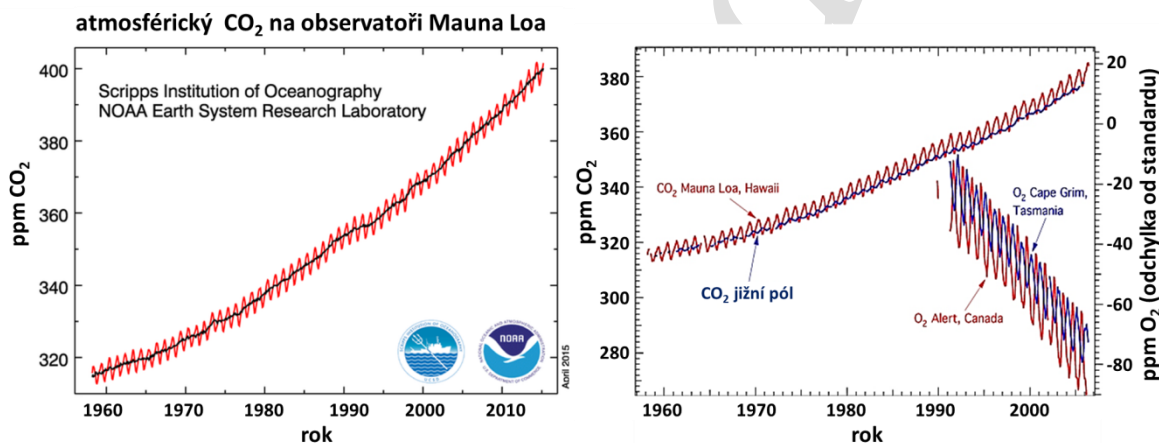
Před průmyslovou revolucí, která začala v roce 1750, se koncentrace atmosférického CO<sub>2</sub> pohybovaly mezi 180 ppm a 290 ppm, přičemž nejnižší tato koncentrace byla před 2,1 milióny lety. V letech 1750 až 2011 emitoval člověk do ovzduší skrze používání fosilních paliv a výrobu cementu cca 375 ± 30 PgC. Změna využívání půdy, zejména odlesňování a následná přeměna lesní půdy na půdu ornou a její degradace vedla k emisím dalších 180 ± 80 PgC. Z 555 ± 85 PgC antropogenního uhlíku vypuštěného do atmosféry v ní ale zůstala méně než polovina, tj. 240 ± 10 PgC. Zbývající část pohltily terestrické ekosystémy a oceán, jak je vidět na obr. 4.3. Obrázek 4.3 ukazuje na poměrně stabilní absorpční schopnost CO<sub>2</sub> oceány a naopak velkou variabilitu ve schopnosti fixovat uhlík v ekosystémech na pevnině. Na pevnině je totiž tempo akumulace uhlíku v biomase závislé i na dalších parametrech prostředí (např. úhrnu srážek či dostupnosti živin jako dusík či fosfor). Jak ukazuje souhrnná grafika v obr. 4.3, je evidentní, že zatímco antropogenní emise dosahují ročně cca 9 PgC (respektive tuto hodnotu v současnosti překračují), tak zvýšená absorpce oceány sníží množství uhlíku, které nakonec zůstává v atmosféře o 2 PgC ročně a pevnina o další 3 PgC.



IPCC, 2013 - WGI, kap. 6; obrázek vpravo převzat z <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/>

