

Co to vlastně je geologické ukládání CO₂?

**Zodpovědné využívání
fosilních paliv**

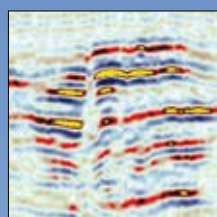
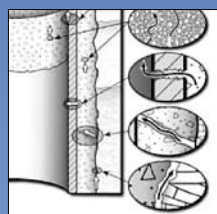
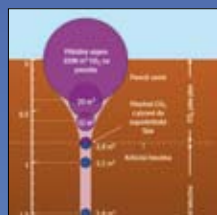
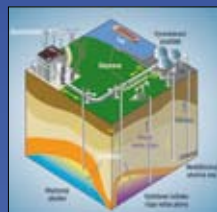
**Odstranění hlavního zdroje
skleníkových plynů**

**Vrácení uhlíku
zpět do podzemí**

**Poskytnutí času potřebného
pro rozvoj energetických zdrojů
neohrožujících klima**



CO₂GeoNet Evropská síť excellence



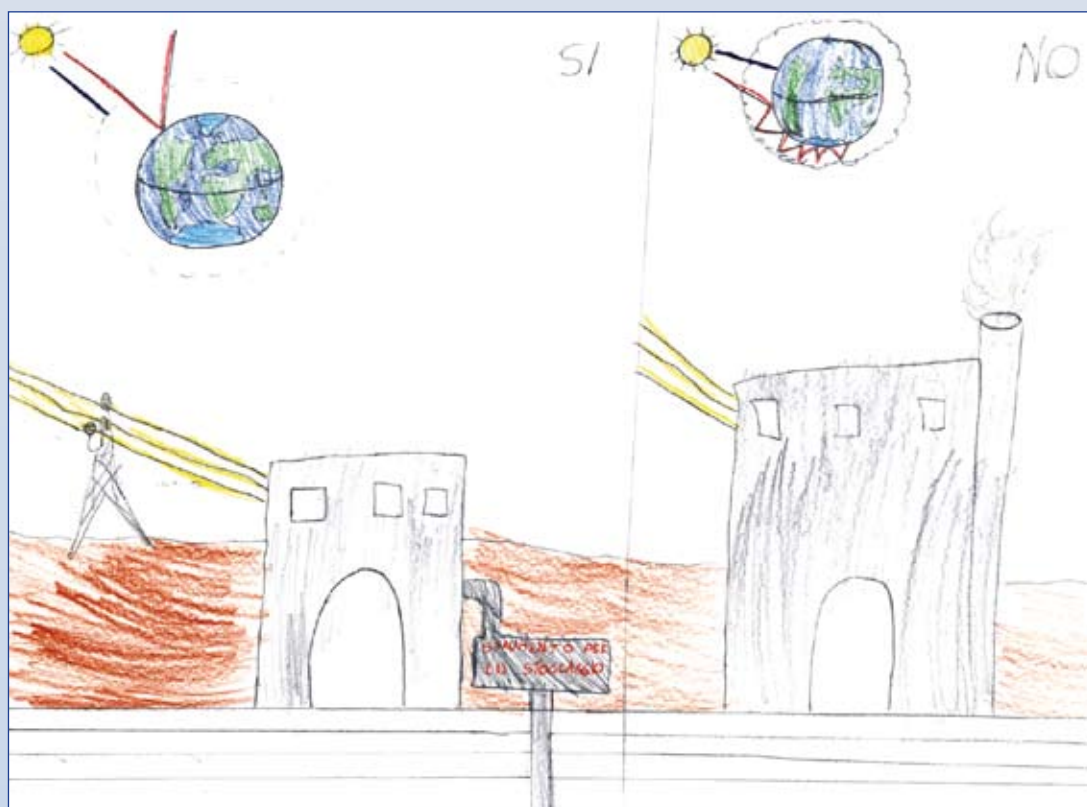
Změna klimatu a potřeba geologického ukládání CO₂	4
1. Kolik CO₂ můžeme v podzemí uložit a kam?	6
2. Jak můžeme přepravovat a ukládat velká množství CO₂?	8
3. Co se stane s CO₂ po uložení do podzemního rezervoáru?	10
4. Mohl by CO₂ uniknout z úložiště, a pokud ano, jaké by byly důsledky?	12
5. Jak můžeme monitorovat úložiště v hloubce a na povrchu?	14
6. Jaká bezpečnostní kritéria je třeba zavést a dodržovat?	16
Glosář	18
Co je CO₂GeoNet?	19

Tato brožura byla vytvořena díky příspěvkům těchto autorů:
Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine,
Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts,
Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavadias.

Český překlad: Vít Hladík, Vladimír Kolečka. Redaktor: Petr Maděra. Sazba: Oleg Man.

Vize budoucnosti

**Už žádné kouřící komíny
Potrubí odvede CO₂ a uloží ho do podzemí
To je dobré pro naši Zemi**



© Sapienza URS

Massimo, 10 let, Řím – Itálie

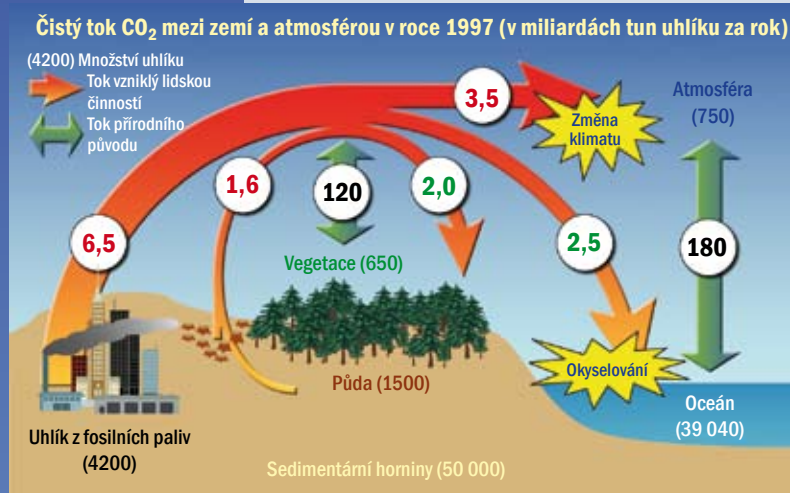
**Pro naše děti
má geologické ukládání CO₂ smysl**

Změna klimatu a potřeba geologického ukládání CO₂

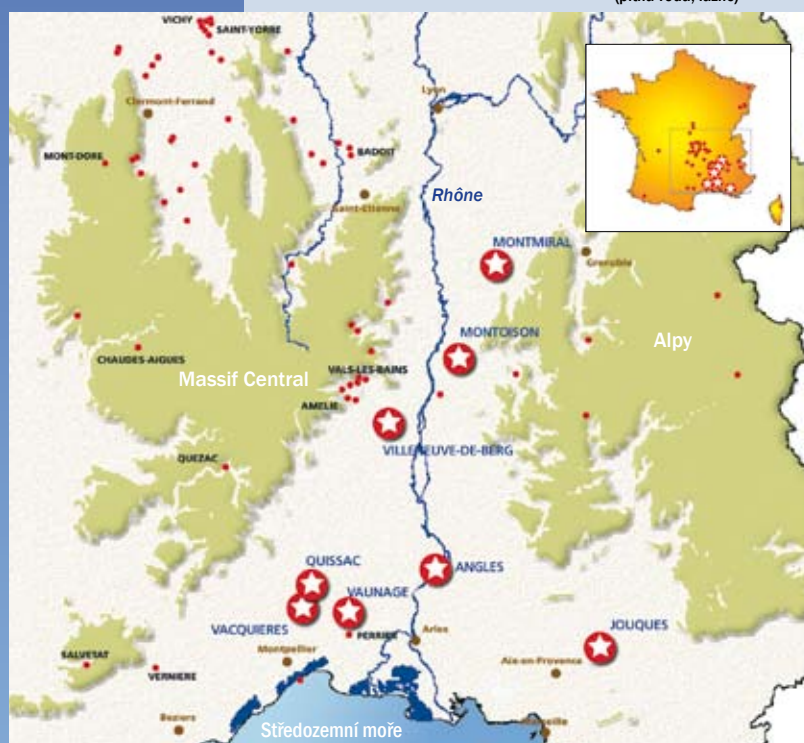
Obrázek 1
Celosvětové emise CO₂ spojené s lidskou aktivitou činí 30 miliard tun (Gt) za rok, což odpovídá 8,1 Gt uhlíku: 6,5 Gt ze spalování fosilních paliv a 1,6 Gt z odlesňování a zemědělských činností.

Lidstvo vypouští do atmosféry nadměrné množství CO₂

Podle dnes široce akceptovaného názoru narušují lidské aktivity oběh uhlíku na naší planetě. Do začátku průmyslové revoluce a ještě zhruba 10 000 let předtím byl tento jemně vyvážený cyklus, zahrnující přirozenou výměnu uhlíku mezi geosférou, biosférou, oceány a atmosférou, ustálený na nízkých koncentracích CO₂



Obrázek 2
Francouzská oblast se zvýšeným výskytem CO₂.



v atmosféře (kolem 280 ppm, tj. 0,028 %). Za posledních 250 let se však množství CO₂ vypouštěného do atmosféry nepřetržitě zvyšovalo, a to díky našemu rostoucímu spalování fosilních paliv (uhlí, ropy a plynu) za účelem výroby elektřiny, tepla a pro potřeby průmyslu a dopravy (**obr. 1**). Asi polovina tohoto nadbytku byla absorbována vegetací a rozpustila se v oceánech, kde způsobuje jejich okyselení a s ním spojené případné negativní účinky na rostliny a živočichy. Zbytek se nahromadil v atmosféře, kde přispívá ke změně klimatu. CO₂ je skleníkový plyn, který zadržuje část slunečního záření, čímž způsobuje ohřívání zemského povrchu. K zastavení dalšího růstu koncentrace CO₂ v atmosféře (dnešních 387 ppm už představuje 38% nárůst oproti úrovní před průmyslovou revolucí) nad kritickou hodnotu 450 ppm v příštích desetiletích je třeba okamžité radikální akce. Experti z celého světa se shodují, že za touto hranicí už není možné odvrátit nejdrastičtější následky.

Vrátit uhlík zpět do země

Náš svět je silně závislý na fosilních palivech už od začátku průmyslové éry v 50. letech 18. století. Není proto překvapivé, že přerod naší společnosti na společnost založenou na zdrojích energie neohrožujících klima bude vyžadovat čas i peníze. To, co potřebujeme, je krátkodobé řešení, které nám v první fázi pomůže omezit naši závislost na fosilních palivech tím, že je budeme moci používat neznečišťujícím způsobem. To nám poskytne čas potřebný pro vývoj technologií a infrastruktury pro budoucnost založenou na obnovitelných zdrojích energie. Jednou z takových možností je vytvořit v systému výroby energie uzavřenou smyčku, kdy se uhlík původně vytěžený ze země ve formě plynu, ropy a uhlí vrátí zase zpět ve formě CO₂. Je zajímavé, že podzemní ukládání CO₂ není lidským vynálezem, ale že jde o zcela přírodní a široce rozšířený jev, jak dokazují přirozená ložiska CO₂, která v přírodě existují po tisíce a miliony let. Příkladem je skupina osmi přirozených ložisek CO₂ v jihovýchodní Francii, která byla objevena při ropném průzkumu v 60. letech 20. století (**obr. 2**). Tyto přírodní lokality i mnoho dalších po celém světě dokazují, že geologické formace jsou schopny účinně a bezpečně zadržovat CO₂ po extrémně dlouhá časová období.

Zachytávání a ukládání CO₂: slibná cesta ke zmírnění změny klimatu

Ve škále opatření, která je třeba co nejdříve přijmout v zájmu zmírnění změny klimatu a okyselení oceánů,

může zachytávání a ukládání CO₂ (CCS*) sehrát rozhodující roli; může totiž přispět až 33 % k omezení emisí CO₂, jehož je nutno dosáhnout do roku 2050. CCS zahrnuje zachytávání CO₂ v tepelných elektrárnách, které spalují uhlí nebo zemní plyn, a v průmyslových závodech, jako jsou ocelárny, cementárny nebo rafinerie; dále dopravu zachyceného CO₂ potrubím nebo lodí na místo uložení a poté jeho injektování pomocí vrtu* do vhodné geologické formace za účelem dlouhodobého uložení (**obr. 3**). S ohledem na rostoucí světovou populaci a stoupající poptávku po energii v rozvojových zemích, jakož i na současný nedostatek „čistých“ alternativních zdrojů energie s velkým výkonem je pokračující využívání fosilních paliv v krátkodobém horizontu nevyhnutelné. S využitím CCS však lidstvo může ještě nějaký čas tímto způsobem pokračovat, aniž by došlo k fatálnímu ohrožení životního prostředí na planetě. CCS umožní překlenout toto období transformace do doby, než bude světová ekonomika schopna fungovat na bázi udržitelné výroby energie.

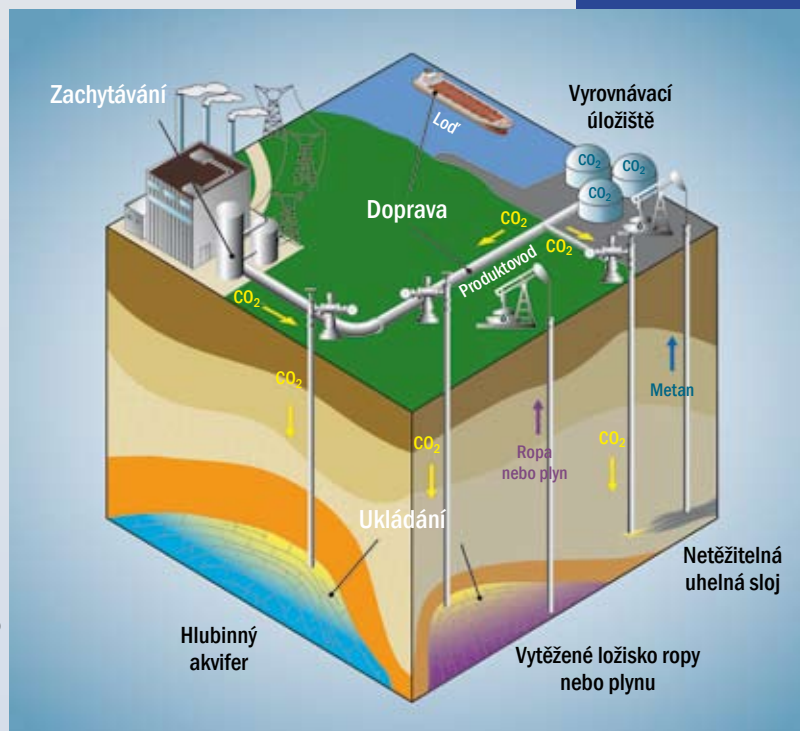
CCS se úspěšně rozvíjí po celém světě

Od 90. let 20. století běží v Evropě, USA, Kanadě, Austrálii a Japonsku velké výzkumné programy zaměřené na CCS. Mnoho znalostí už bylo také získáno v rámci prvních světových demonstračních projektů velkého měřítka, kde se CO₂ ukládá hluboko do země už několik let: Sleipner v Norsku (asi 1 Mt/rok od r. 1996; **obr. 4**), Weyburn v Kanadě (asi 1,8 Mt/rok od r. 2000) a In Salah v Alžírsku (asi 1 Mt/rok od r. 2004). Mezinárodní spolupráce v oboru geologického ukládání CO₂ na těchto i dalších úložiscích, podporovaná organizacemi jako IEA-GHG* a CSLF*, je obzvláště důležitá pro rozšíření našich znalostí a rozvoj světové vědecké komunity zaměřené na tuto problematiku. Vynikajícím příkladem je Zvláštní zpráva IPCC* o zachytávání a ukládání CO₂ (2005), která popisuje současný stav znalostí a překážky, jež je nutno překonat, aby bylo možno tuto technologii uplatnit v širokém měřítku. Pevná technologická základna už existuje a svět nyní sebevědomě směřuje do demonstrační fáze CCS. Vedle technologického vývoje se dnes vytvářejí příslušné legislativní, regulatorní, ekonomické a politické rámce a posuzuje se sociální vnímání a podpora. V Evropě je cílem mít v roce 2015 v provozu až 12 velkých demonstračních projektů, což má umožnit rozsáhlé komerční nasazení technologie v roce 2020. V této souvislosti vydala Evropská komise v lednu 2008 „Balíček opatření týkajících se změny klimatu a energie z obnovitelných zdrojů“, který mimo jiné zahrnuje i Směrnici o geologickém ukládání CO₂ a další opatření na podporu rozvoje a bezpečného využívání CCS.

Klíčové otázky ke geologickému ukládání CO₂

Síť excelence CO₂GeoNet byla vytvořena pod patronací Evropské komise jako skupina výzkumných institucí,

© BRMG im@gé



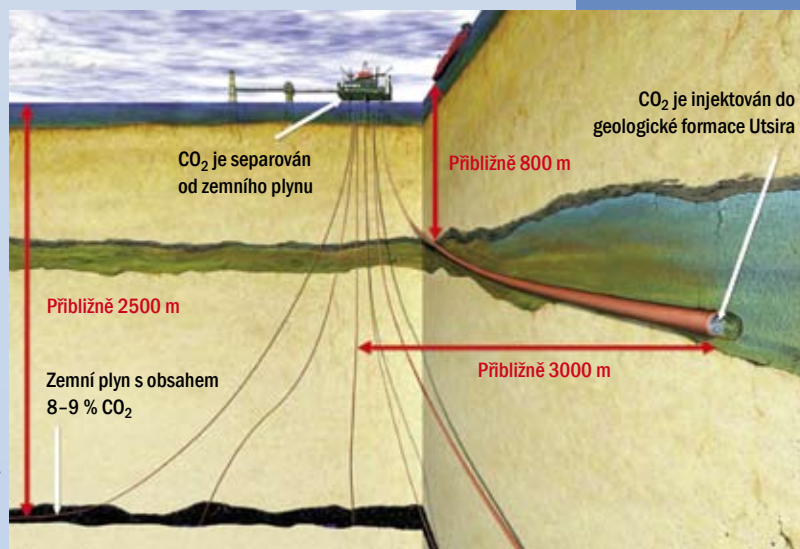
Obrázek 3
V elektrárnách se CO₂ zachytává pomocí separace od ostatních plynů. Poté je stlačen a dopraven potrubím nebo lodí na místo geologického uložení: v hlubinném slaném akviferu, vyčerpáném ložisku ropy nebo plynu, popř. v netěžitelných uhelných slojích.

kteřá má udržet Evropu v čele rozsáhlého mezinárodního výzkumu. Jedním z cílů CO₂GeoNet je sdělování jasných, vědecky podložených informací o technické stránce geologického ukládání CO₂. Pro povzbuzení dialogu o základních aspektech této životně důležité technologie připravili vědci z CO₂GeoNet základní odpovědi na několik často kladených otázek. Na následujících stránkách najdete vysvětlení na téma, jak se geologické ukládání CO₂ dá provádět, za jakých podmínek je možné a jaká jsou kritéria pro jeho bezpečné a účinné provozování.

Obrázek 4

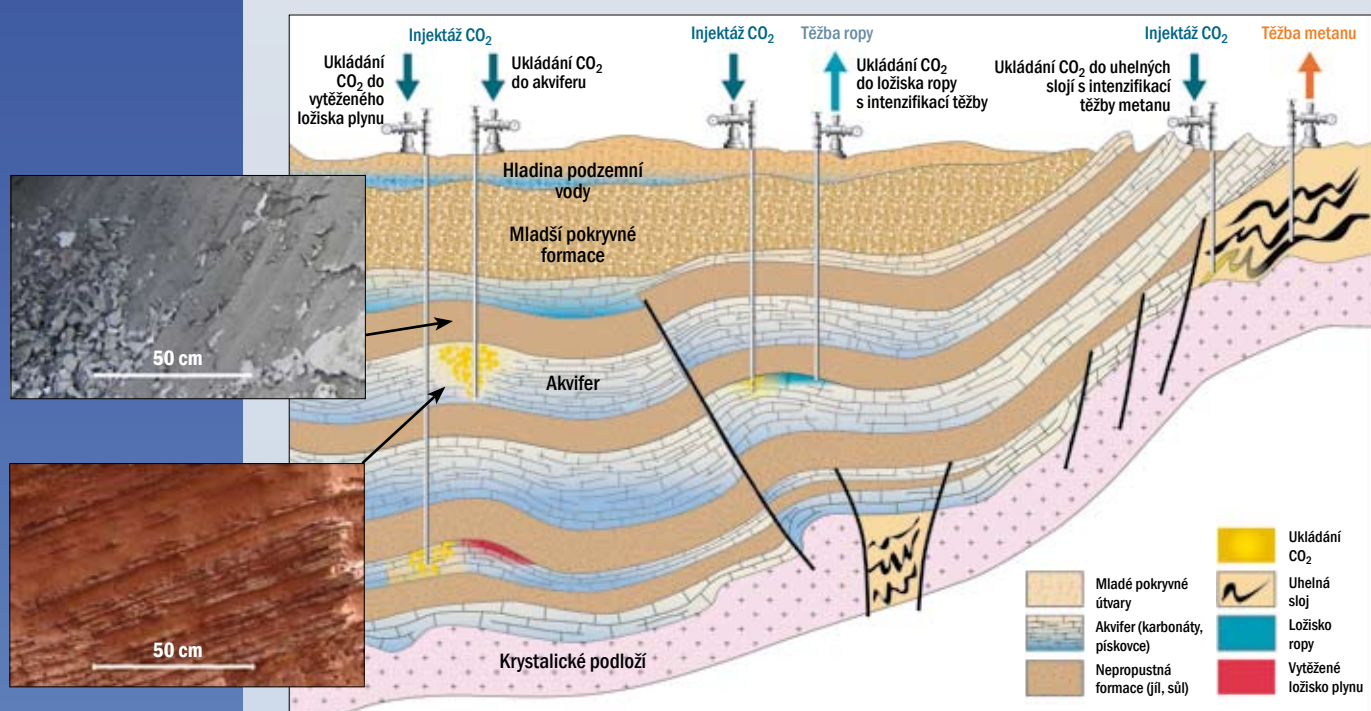
Vertikální řez úložištěm Sleipner, Norsko. Zemní plyn je těžen z hloubky 2500 m; obsahuje několik procent CO₂, který se musí odstranit, aby plyn vyhovoval komerčním standardům. Namísto vypouštění do atmosféry se zachycený CO₂ injektuje do pískovcového akviferu* Utsira v hloubce přibližně 1000 m.

© StatoilHydro



Kolik CO₂ můžeme v podzemí uložit a kam?

CO₂ nemůže být injektován kamkoli do podzemí, vhodné formace hostitelských hornin je nejprve zapotřebí identifikovat. Potenciální rezervoáry* pro geologické ukládání CO₂ existují po celém světě a skýtají dostatečnou kapacitu pro to, aby metoda CCS mohla významně přispět ke zmírnění změny klimatu vyvolané lidstvem.



Obrázek 1
CO₂ je ukládán do hlubokých geologických vrstev porézních a propustných hornin (viz pískovec v dolním rámečku), které jsou překryté nepropustnými horninami (viz jílovec v horním rámečku) bránícími CO₂ v úniku k povrchu. Hlavní typy potenciálních úložišť jsou:

1. vytěžená ložiska ropy nebo plynu, v některých případech s možností druhotné intenzifikace těžby;
2. akvifery obsahující vodu nevhodnou pro využití obyvatelstvem;
3. hluboké netěžitelné uhlé slaje, někde s možností intenzifikace těžby metanu.