#### 4.4. Pozorované změny v uhlíkovém cyklu

Jednu ze zásadních studií zaměřenou na roli  $\text{CO}_2$  v klimatickém systému Země, a tedy propojení geobiochemických cyklů, uveřejnil v dubnu 1896 prof. Svante Arrhenius, který odhadoval, že zdvojnásobení koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře by vedlo ke zvýšení teploty o 4-6 °C. Nicméně tyto úvahy byly vedeny snahou najít vysvětlení pro střídání dob ledových a meziledových a na konci 19. století téměř nikdo nepovažoval za možné, aby takové zvýšení koncentrací způsobil svojí činností člověk. Od konce 19. století nicméně vzrostla koncentrace oxidu uhličitého o více než 100 ppm a tento trend dále pokračuje. Díky detailním měřením Charlese Keelinga započatým v Antarktidě na konci 50. let a pokračujících na observatoři Mauna Loa známe detailní průběh globálních koncentrací hlavního skleníkového plynu v posledních takřka 60 letech (obr. 4.4). Toto sledování doplňuje několik observatoří, které nezávisle na sobě po více 30 let potvrzují Keelingova měření (např. obr. 4.4). Nicméně nárůst koncentrace oxidu uhličitého není jedinou změnou, kterou pozorujeme v geobiochemických cyklech. Poměrně razantně stoupla i koncentrace dalšího významného radiačně aktivního plynu, tj. metanu a také oxidu dusného (kap. 6). Současně s nárůstem koncentrace  $\text{CO}_2$  klesá koncentrace  $\text{O}_2$  v atmosféře, a to dvojnásobným tempem (obr. 4.4), což dokazuje, že oxid uhličitý, jehož koncentrace v atmosféře stoupá, musí vznikat oxidací při kontaktu s atmosférickým kyslíkem. Na jednu vzniklou molekulu  $\text{CO}_2$  připadá 1 atom uhlíku a 2 atomy kyslíku.



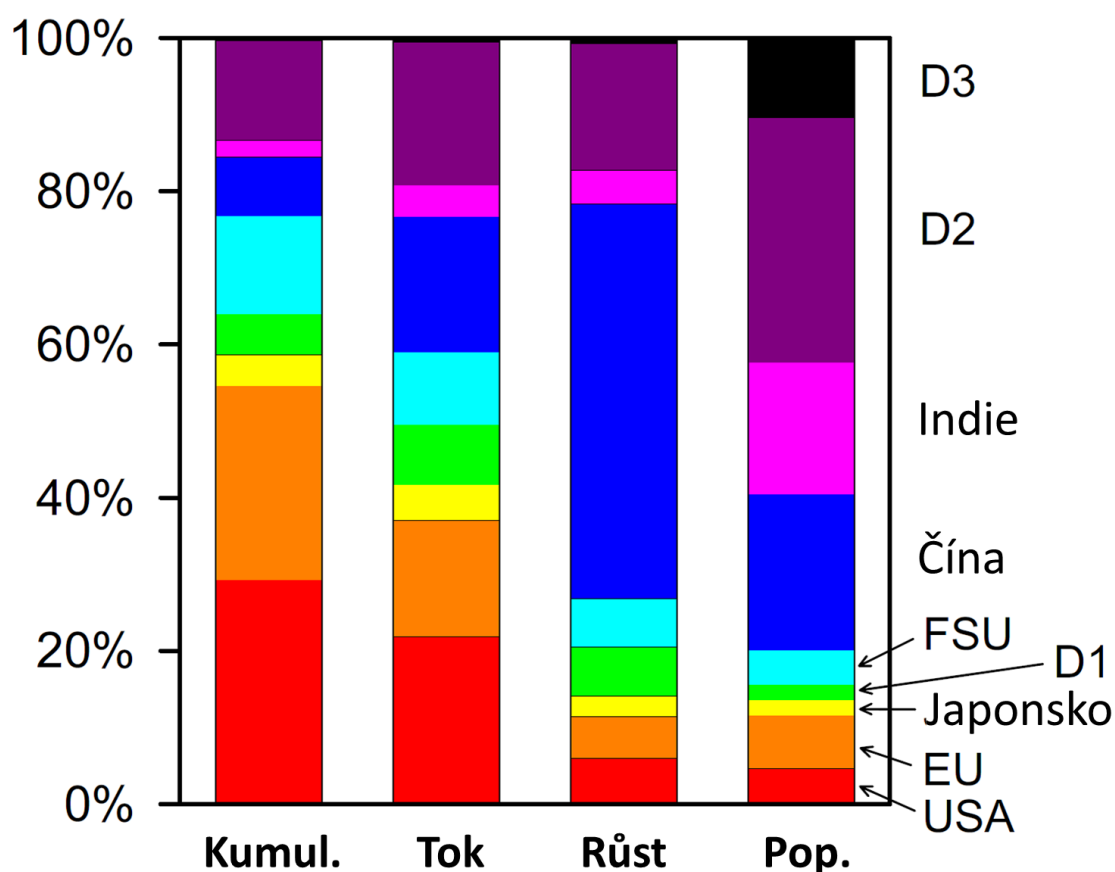
Obr. 4.4: Vlevo nárůst koncentrace  $\text{CO}_2$  zjišťovaná na observatoři Mauna Loa na Havajských ostrovech tzv. Keelingova křivka mezi léty 1958-2015 a vpravo tatáž křivka pro období 1958-2007 doplněná o měření koncentrace  $\text{CO}_2$  v blízkosti jižního pólu a o měření koncentrace kyslíku v Tasmánii a v Kanadě. (Zdroj: NOAA a Canadell, PNAS 2007)