Existují tři hlavní možnosti ukládání CO₂ (obr. 1):

1. Vytěžená ložiska ropy a zemního plynu – díky průzkumu a těžbě uhlovodíků jsou dostatečně prozkoumána, poskytují okamžitou možnost ukládání CO₂.
2. Slané akvifery – skýtají velký úložný potenciál, ale obecně s nižší úrovní poznání.
3. Netěžitelné uhlé slaje – možnost pro budoucnost, jakmile se podaří vyřešit problém s injektáží velkých objemů CO₂ do uhlékových slojí s nízkou permeabilitou*.

Rezervoáry

Poté, co je CO₂ injektován do vhodného podzemního rezervoáru, akumuluje se v pórech mezi horninovými zrny a v trhlinách, přičemž odtud vytlačuje a nahrazuje přítomná fluida – vodu, ropu nebo zemní plyn. Vhodné hostitelské horniny pro CO₂ by proto měly mít vysokou póroznost* a permeabilitu. Takovéto horninové formace jsou výsledkem ukládání sedimentů v geologické minulosti a běžně se nacházejí v tzv. „sedimentárních pánvích“. V některých místech se tyto propustné formace střídají s nepropustnými horninami, které mohou půso-

bit jako nepropustné těsnění. V sedimentárních pánvích se často vyskytují ložiska ropy a zemního plynu, ale i ložiska přírodního CO₂, která pomocí přírodních mechanismů zadržovala ropu, plyn nebo dokonce čistý CO₂ po miliony let. To dokládá schopnost takovýchto struktur zadržovat fluida po dlouhá časová období.

Na obrázcích ilustrujících potenciální možnosti ukládání CO₂ je podpovrchová stavba často znázorňována příliš zjednodušeně, v podobě homogenních, koláčově vrstevnatých struktur. Ve skutečnosti však podloží sestává z nerovnoměrně rozložených horninových formací, rezervoárů a těsnících hornin*, postižených místními zlomy, které dohromady tvoří komplexní, heterogenní struktury. K tomu, aby se dala zodpovědně posoudit vhodnost geologické struktury navrhované pro případné dlouhodobé úložiště CO₂, je třeba podrobných znalostí o dané lokalitě a geologických zkušenostech.

Potenciální úložiště CO₂ musí splňovat řadu kritérií, z nichž nejdůležitějšími jsou:

- dostatečná póroznost, permeabilita a úložná kapacita;
- přítomnost nadložní nepropustné horniny – tzv. "těsnících horniny" (např. jíla, jílovec, slínovec, sůl), která zabrání CO₂ v migraci směrem k povrchu;

- existence tzv. "strukturních pastí" – jevů, jako je např. klenbovitá stavba těsnící horniny, které mohou řídit a usměrňovat rozsah migrace CO₂ v úložné formaci;
- uložení v hloubce přes 800 m, kde je dostatečně vysoký tlak a teplota pro zajištění ukládání CO₂ ve stlačeném tekutém skupenství, čímž se zajistí maximalizace jeho uloženého množství;
- nepřítomnost pitné vody; CO₂ se nebude injektovat do vod určených pro spotřebu a jiné využití obyvatelstvem.

Kde v Evropě hledat úložiště

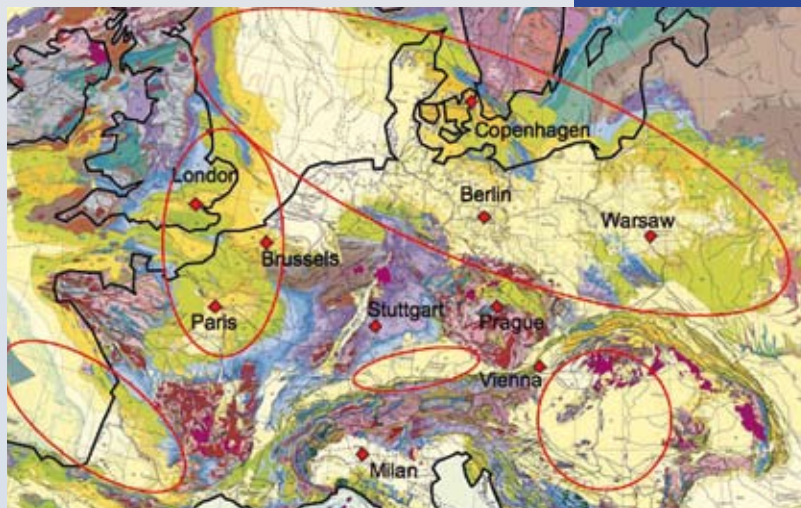
Sedimentární pánve jsou v Evropě velmi rozšířené, např. pod mořským dnem v Severním moři nebo na pevnině kolem horského hřebene Alp (**obr. 2**). Mnoho formací v evropských pánvích splňuje kritéria pro geologické ukládání CO₂, a vědci je nyní mapují a zkoumají. Jiné oblasti Evropy jsou tvořeny prastarou zpevněnou zemskou kůrou, jako např. většina Skandinávie, a nemají horniny vhodné pro geologické ukládání.

Příkladem oblasti se značným potenciálem pro ukládání je tzv. „jižní permská pánev“, která se rozprostírá od Anglie až po Polsko (největší elipsa na obr. 2). Sedimenty byly postiženy horotvornými procesy, které zanechaly část pórů vyplněných slanou vodou, ropou nebo zemním plynem. Jílové vrstvy, které leží mezi porézními pískovci, byly stlačeny na polohy s nízkou propustností, které zabraňují výstupu fluid. Velká část pískovcových formací leží v hloubce 1 až 4 km, kde je dostatečný tlak, který umožňuje uložení CO₂ v tekutém skupenství s vysokou hustotou. Obsah soli ve formačních vodách roste v tomto hloubkovém intervalu ze zhruba 100 g/l na 400 g/l; voda je tedy mnohem slanější než mořská (35 g/l). Horotvorné pohyby v pánvi způsobily plastické deformace poloh soli kamenné, které vytvořily stovky domových struktur postupně zadržujících zemní plyn. Právě tyto „pasti“ jsou předmětem studia jako případná úložiště CO₂ pro pilotní projekty.

Úložná kapacita

Znalost úložné kapacity pro CO₂ je důležitá pro politiky, regulační orgány a provozovatele úložišť. Odhady úložných kapacit jsou obvykle pouze přibližné a založené na prostorovém rozsahu potenciálně vhodných formací. Kapacitu lze posuzovat v různých měřítkách, od celostátního pro hrubé odhady přes pánevní až po úroveň vlastního rezervoáru pro přesnější výpočty, které berou v úvahu heterogenitu a komplexnost skutečné geologické struktury.

Objemová kapacita: Publikované národní úložné kapacity jsou obecně založeny na výpočtech pórového objemu dané formace. Teoreticky lze úložnou kapacitu dané formace vypočítat vynásobením její rozlohy její mocností, průměrnou pórozitou a průměrnou hustotou CO₂ za rezervoárových podmínek. Protože je však pórový prostor už zaplněn vodou, pro



© BGR

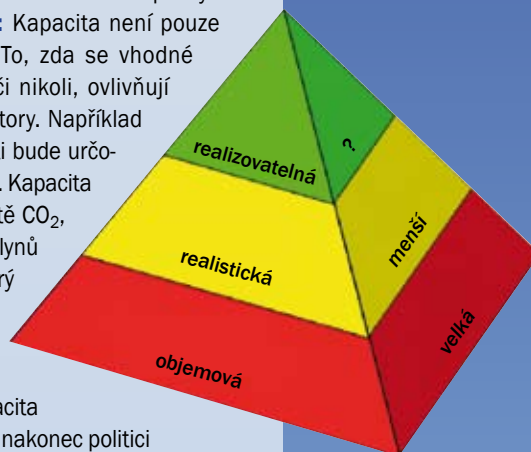
uložení CO₂ lze využít pouze jeho malou část, která se obecně pohybuje v rozmezí 1–3 %. Tento koeficient úložné kapacity se pak použije při posuzování objemové kapacity.

Realistická kapacita: Realističtější odhady kapacity se pro jednotlivá úložiště provádějí pomocí detailního průzkumu. Mocnost formace není konstantní a vlastnosti rezervoáru se mohou měnit i na krátkou vzdálenost. Znalosti o velikosti, tvaru a geologických vlastnostech struktury nám umožňují snížit míru nejistoty při výpočtu objemu. Na základě těchto informací může pak být využito počítačových simulací k předpovědím průběhu injektáže CO₂ a jeho pohybu v rezervoáru a tím i k odhadu realistické úložné kapacity.

Realizovatelná kapacita: Kapacita není pouze záležitostí fyziky hornin. To, zda se vhodné úložiště opravdu využije či nikoli, ovlivňují také socioekonomické faktory. Například doprava od zdroje k úložišti bude určována transportními náklady. Kapacita bude také záviset na čistotě CO₂, protože přítomnost jiných plynů omezí objem úložiště, který bude k dispozici pro CO₂. Poslední slovo při rozhodování o tom, zda bude dostupná úložná kapacita opravdu využita, budou mít nakonec politici a veřejnost, jejíž souhlas je rozhodující.

Závěrem můžeme konstatovat, že máme vědomosti o tom, že kapacita pro ukládání CO₂ v Evropě je značná, a to i při uvážení nejistot ohledně komplexnosti a heterogenity rezervoárů i socioekonomických faktorů. Projekt EU GESTCO* dospěl k odhadu úložné kapacity pro CO₂ v ložiskách ropy a plynu v Severním moři a přilehlých oblastech na úrovni 37 Gt, což by umožnilo provoz velkých zařízení na ukládání CO₂ v této oblasti po dobu několika desetiletí. Aktualizace a další mapování úložných kapacit v Evropě je předmětem probíhajícího výzkumu v jednotlivých členských zemích EU; na celoevropské úrovni se této problematice věnoval nedávno dokončený projekt EU GeoCapacity*.

Obrázek 2
Geologická mapa Evropy ukazující rozmístění hlavních sedimentárních pánví (červené elipsy), kde lze najít vhodné rezervoáry pro ukládání CO₂ (podklad – Geologická mapa Evropy v měřítku 1 : 5 000 000).



Jak můžeme přepravovat a ukládat velká množství CO₂?

Po zachycení v průmyslovém zařízení je CO₂ stlačen, přepraven a pak injektován do úložné formace pomocí jednoho nebo více vrtů. Celý řetězec musí být optimalizován, aby umožnil uložení několika milionů tun CO₂ ročně.

Stlačení

CO₂ je stlačen do podoby husté tekutiny, která zabírá výrazně méně objemu než CO₂ v plynném skupenství. Jakmile je CO₂ v elektrárně nebo jiném průmyslovém zařízení separován ze spalín, výsledný vysoce koncentrovaný tok CO₂ je dehydrován a stlačen, což zlepšuje efektivitu dopravy a ukládání (**obr. 1**). Dehydratace (odstranění vody) je potřeba, aby se předešlo korozi zařízení a infrastruktury a také, za vysokých tlaků, vytváření hydrátů (pevných krystalů podobných ledu, které mohou zařízení a potrubí ucpat). Stlačení se provádí společně s dehydratací v několikastupňovém procesu: opakovanými cykly stlačení, ochlazení a odstranění vody. Tlak, teplotu a obsah vody je třeba přizpůsobit způsobu dopravy a tlakovým požadavkům v místě ukládání. Klíčovými parametry pro projekt instalace kompresorů jsou rychlost proudění plynu, sací a výtlačný tlak, tepelná kapacita plynu a účinnost kompresoru. Technologie stlačování je dostupná a široce využívána v mnoha průmyslových odvětvích.

Doprava

CO₂ může být dopravován lodí nebo produktovodem. Doprava lodí je dnes využívána pouze ve velmi malých měřítkách (10 000–15 000 m³) pro průmyslové účely,

ale může se stát atraktivní možností v budoucích projektech CCS, jestliže budou zdroje CO₂ blízko pobřeží a daleko od vhodných úložišť. Pro přepravu CO₂ jsou vhodné lodě, jež jsou dnes využívány pro dopravu zkapalněného plynu (LPG nebo LNG). Zvláště to platí pro jejich chladicí systémy, zajišťující zároveň ochlazování i stlačování; CO₂ je tak možno dopravovat v kapalném stavu. Nejnovější lodě pro LPG mají objem až 200 000 m³ a jsou schopny přepravit 230 000 t CO₂. Lodní doprava však nezajistí nepřetržitý logistický tok, a v přístavech proto bude třeba vybudovat zařízení pro přechodné skladování a překládku CO₂.

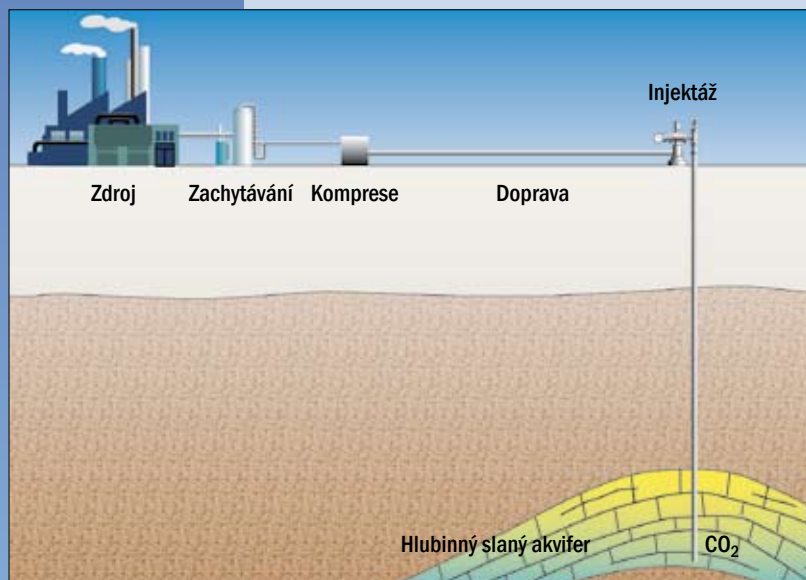
Potrubím dnes dopravují CO₂ ve velkém množství ropné společnosti a využívají ho při intenzifikaci těžby ropy (EOR*). Ve světě je v provozu přes 3000 km produktovodů pro dopravu CO₂, převážně v USA. Tento typ dopravy je cenově efektivnější než doprava lodí, a také poskytuje výhodu nepřetržitého toku od zařízení pro zachytávání až do úložiště. Všechny stávající produktovody jsou provozovány pod vysokým tlakem, v tzv. superkritických* podmínkách, kdy se CO₂ chová jako plyn, ale má hustotu jako kapalina. Množství látky, které je produktovod schopen přepravit, závisí na třech důležitých faktorech: průměru potrubí, tloušťce jeho stěny a tlaku v celé jeho délce.

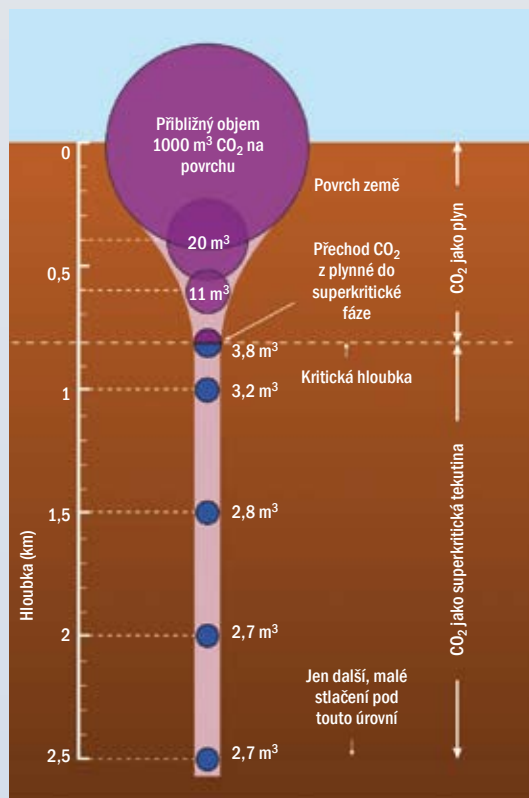
Injektáž

Když je CO₂ dopraven na úložiště, je pod tlakem injektován do rezervoáru (**obr. 2**).

Injektážní tlak musí dostatečně převyšovat stávající tlak v rezervoáru, aby byla rezervoárová fluida zatlačena dále od bodu injektáže. Počet injektážních vrtů závisí na množství ukládaného CO₂, rychlosti injektáže (množství injektovaného CO₂ za hodinu), permeabilitě a mocnosti rezervoáru, maximálním bezpečném injektážním tlaku a na typu vrtu. Protože hlavním cílem je dlouhodobé uložení CO₂, musíme si být jisti hydraulickou integritou formace. Vysoké rychlosti injektáže mohou způsobit nárůst tlaku v bodě injektáže, zvláště ve formacích s nízkou permeabilitou. Injektážní tlak by zpravidla neměl překročit mezní tlak pro tvorbu trhlin v hornině; jinak může dojít k porušení rezervoáru a nadložní těsnicí horniny. Ke stanovení maximálního injektážního tlaku, při kterém nedojde k porušení formace, se používají geomechanické analýzy a modely.

Obrázek 1
Fáze geologického ukládání CO₂. Aby se CO₂ dostal z bodu emise do místa svého bezpečného a trvalého uložení, musí projít celým řetězcem operací, který zahrnuje jeho zachycení, stlačení, dopravu a uložení.





Obrázek 2

Při injeztáži do podzemí se v hloubce kolem 0,8 km CO_2 stává hustou, superkritickou tekutinou. Jeho objem dramaticky klesá z 1000 m^3 na povrchu na 2,7 m^3 ve dvoukilometrové hloubce. To je jeden z faktorů, které činí geologické ukládání velkých množství CO_2 tak atraktivním.

Chemické procesy mohou ovlivnit rychlost, kterou může být CO_2 injeztován do úložné formace. V závislosti na typu rezervoárových hornin, složení fluid a podmínkách v rezervoáru (teplota, tlak, objem, koncentrace atd.) se v blízkosti vrtu mohou vyskytnout procesy rozpouštění a srážení minerálů. To může způsobit zvýšení nebo snížení rychlosti injeztáže. Jakmile je CO_2 vtlačeno do rezervoáru, jeho část se rozpustí ve slané formační vodě a pH^* mírně klesne, což je tlumeno rozpouštěním karbonátových minerálů přítomných v hostitelské hornině. Karbonáty jsou prvními minerály, které se rozpouštějí, protože jejich reakční rychlost je velmi vysoká; rozpouštění začíná ihned po zahájení injeztáže. Tento proces rozpouštění může zvýšit pórizitu horniny a injektivitu*. Karbonátové minerály se však po rozpouštění mohou znovu vysrážet a zacementovat tak úložnou formaci kolem vrtu. Pro omezení snižování permeability v okolí vrtu lze využít vysokých rychlostí injeztáže, které posunou oblast geochemické rovnováhy se srážením minerálů do větší vzdálenosti.

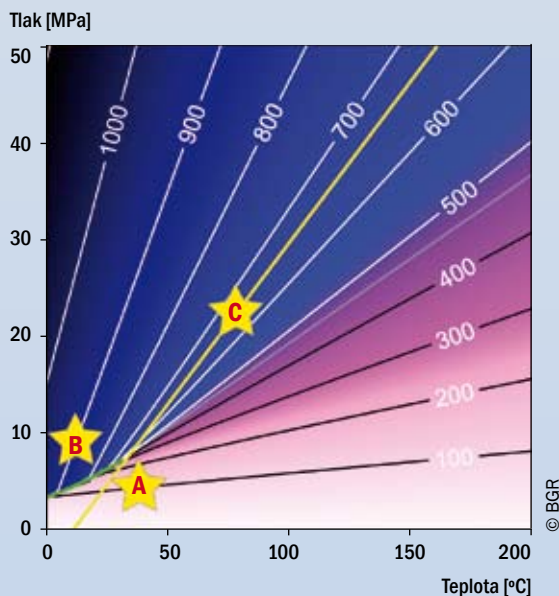
Vysušování je dalším jevem způsobeným injeztážemi. Po fázi okyselení se zbylá voda v okolí injeztážního vrtu rozpouští v injeztovaném suchém plynu, čímž dochází ke koncentraci chemických látek původně obsažených v solance*. Má-li solanka dostatečně vysokou koncentraci těchto látek, může dojít k vysrážení minerálů (např. solí) a tím ke snížení permeability v okolí vrtu.

Výše uvedené problémy s injektivitou závisí na komplexních procesech vzájemného působení látek v okolí injeztážního vrtu, ale jsou také výrazně závislé na čase a na vzdálenosti od vrtu. Pro posouzení těchto efektů se využívají numerické simulace. S rychlostmi injeztáže je třeba zacházet opatrně, aby se zvládly procesy, které by mohly omezit uložení požadovaných množství CO_2 .

Složení toku CO_2

Složení a čistota toku CO_2 , které jsou výsledkem procesu zachytávání, mají významný vliv na všechny následné stránky projektu ukládání CO_2 . Přítomnost několika procent jiných substancí, jako např. vody, sirovodíku (H_2S), oxidů síry a dusíku (SO_x , NO_x), dusíku (N_2) a kyslíku (O_2), ovlivní fyzikální a chemické vlastnosti CO_2 a s nimi spojené chování a jeho důsledky. Přítomnost těchto substancí je proto nutno brát bedlivě v úvahu při plánování stlačování, dopravy a injeztáže a také při úpravách provozních podmínek a zařízení.

Na závěr lze konstatovat, že doprava a ukládání velkých množství CO_2 je realizovatelná už v současnosti. Má-li se však geologické ukládání CO_2 široce uplatnit, všechny fáze procesu musí být „ušity na míru“ pro každý projekt ukládání. Klíčovými parametry při tom jsou termodynamické vlastnosti toku CO_2 (obr. 3), rychlosti toku a podmínky v přepravních cestách a v rezervoáru.



Obrázek 3

Hustota čistého CO_2 (v kg/m^3) jako funkce teploty a tlaku. Žlutá čára odpovídá typickému gradientu tlaku a teploty v sedimentární pánvi. Při hloubce nad 800 m (~8 MPa) podmínky v rezervoáru podporují vysoké hustoty (modré stínování). Zelená křivka znázorňuje fázové rozhraní mezi plyným a kapalným CO_2 . Typické tlakové a teplotní podmínky pro zachytávání, dopravu a ukládání jsou označeny písmeny A, B a C.

Co se stane s CO₂ po uložení do podzemního rezervoáru?

Jakmile je CO₂ injektován do rezervoáru, začne okamžitě stoupat vzhůru a vyplňovat pórový prostor pod těsnicí horninou. Postupem času se část CO₂ rozpustí a případně se přemění na minerály. Tyto procesy probíhají v různých časových měřítkách a přispívají k trvalému zadržení CO₂.