#### 4.5. Podíl jednotlivých zemí na emisích uhlíku

Pokud je cílem environmentální a ekonomické politiky v budoucnu zastavit nárůst emisí  $\text{CO}_2$ , je nezbytné stanovit podíl jednotlivých emitentů na současném stavu. Sestavování statistik emisí radiačně aktivních plynů je jednou z povinností každého členského státu mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC), a tak lze poměrně přesně určit státy, které největší měrou přispívají k nárůstu emisí. Nicméně celkový pohled na emise a emitenty je komplikovaný a umožňuje několik interpretací. Platí, že deset celosvětově největších emitentů  $\text{CO}_2$  je společně zodpovědných za cca 65 % celkových emisí. V současné době jsou vedoucími emitenty Čína a USA s cca 2/5 celosvětové „produkce“  $\text{CO}_2$ . Je jasné, že bez přispění právě těchto dvou států není možné trend nárůstu emisí  $\text{CO}_2$  zvrátit. Z hlediska korektnosti však není úplně správné srovnávat státy z hlediska jejich absolutních emisí. Větší

vypovídající hodnotu má informace o měrných emisích. Těmi se rozumí poměrový ukazatel vztahující absolutní hodnotu emisí CO<sub>2</sub> na jednoho obyvatele či jednotku HDP. Pořadí států podle tzv. měrných emisí na obyvatele se liší, s USA, Austrálií a Kanadou jako největšími emitenty. Komplikovanost celé problematiky dokládá obr. 4.5, který ukazuje i třetí možný úhel pohledu, a tím je „historický“ či kumulovaný podíl na celkových emisích radiačně aktivních plynů. Podle tohoto ukazatele jsou státy jako Čína či Indie relativně minoritními podílíky.

Velmi zajímavá je v tomto směru pozice EU, která se profiluje svojí snahou o formování zodpovědného celosvětového postoje k problematice snižování skleníkových plynů. I díky politice EU podíl emisí vyprodukovaných na jejím území klesá, resp. zůstává konstantní. Tedy veškeré snahy Evropské unie bez celosvětové podpory (zejména pak největších emitentů typu USA, Číny a Indie), nemají potenciál zvrátit celosvětový trend nárůstu emisí skleníkových plynů. Převedeme-li politické cíle EU do globálních souvislostí, zjistíme, že při splnění závazku o EU redukovat emise do roku 2020 o 20 – 30 % přispěje EU k absolutnímu snížení celosvětových emisí v řádu 3 – 4 %.