Mechanismy zadržení

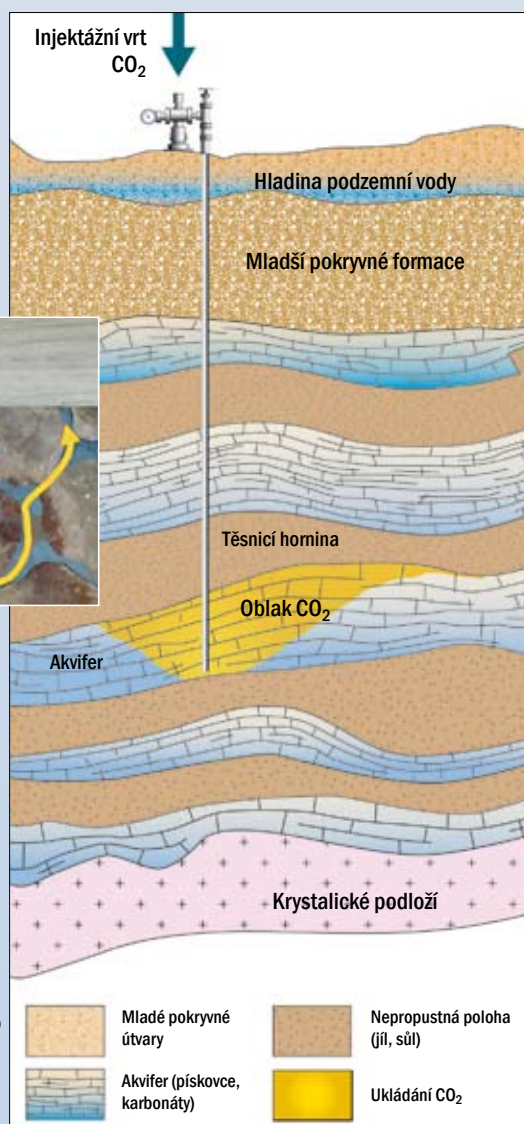
Po injektáži do rezervoáru vyplňuje CO₂ pórové prostory v hornině, které jsou ve většině případů už zaplněny solankou, tj. slanou vodou.

Postupně se dostává do hry několik mechanismů. První z nich je považován za nejdůležitější a brání CO₂ v pronikání k povrchu. Další tři směřují k posílení účinnosti a bezpečnosti ukládání v čase.

Mikroskopický pohled.



Obrázek 1
Injektovaný CO₂, který je lehčí než voda, má tendenci stoupat vzhůru a je zastaven až nadložními nepropustnými horninami.



© BRMG im@gé

1. Akumulace pod těsnicí horninou (strukturní zadržení)

Protože i „hustý“ CO₂ je lehčí než voda, má tendenci stoupat vzhůru. Tento pohyb se zastaví, když CO₂ narazí na vrstvu hornin, která je nepropustná, tzv. „těsnicí horninu“. Tato hornina, obvykle složená z jílu nebo soli, působí jako past a brání CO₂ stoupat dále vzhůru, což vede k jeho nahromadění bezprostředně pod těsnicí horninou. **Obr. 1** ukazuje pohyb CO₂ směrem vzhůru pórovým prostorem horniny (vyznačen modře), dokud nedosáhne těsnicí horniny.

2. Imobilizace v malých pórech (reziduální zadržení)

Reziduální zadržení nastává, když jsou póry v rezervoárové hornině tak úzké, že se CO₂ už nemůže dále pohybovat směrem vzhůru, a to i přes rozdíl v hustotě vůči okolní vodě. Tento proces se vyskytuje hlavně během migrace CO₂ a obvykle může imobilizovat několik procent injektovaného CO₂, v závislosti na vlastnostech rezervoárové horniny.

3. Rozpouštění (zadržení pomocí rozpouštění)

Malé množství injektovaného CO₂ se rozpustí – nebo je převedeno do roztoku – v solance přítomné v pórovém prostoru rezervoáru. Důsledkem rozpouštění je skutečnost, že voda s rozpouštěným CO₂ je těžší než voda bez něj. Má tím pádem tendenci pohybovat se směrem dolů ke dnu rezervoáru. Rychlost rozpouštění závisí na kontaktu mezi CO₂ a solankou. Množství CO₂, které se může rozpustit, je omezeno maximální koncentrací. Vzhledem k pohybu injektovaného CO₂ směrem vzhůru a vody s rozpouštěným CO₂ směrem dolů však dochází k neustálému obnovování kontaktu mezi solankou a CO₂. Tím se zvyšuje množství CO₂, které se může rozpustit. Tyto procesy jsou relativně pomalé, protože probíhají v úzkých pórových prostorech. Hrubé odhady v rámci projektu Sleipner naznačují, že se za 10 let ukládání rozpustilo cca 15 % injektovaného CO₂.

4. Mineralizace (minerální zadržení)

CO₂, zvláště v kombinaci se solankou přítomnou v rezervoáru, může reagovat s minerály tvořícími horniny uložiště. Některé minerály se mohou roz-



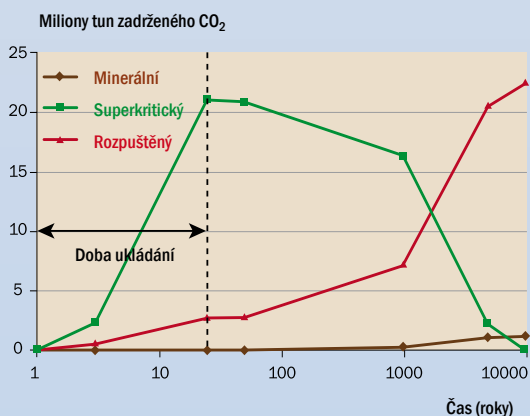
Obrázek 2

CO₂ ve formě husté tekutiny migruje vzhůru (světlemodré bubliny), přičemž rozpouští horninová zrna a reaguje s nimi. To vede k vysrážení karbonátových minerálů na okrajích zrn (bílá barva).

pustit, zatímco jiné se naopak mohou vysrážet, a to v závislosti na pH a minerálním složení rezervoárových hornin (obr. 2). Odhady na Sleipneru naznačují, že i po velmi dlouhé době bude pomocí mineralizace zadržena jen relativně malá část CO₂. Po 10 000 letech by mělo být mineralizací zadrženo pouhých 5 % uloženého CO₂, zatímco 95 % by se mělo rozpustit a žádný CO₂ by neměl zůstat ve formě samostatné fáze (husté tekutiny).

Relativní význam těchto zádržných mechanismů je specifický pro každé úložiště, tzn. že závisí na vlastnostech každé jednotlivé úložné struktury. Například v dómových (antiklinálních) rezervoárech by měl CO₂ zůstat převážně ve fázi husté tekutiny i po dlouhém časovém období, zatímco v plochých rezervoárech, jako je např. Sleipner, se většina CO₂ rozpustí nebo bude mineralizována.

Vývoj podílu CO₂ zadržného různými zádržnými mechanismy v případě Sleipneru je znázorněn na obr. 3.



Obrázek 3

Vývoj přítomnosti CO₂ v různých formách v rezervoáru Sleipner podle numerické simulace. CO₂ je zadrženo v superkritickém stavu pomocí mechanismů 1 a 2, v rozpouštěné formě pomocí mechanismu 3 a v minerální formě pomocí mechanismu 4.

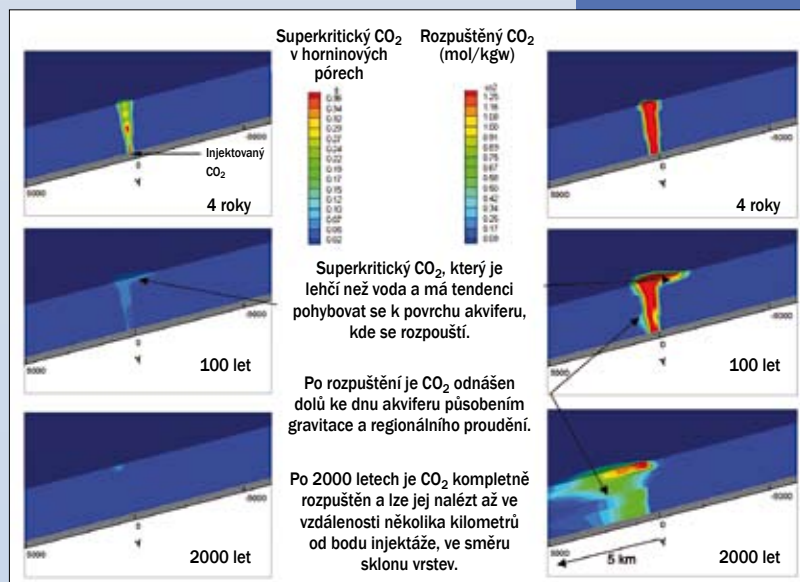
Jak to všechno víme?

Znalost těchto procesů pochází ze čtyř hlavních zdrojů informací:

- **Laboratorní měření:** experimenty malého měřítka zabývající se mineralizací, prouděním a rozpouštěním lze provádět na vzorcích hornin; umožňují proniknout do podstaty krátkodobých procesů malého měřítka.
- **Numerické simulace:** byly vyvinuty počítačové programy, které lze využít k predikci chování CO₂ v mnohem delších časových intervalech (obr. 4). Laboratorní pokusy se používají ke kalibraci numerických simulací.
- **Studium přírodních rezervoárů CO₂,** kde je CO₂ (většinou vulkanického původu) zadržováno v podzemí po dlouhá časová období, často po miliony let. Takové struktury jsou označovány jako „přírodní analogy“*. Tyto lokality nám poskytují informace o chování plynu a dlouhodobých důsledcích přítomnosti CO₂ v podzemí.
- **Monitorování probíhajících demonstračních projektů geologického ukládání CO₂,** jako jsou např. Sleipner (při pobřeží Norska), Weyburn (v Kanadě), In Salah (v Alžírsku) nebo K12b (při pobřeží Nizozemí). Výsledky krátkodobých simulací zde mohou být porovnány se skutečnými terénními daty, což umožní zpřesnit použité modely.

Obrázek 4

Trojrozměrné modelování migrace CO₂ po injektáži 150 000 tun v průběhu 4 let v akviferu doggerského stáří ve Francii. Je znázorněn superkritický CO₂ (vlevo) a CO₂ rozpouštěný v solance (vpravo), a to 4, 100 a 2000 let od začátku injektáže. Simulace je založena na výsledcích terénních experimentů.



Pouze pomocí neustálé křížové kontroly a křížových odkazů mezi těmito čtyřmi zdroji informací je možné získat spolehlivé znalosti o všech procesech odehrávajících se nějakých 1000 m pod našimi nohama.

Na závěr je třeba zdůraznit, že už dnes je známo, že bezpečnost úložiště CO₂ se zvyšuje s časem. Nejkritičtější bodem je nalezení rezervoáru s vhodnou těsnicí horninou v nadloží*, která je schopna zadržet CO₂ (strukturní zadržování). Všechny další procesy spojené s rozpouštěním, mineralizací a reziduálním zadržováním působí příznivě ve smyslu zabránění migraci CO₂ k povrchu.

Mohl by CO₂ uniknout z úložiště, a pokud ano, jaké by byly důsledky?

Na základě studia přírodních systémů lze říci, že u pečlivě vybraných úložišť se neočekávají žádné významné úniky. Přírodní rezervoáry obsahující plyn nám pomáhají porozumět podmínkám, při kterých je plyn zadržován nebo naopak uniká. Lokality s přirozenými úniky nám navíc pomáhají pochopit, jaké by mohly být důsledky úniku CO₂.

Únikové cesty

Potenciální únikové cesty jsou obecně buď umělé vytvořené (např. hluboké vrty), nebo přirozené (např. zlomy a puklinové systémy).

Aktivní i opuštěné vrty mohou představovat migrační cesty, protože jednak tvoří přímé propojení mezi povrchem a rezervoárem, jednak jsou tvořeny materiály vyrobenými člověkem, které mohou v dlouhém časovém horizontu korodovat (**obr. 1**). Komplikaci navíc představuje i to, že ne všechny vrty byly vytvořeny za použití stejných technologií, a proto jsou novější vrty obecně bezpečnější než staré. Dá se však očekávat, že riziko úniku podél vrtů bude všeobecně nízké, protože staré i nové vrty mohou být velmi efektivně monitorovány s využitím citlivých geochemických a geofyzikálních metod, a také proto, že v naftovém průmyslu existují technologie pro jakákoli nápravná opatření, která by mohla být zapotřebí.

Otázka úniků podél zlomů nebo puklin, které by mohly existovat v těsnici vrstvě nebo obecně v nadloží, je složitější, protože se zde jedná o nepravidelné plošné struktury s proměnlivou

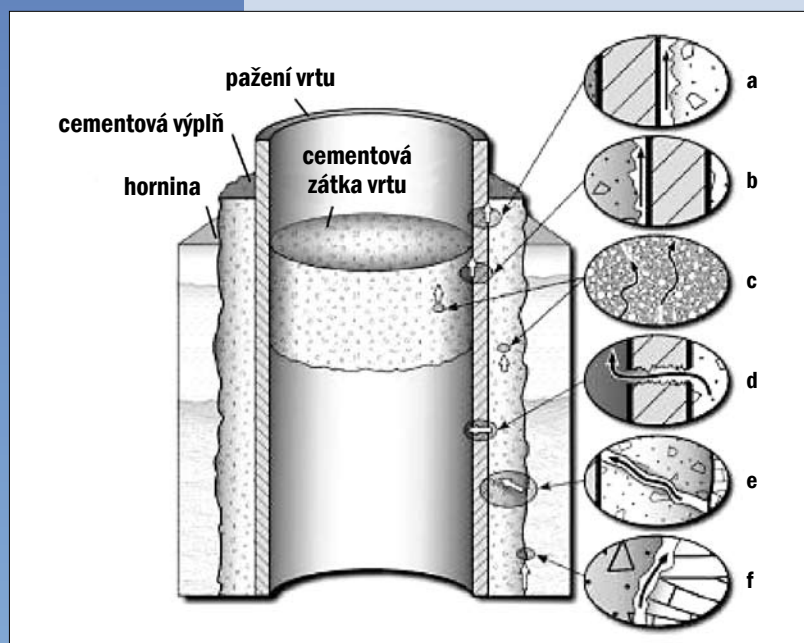
permeabilitou. Dobré vědecké a technické porozumění přírodním systémům s úniky i bez nich nám umožní navrhnout takové projekty ukládání CO₂, které budou vykazovat stejné charakteristiky jako přirozeně se vyskytující rezervoáry, jež zadržují CO₂ nebo metan už tisíce a miliony let.

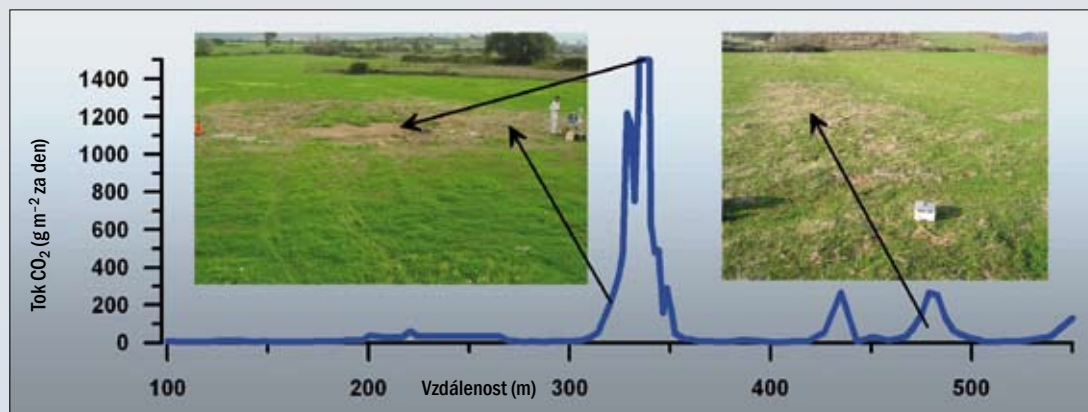
Přírodní analogy: co jsme se naučili

Přírodní systémy (tzv. „analogy“) jsou neocenitelným zdrojem informací pro zlepšení našeho poznání hluboké migrace plynů a přirozené výměny plynů mezi Zemí a atmosférou. Hlavní poznatky získané studiem mnoha rezervoárů přírodních plynů, jak s úniky, tak i bez nich, mohou být shrnuty takto:

- Za příznivých geologických podmínek může být přírodně vzniklý plyn zadržen po dobu stovek tisíc až milionů let.
- Přirozené rezervoáry a kapsy plynu se dokonce vyskytují i v těch nejméně příhodných geologických podmínkách (např. ve vulkanických oblastech).
- Migrace jakéhokoli významnějšího množství plynu vyžaduje advekci (tj. proudění způsobené tlakem), protože difuze je proces velmi pomalý.
- Aby došlo k advekci, fluida (kapaliny a plyny) v rezervoáru se musí nacházet v podmínkách blízkých litostatickému tlaku*, aby zlomy a pukliny zůstaly otevřené nebo aby se mechanicky vytvořily nové cesty.
- Místa, kde dochází k únikům přirozeně se vyskytujících plynů na povrchu, se téměř výhradně nacházejí ve významně zlomově postižených vulkanických a seismicky aktivních oblastech, kde výrony plynu leží na aktivních nebo nedávno aktivovaných zlomech.
- Významné úniky plynu se vyskytují pouze zřídka a jsou vesměs omezeny na výrazně zlomově porušené vulkanické a geotermální oblasti, kde je CO₂ nepřetržitě produkovan přírodními procesy.
- Anomálie plynu na povrchu se obvykle nacházejí ve formě plošně omezených až bodových výskytů, které mají omezený prostorový dopad na okolní prostředí.

Obrázek 1
Možné migrační cesty CO₂ ve vrtu. Únik je možný skrz degenerovaný materiál (c, d, e) nebo podél styčných ploch (a, b, f).





Obrázek 2
Dopady úniku CO_2
na vegetaci při silném
(vlevo) a mírném
(vpravo) toku plynu.
Dopady jsou omezeny
na místa, kde CO_2
uniká.

Z toho vyplývá, že k vytvoření úniku plynu je nutná kombinace mnoha specifických podmínek. Je tedy velmi pravděpodobné, že CO_2 z dobře vybraného a zodpovědně provozovaného úložiště nebude unikat. Přestože je pravděpodobnost úniku nízká, je třeba zcela porozumět souvisejícím procesům a případným dopadům, aby bylo možno vybrat, vyprojektovat a provozovat co možná nejbezpečnější geologická úložiště CO_2 .

Dopady na člověka

CO_2 dýcháme pořád. CO_2 je pro lidské zdraví nebezpečný jen ve velmi vysoké koncentraci, zhruba od 50 000 ppm (5 %), kdy způsobuje bolesti hlavy, závrať a nevolnost. Hodnoty nad touto úrovní mohou způsobit smrt, pokud je jim člověk vystaven příliš dlouho, zejména udušením, když koncentrace kyslíku ve vzduchu poklesne pod úroveň 16 %, která je potřebná k udržení lidského života. Uniká-li však CO_2 v ploché otevřené krajině, rychle se rozptýlí ve vzduchu, a to i při slabém větru. Potenciální riziko pro obyvatelstvo je tak omezeno na uzavřené prostředí nebo topografické deprese, kde koncentrace CO_2 může vzrůst, protože CO_2 je těžší než vzduch a má tendenci se akumulovat při povrchu. Znalost charakteristik odplynění území je zde důležitá při prevenci a řízení rizik. Ve skutečnosti žije mnoho lidí trvale v oblastech s každodenními přirozenými výrony plynu. Např. v Ciampinu v Itálii, poblíž Říma, jsou obytné domy postaveny jen 30 m od míst výronů plynu, kde koncentrace CO_2 v půdě dosahují 90 % a denně do atmosféry uniká 7 tun CO_2 . Místní obyvatelé se vyhýbají jakémukoli riziku dodržováním jednoduchých preventivních opatření, jako například že nespí v přízemí a udržují domy dobře větrané.

Dopady na životní prostředí

Potenciální dopady na ekosystémy by se lišily v závislosti na tom, zda je úložiště situováno na pevnině nebo pod mořským dnem.

U mořských ekosystémů je hlavní účinek CO_2 lokální a spočívá ve snížení pH. S tím souvisejí zejména dopady na faunu, která žije na mořském dně a nemůže se přesunout. Případné důsledky jsou však prostorově omezené a ekosystémy brzy poté, co únik přestane, vykazují známky obnovy. U pevninských ekosystémů mohou být dopady shrnuty zhruba takto:

- **Vegetace** – Přestože koncentrace CO_2 v půdním vzduchu na úrovni 20–30 % jsou vlastně příznivé z hlediska výživy rostlin a zvyšují rychlost růstu některých druhů, hodnoty nad tímto limitem mohou být pro některé (ale ne všechny) rostliny smrtící. Tento jev se výrazně koncentruje na bezprostřední okolí místa výronu plynu; vegetace však zůstává silná a zdravá už ve vzdálenosti několika metrů (**obr. 2**).
- **Kvalita podzemní vody** – Chemické složení podzemní vody může být pozměněno přidáním CO_2 , neboť voda se pak stává kyselější a z hornin a minerálů v akviferu se mohou uvolnit některé prvky. I kdyby CO_2 unikl do akviferu s pitnou vodou, účinky by zůstaly prostorově omezené. Kvantifikace dopadů tohoto druhu je nyní předmětem výzkumu. Není bez zajímavosti, že mnoho akviferů v Evropě je obohaceno přírodním CO_2 a tato voda je často jímána do lahví a prodávána jako „minerální voda“.
- **Integrita hornin** – Okyselení podzemní vody může vyústit v rozpouštění hornin, snížení strukturální celistvosti a vytvoření závrťů. Tento typ jevů se však vyskytuje pouze ve velmi specifických geologických a hydrogeologických podmínkách (tektonicky aktivní akvifery s vysokou rychlostí pohybu fluid, mineralogické složení bohaté na karbonáty), jejichž výskyt je v umělých úložištích nepravděpodobný.

Dopady jakéhokoli hypotetického úniku CO_2 budou závislé na místních podmínkách úložiště. Proto pouze důkladná znalost geologické a strukturní stavby nám v konečném důsledku umožní identifikovat všechny potenciální únikové cesty plynu, vybrat úložiště s nejnižším potenciálem úniku a předpovídat chování plynu. Na tomto základě lze pak posoudit a předem eliminovat možné závažné dopady na člověka a ekosystémy.

Jak můžeme monitorovat úložiště v hloubce a na povrchu?

Všechna úložiště bude nutno monitorovat z důvodů provozních, bezpečnostních, společenských, ekonomických i kvůli ochraně životního prostředí. Musí být vypracována strategie definující, co přesně se bude monitorovat a jak.

Proč potřebujeme monitoring?

Teprve monitorování provozu úložiště bude bezpečnou zárukou, že bylo dosaženo základního cíle geologického ukládání CO₂, tj. dlouhodobé izolace antropogenního CO₂ od atmosféry. Jsou četné důvody pro monitoring úložišť, mj. tyto:

- **Provozní:** řídit a optimalizovat proces injektáže.
- **Bezpečnostní a environmentální:** předcházet jakémukoli dopadu na obyvatelstvo, faunu a ekosystémy v místě úložiště, popř. tento dopad minimalizovat, a zaručit příspěvek ke zmírnění globální změny klimatu.
- **Společenské:** poskytnout veřejnosti informace potřebné k tomu, aby porozuměla principu úložiště a získala důvěru v jeho bezpečnost.
- **Finanční:** vytvořit důvěru trhu v technologii CCS a ověřit uložený objem CO₂, aby mohl být posouzen jako „nevypuštěné emise“ v příštích fázích Systému obchodování s emisemi Evropské unie (ETS).

Monitorování původního stavu prostředí (tzv. „baseline“) i následného vývoje úložiště je důležitým regulatorním požadavkem Evropské směrnice o geologickém ukládání CO₂ z 23. dubna 2009. Operátoři musí prokázat, že provoz úložiště je v souladu s předpisy a že tento stav bude zachován i v dlouhodobém časovém horizontu. Monitoring je významným faktorem pro snížení nejistoty ohledně chování úložiště a jako takový by měl být pevně propojen s aktivitami řízení bezpečnosti.

Jaké jsou cíle monitoringu?