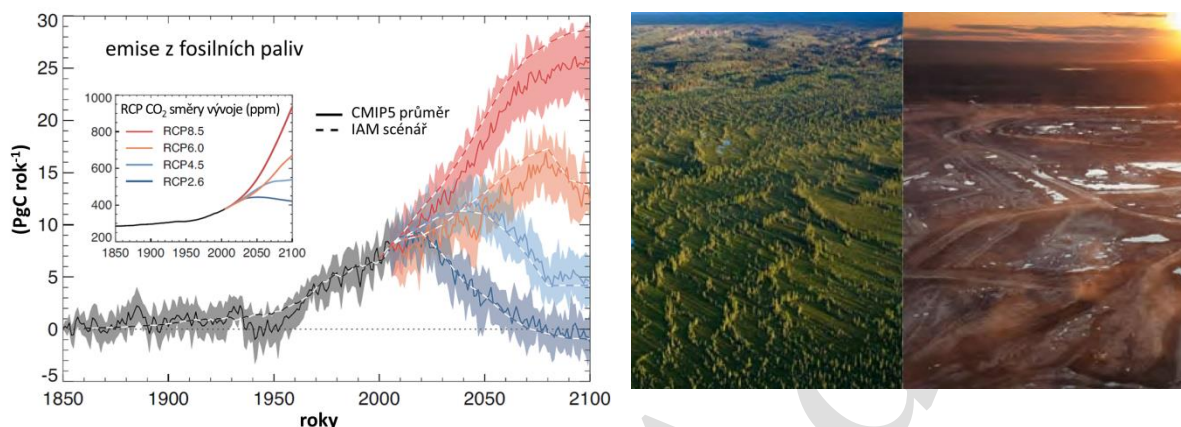


Obr. 4.5: Relativní příspěvky devíti skupin států ke globálním emisím v období (1751-2004) vlevo, ke globálním emisím v roce 2004, ke zvyšování globálních emisí (5-letý průměr z let 2000-2004), a velikost populace (2004) – Podle Raupacha et al., PNAS (2007). Pozn. D1 – nejvyspělejší státy s výjimkou EU, USA a Japonska; FSU – země bývalého Sovětského svazu s výjimkou pobaltských stát; D2 – rozvíjející se země; D3 – nejméně rozvinuté země.



#### 4.6. Odhadované emise z fosilních paliv

Jak dokládá obr. 4.6 a také 4.2, byla doposud člověkem využita menší část rezerv fosilních paliv, které se nachází na Zemi. Prozatím byla využívána zejména ta nejdostupnější podoba fosilních paliv v podobě vysoce vydatných polí resp. ložisek. Nicméně současný rozmach těžby břidlicového plynu v USA nebo těžby bitumenových písků v Kanadě ukazuje, že při odpovídající ceně za surovinu lze očekávat i využívání těchto méně vydatných nalezišť, které ovšem výrazným způsobem zvyšují produkci skleníkových plynů. Rovněž efektivita získávání energetických surovin je nižší



s dramatickými dopady na životní prostředí. Celosvětové zásoby fosilních paliv jsou více než dostatečné, aby v horizontu několika dekád umožnily zvýšení emisí skleníkových plynů na více než 3-násobek (obr. 4.6). Takové zvýšení by pochopitelně přineslo odpovídající reakci klimatického systému, jak si ukážeme v dalších kapitolách.

*Obr. 4.6: Vlevo vývoj emisí v období 1850-2000 na základě inventarizace emisí a odhad vývoje podle 4 scénářů RCP v závislosti na využívaných zdrojích energie a celkovém směřování ekonomického vývoje společnosti (zdroj IPCC, 2013, kap. 6, WG I). Vpravo ukázka dopadů těžby tzv. bitumenových písků v kanadské provincii Alberta v okolí Peace river (<https://ajanakir.wordpress.com/2012/01/>).*

#### Použitá literatura:

Canadell J.G. et al. (2007): Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, PNAS, , vol. 104 no. 47 18866–18870, doi: 10.1073/pnas.0702737104

IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Raupach, M. et al. (2007): Global and regional drivers of accelerating CO<sub>2</sub> emissions, PNAS 2007 104 (24) 10288-10293; doi:10.1073/pnas.0700609104