Monitoring může být zaměřen na různé cíle a procesy v různých částech úložiště, jako např.:

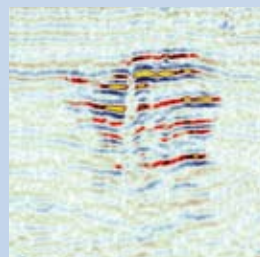
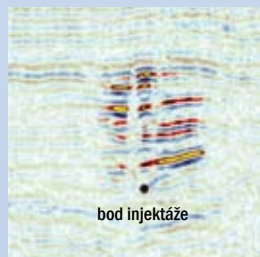
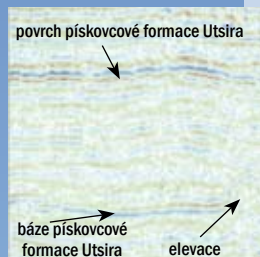
- Zobrazení oblaku CO₂ – sledování CO₂ migrujícího od bodu injektáže. Tento typ monitoringu poskytuje klíčová data pro kalibraci modelů, které předpovídají budoucí rozložení CO₂ v úložišti. Je k dispozici řada ověřených technologií, zejména opakovaná seizmická měření, které byly úspěšně použity u několika demonstračních a pilotních projektů (**obr. 1**).
- Neporušenost těsnicí horniny. Monitoring je potřebný k posouzení, zda je CO₂ izolován v úložné struktuře, a také aby bylo možné vydat včasné varování v případě neočekávané migrace CO₂ směrem vzhůru. Tento typ monitoringu může být zvláště důležitý ve fázi injektáže, kdy tlak v rezervoáru významně, i když dočasně, vzrůstá.
- Integrita vrtů. Jde o významnou záležitost, protože hluboké vrty mohou potenciálně sloužit jako přímá cesta pro migraci CO₂ k povrchu. Injektážní vrty i všechny pozorovací vrty a starší opuštěné vrty musí být během injektážní fáze i po ní pečlivě monitorovány, aby se předešlo náhlému úniku CO₂. Monitoring se také používá k prověření toho, zda byly všechny vrty účinně utěsněny poté, co už nejsou potřeba. Stávající geofyzikální a geochemické monitorovací systémy, které jsou běžně používány při těžbě ropy a zemního plynu, mohou být instalovány uvnitř vrtů nebo nad nimi za účelem poskytnutí včasného varování a zajištění bezpečnosti.
- Migrace do nadloží. U úložišť, kde se v nadloží úložiště vyskytují další, mělkší vrstvy s obdobnými vlastnostmi, jako má těsnicí hornina, může být nadloží klíčovou složkou redukcí riziko úniku CO₂ do moře nebo do atmosféry. Pokud monitorování v rezervoáru nebo v oblasti těsnicí horniny indikuje neočekávanou migraci skrz těsnicí horninu, stává se monitoring nadloží nutností. V nadloží může být použita řada technologií používaných při sledování oblaků znečištění nebo monitorování neporušenosti těsnicích hornin.
- Povrchové úniky a detekce a měření v atmosféře. Abychom se ujistili, že uložený CO₂ nemigroval k povrchu, máme k dispozici řadu geochemických a biochemických metod i metod dálkového průzkumu, které jsou schopny lokalizovat úniky, posoudit a monitorovat distribuci CO₂ v půdě a jeho rozptýl v atmosféře nebo v mořském prostředí (**obr. 2**).

Obrázek 1
Seizmické záznamy monitorující oblak CO₂* na úložišti Sleipner před injektáží (začala v r. 1996) a po injektáži (o 3 a 5 let později).

Stav před injektáží (1994)

2,35 Mt CO₂ (1999)

4,36 Mt CO₂ (2001)



- Množství uloženého CO₂ pro regulační a fiskální účely. Ačkoli množství injektovaného CO₂ lze snadno měřit na hlavě vrtu, jeho kvantifikace v rezervoáru je technicky velmi obtížná. Pokud nastane únik do přivrchných vrstev, musí se uniklý objem kvantifikovat pro potřeby vykazování v rámci národní inventury skleníkových plynů a budoucích schémat ETS.
- Pohyby povrchu a mikroseismicita*. Zvýšený tlak v rezervoáru způsobený injektáží CO₂ by ve specifických případech mohl způsobit nárůst potenciálu mikroseismicity a pohyby povrchu malého rozsahu. Jsou k dispozici monitorovací metody pro sledování mikroseizmů i metody dálkového průzkumu (měření z letadla nebo z družic), které jsou schopny měřit i velmi malé deformace povrchu.

Jak se monitoring provádí?

V rámci probíhajících demonstračních a výzkumných projektů již byla uplatněna řada monitorovacích technologií, zahrnujících metody, které přímo monitorují CO₂, i ty, které nepřímo měří jeho vliv na horniny, fluida a okolní prostředí. Přímá měření zahrnují analýzy fluid z hlubokých vrtů nebo měření koncentrací plynu v půdě či v atmosféře. K nepřímým metodám patří geofyzikální měření a monitorování změn tlaku ve vrtech nebo změn pH v podzemní vodě.

Monitoring bude vyžadován jak na úložištích na pevnině, tak i na těch pod mořem. Výběr vhodných monitorovacích metod bude záviset na technických a geologických charakteristikách úložiště a na účelu monitoringu. Už dnes je k dispozici široká škála monitorovacích technologií (**obr. 3**), z nichž řada je již pevnou součástí aktivit při těžbě ropy a plynu; tyto technologie jsou nyní adaptovány pro účely monitorování CO₂. Probíhá i výzkum zaměřený na optimalizaci stávajících me-

tod i vývoj nových technologií s cílem zlepšit jejich rozlišení a spolehlivost, snížit náklady, zautomatizovat provoz a prokázat účinnost.

Strategie monitoringu

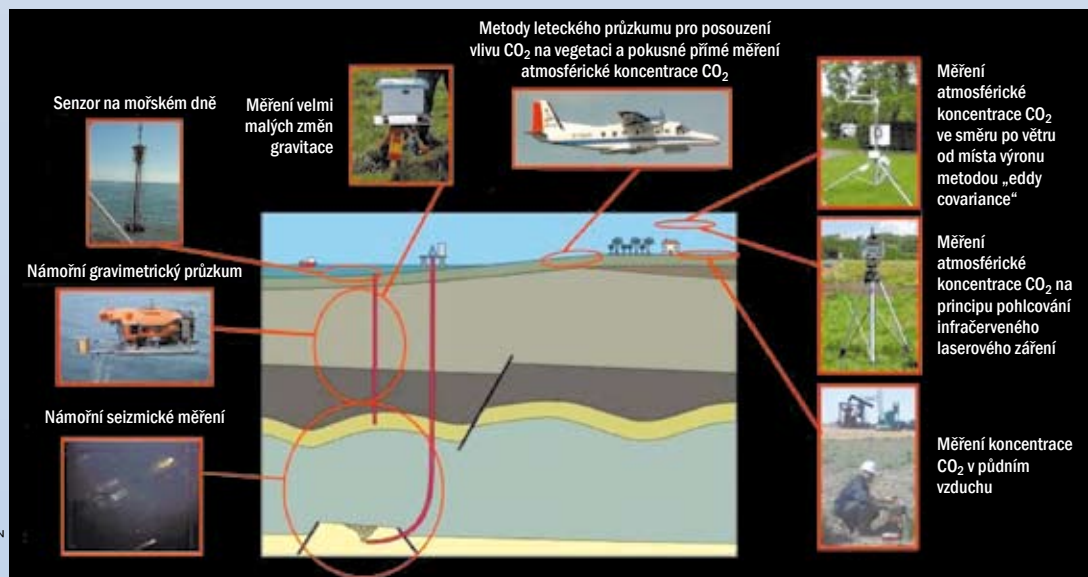
Při plánování strategie monitoringu je třeba učinit mnoho rozhodnutí, která závisí na geologických a technických podmínkách, specifických pro každé úložiště, jako jsou geometrie a hloubka rezervoáru, očekávaný rozměr oblaku CO₂, potenciální unikové cesty, geologie nadloží, doba a rychlost injektáže a povrchové charakteristiky, k nimž patří topografie, hustota zalidnění, infrastruktura a ekosystémy. Jakmile je přijato rozhodnutí o nejvhodnějších metodách a místech měření, musí se ještě před zahájením injektáže provést základní měření („baseline“), které slouží jako referenční pro všechna další měření v budoucnosti. Každý monitorovací program musí být také flexibilní, aby se mohl vyvíjet současně s probíhajícím vývojem projektu ukládání. Strategie monitoringu, která bude schopná integrovat všechny tyto problémy a která bude zároveň zlepšovat efektivitu vynaložených nákladů, bude klíčovou složkou rizikové analýzy a ověření bezpečnosti a správného fungování úložiště.

Závěrem lze již dnes říci, že monitoring úložiště CO₂ je proveditelný s využitím řady technologií, které jsou už dnes na trhu nebo ve stádiu vývoje. Dnes probíhající výzkum má za cíl nejen vyvinout nové přístroje (zejména pro použití na mořském dně), ale i optimalizovat monitorovací výkon a snížit náklady.



© CO₂GeoNet

Obrázek 2
Monitorovací bój se solárními panely pro zajištění energie, plováky a zařízení pro vzorkování plynu na mořském dně.



Obrázek 3
Malý výběr ilustrující rozsah technologií, které jsou k dispozici pro monitorování různých částí systému úložiště CO₂.

Jaká bezpečnostní kritéria je třeba zavést a dodržovat?

Aby byla zajištěna bezpečnost a účinnost ukládání, musí regulační orgány stanovit podmínky pro zpracování projektu a provoz úložiště, které musí provozovatel dodržovat.

Přestože je dnes geologické ukládání CO₂ všeobecně přijímáno jako jedna z důvěryhodných možností pro zmírnění změny klimatu, je stále ještě třeba stanovit bezpečnostní kritéria týkající se ochrany lidského zdraví a okolního prostředí, a to dříve než dojde k plošnému rozšíření této technologie v průmyslovém měřítku. Taková kritéria mohou být definována jako požadavky uvalené regulačními orgány na provozovatele. Bude tím zajištěno, že místní vlivy na zdraví, bezpečnost a životní prostředí (včetně zdrojů podzemní vody) budou zanedbatelné, a to v krátkodobém, střednědobém i dlouhodobém časovém horizontu.

Jedním z klíčových bodů geologického ukládání je to, že má být trvalé, tzn. že se neočekává, že by docházelo k nějakým únikům z úložiště. Přesto musí být v rámci scénáře „co kdyby?“ posouzena rizika a od provozovatelů se bude požadovat, aby dodržovali opatření, která zabrání jakémukoli úniku nebo anomálnímu chování úložiště. Podle IPCC je třeba, aby uložený CO₂ zůstal v podzemí přinejmenším 1000 let, což by umožnilo stabilizaci nebo pokles atmosférické koncentrace CO₂ prostřednictvím přirozené výměny s vodou moří a oceánů. Tím by se minimalizoval nárůst povrchové teploty v důsledku globálního oteplování. Místní vlivy je ovšem třeba posuzovat v časovém měřítku od dnů až po mnoho tisíc let.

V průběhu životního cyklu projektu ukládání CO₂ lze identifikovat několik hlavních kroků (**obr. 1**). Bezpečnost bude zajištěna pomocí:

- pečlivého výběru a posouzení úložiště;
 - posouzení bezpečnosti;
 - správného provozování;
 - vhodného monitorovacího plánu;
 - přiměřeného plánu nápravných opatření.
- S tím spojené klíčové cíle jsou:
- zajistit, aby CO₂ zůstal v rezervoáru;
 - udržovat integritu vrtů;
 - zachovat fyzikální vlastnosti rezervoáru (včetně pórizity, permeability, injektivit) a nepropustné těsnicí horniny;
 - vzít v úvahu složení toku CO₂ a věnovat pozornost jakýmkoli

nečistotám, které nebyly eliminovány v procesu zachytávání; toto je důležité z hlediska zabránění nežádoucím interakcím s vrtem, rezervoárem, těsnicí horninou a – v případě úniku – s podzemní vodou v nadloží.

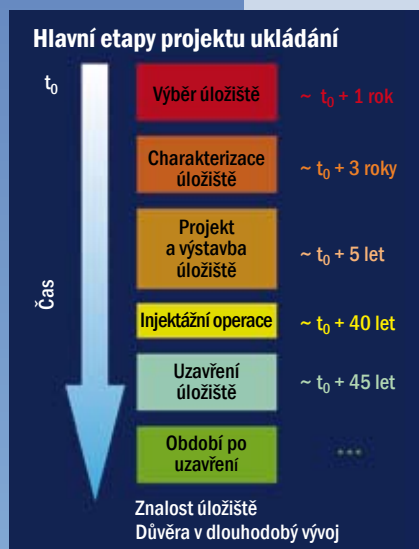
Bezpečnostní kritéria pro zpracování projektu

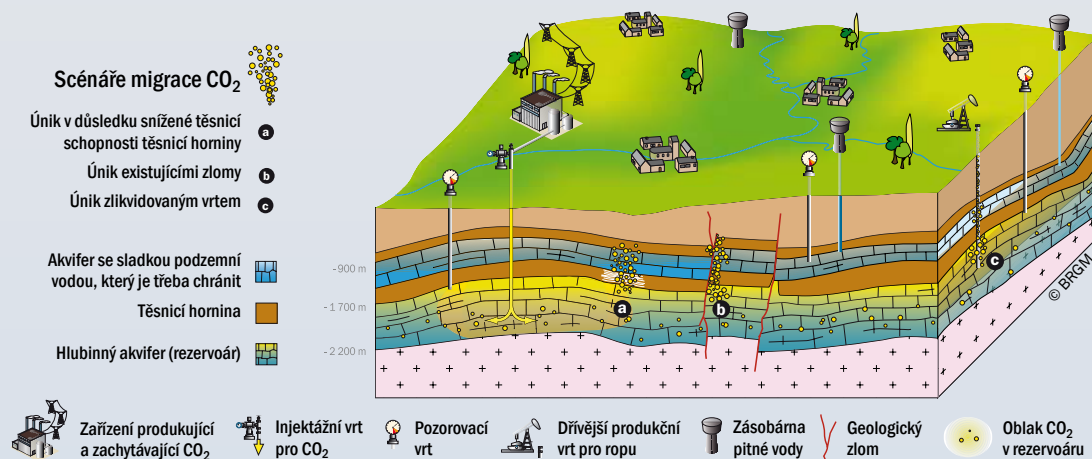
Bezpečnost musí být prokázána ještě před zahájením provozu. Hlavní složky prostředí, které musí být prověřeny s ohledem na výběr úložiště, zahrnují:

- rezervoár a těsnicí horninu;
- nadloží a zvláště nepropustné vrstvy, které by mohly fungovat jako sekundární těsnicí horizonty;
- přítomnost propustných zlomů nebo vrtů, které by mohly působit jako únikové cesty k povrchu;
- akvifery s pitnou podzemní vodou;
- zalidnění a omezení z hlediska životního prostředí na povrchu.

K posouzení geologie a geometrie úložiště se používají technologie známé z průzkumu ropy a plynu. Modelování pohybu fluid a geochemické i geomechanické modelování úložiště s CO₂ umožňují předvídat chování CO₂ a dlouhodobý výsledek celého procesu, a také definovat parametry pro účinnou injektáž. V konečném důsledku by pak pečlivá charakterizace úložiště měla umožnit definování scénáře jeho „normálního chování“, odpovídajícího úložišti vhodnému pro ukládání, kde jsme si jisti, že CO₂ zůstane zadržen v rezervoáru. Při posuzování rizik je ovšem třeba pracovat s méně přijatelnými scénáři budoucího stavu úložiště, včetně výskytu neočekávaných událostí. Zvláště je třeba počítat s potenciálními únikovými cestami, vystavením účinkům působení CO₂ a dalšími následky (**obr. 2**). Každý scénář úniku CO₂ z úložiště by měl být expertně posouzen a tam, kde je to možné, by se mělo použít numerické modelování za účelem posouzení pravděpodobnosti výskytu a potenciální závažnosti. Například by se měl pečlivě mapovat rozsah oblaku CO₂, aby se zjistilo jakékoli propojení s případnou zlomovou zónou. Při posuzování rizik je rovněž třeba pečlivě posoudit citlivost vůči změnám vstupních parametrů a nejistotám. Odhady případných vlivů na člověka a životní prostředí by se měla zabývat studie posouzení vlivů, která je běžnou součástí všech povolenacích procesů pro průmyslová zaří-

Obrázek 1
Jednotlivé etapy
projektu ukládání.





Obrázek 2
Příklady potenciálních scénářů úniku.

zení. V rámci tohoto procesu se zkoumají jak normální scénář, tak i scénáře s únikem CO₂, aby bylo možno posoudit všechna potenciální rizika spojená se zařízením.

Monitorovací program, krátkodobý i dlouhodobý, by měl být vytvořen podle výsledků analýzy rizik a měl by sledovat kritické parametry definované v rámci různých scénářů. Jeho hlavními cíli jsou sledování migrace oblaku CO₂, kontrola integrity vrtů a těsnicí horniny, detekce jakéhokoli úniku CO₂, posouzení kvality podzemní vody a záruka, že žádný CO₂ nedosáhl povrchu. Poslední součástí posouzení bezpečnosti je plán nápravných opatření a opatření ke zmírnění následků. Je zaměřen na podrobné rozpracování seznamu nápravných opatření, které je třeba přijmout v případě úniku nebo anomálního chování. Zahrnuje možné narušení těsnicí horniny i havárii vrtu během období injektáže i po něm a bere v úvahu i extrémní nápravná řešení, jako zpětné čerpání uloženého CO₂. Existující know-how obsahuje standardní technologie používané při těžbě ropy a plynu, jako například zásah do již zkompletovaného vrtu, snížení injektážního tlaku, částečné nebo úplné odebrání plynu, extrakci vody za účelem snížení tlaku, odstranění mělce uloženého plynu atd.

Bezpečnostní kritéria během provozu a po jeho ukončení

Hlavní obavy o bezpečnost jsou spojeny s fází provozu úložiště: po ukončení injektáže dojde k poklesu tlaku, což zvýší bezpečnost úložiště. Důvěra ve schopnost injektovat a uložit CO₂ bezpečným způsobem je spojena se zkušenostmi průmyslových firem. CO₂ je v zásadě bezpečným produktem používaným v řadě průmyslových odvětví, takže nakládání s touto substancí nevyvolává žádné nové problémy. Plán a řízení provozu jsou založeny hlavně na know-how z průmyslu ropy a plynu, zejména ze sezónního ukládání zemního plynu v zásobnících a z intenzifikace těžby ropy (EOR). Hlavní parametry pro řízení operací jsou:

- injektážní tlak a rychlost injektáže – tlak by měl

být udržován pod hranicí mezního tlaku, při jehož překročení se v těsnicí hornině vytvářejí trhliny;

- injektovaný objem, kvůli srovnání s předpoklady definovanými modelováním;
- složení toku injektovaného CO₂;
- integrita injektážních vrtů a všech dalších vrtů situovaných v oblasti rozšíření oblaku CO₂ nebo poblíž;
- rozsah oblaku CO₂ a zjištění jakéhokoli úniku;
- stabilita povrchu.

Během injektáže bude třeba opakovaně srovnávat chování injektovaného CO₂ s předpoklady. Tím se soustavně zlepšuje naše znalost úložiště. Pokud se zjistí jakékoli anomální chování, měl by se nově upravit monitorovací program a v případě potřeby by se měla přijmout nápravná opatření. Pokud se objeví podezření na únik, vhodné monitorovací nástroje lze zaměřit na konkrétní části úložiště, od vlastního rezervoáru až po povrch. Tím by se zjistil výstup CO₂ a kromě toho i jakékoli nepříznivé vlivy na akvifery s pitnou vodou, životní prostředí a v konečném důsledku tedy i na obyvatelstvo.

Po ukončení injektáže začíná fáze uzavírání úložiště: vrtý musí být správně utěsněny a zlikvidovány, modelovací a monitorovací programy aktualizovány, a je-li třeba, jsou přijata nápravná opatření ke snížení rizika. Jakmile lze úroveň rizika považovat za dostatečně nízkou, zodpovědnost za úložiště se přenesla na státní orgány a monitorovací plán může být zastaven nebo minimalizován.

Schválená příslušná evropská směrnice vytváří právní rámec zajišťující, že zachytávání a ukládání CO₂ je dostupnou alternativou zmírnění změny klimatu a že může být prováděno bezpečně a zodpovědně.

Závěrem lze říci, že bezpečnostní kritéria jsou pro úspěšné průmyslové zavedení ukládání CO₂ zcela zásadní. Musí být přizpůsobena pro každé jednotlivé úložiště. Tato kritéria budou zvláště významná pro souhlas veřejnosti a zásadní pro povolenací proces, v jehož rámci musí regulační orgány definovat, do jakých podrobností mají být bezpečnostní požadavky řešeny.

Akvifer: propustné horninové těleso obsahující vodu. Akvifery nejbližší k povrchu obsahují sladkou vodu využívanou pro spotřebu obyvatelstva. Hlubší akvifery jsou naplněny slanou vodou, která není vhodná pro žádné lidské potřeby. Nazývají se slané akvifery.

CCS (CO₂ Capture and Storage): zachytávání a ukládání CO₂.

CSLF: Carbon Sequestration Leadership Forum (Vůdčí fórum pro odbourávání uhlíku). Mezinárodní iniciativa v oblasti změny klimatu, která se zaměřuje na vývoj zlepšených, efektivních technologií pro separaci a zachytávání oxidu uhličitého a jeho transport a dlouhodobé bezpečné ukládání.

EU GeoCapacity: dokončený evropský výzkumný projekt, který posoudil celkovou kapacitu pro geologické ukládání antropogenních emisí CO₂ v Evropě.

GESTCO: dokončený evropský výzkumný projekt, který posoudil možnosti geologického ukládání CO₂ v 8 zemích (Norsko, Dánsko, Velká Británie, Belgie, Nizozemí, Německo, Francie a Řecko).

IEA-GHG: Mezinárodní energetická agentura – Program výzkumu a vývoje pro skleníkové plyny. Mezinárodní spolupráce, která má za cíl: zhodnotit technologie pro snižování emisí skleníkových plynů, šířit výsledky těchto studií, identifikovat cíle pro výzkum, vývoj a demonstrační aktivity a podporovat příslušné práce.

Injektivita: charakterizuje, jak snadno může být tekutina (jako např. CO₂) injektována do geologické formace. Je definována jako rychlost injektáže dělená rozdílem tlaků mezi bodem injektáže uvnitř vrtu na jeho počvě a ve formaci.

Intenzifikace těžby ropy (EOR): Technologie, která zvyšuje těžbu ropy pomocí injektáže fluid (např. páry nebo CO₂), jež pomáhají mobilizovat ropu v ložisku.

IPCC: Mezivládní panel pro změnu klimatu. Tato organizace byla založena v roce 1988 Světovou

meteorologickou organizací (WMO) a Programem OSN na ochranu životního prostředí (UNEP) k posouzení vědeckých, technických a socioekonomických informací významných pro porozumění změně klimatu, jejím potenciálním dopadům a možnostem jejího zmírnění a adaptace. IPCC a Alu Gorovi byla udělena Nobelova cena míru za rok 2007.

Litostatický tlak: síla vyvíjená na horninu pod zemským povrchem nadložními horninami. Litostatický tlak roste s hloubkou.

Mikroseizmicitá: mírné chvění nebo vibrace v zemské kůře, bez vztahu k zemětřesení, které mohou být způsobeny různými přirozenými i umělými původci.

Nadloží: geologické vrstvy ležící mezi těsnicí horninou rezervoáru a zemským povrchem (nebo mořským dnem).

Oblak CO₂: prostorové rozložení superkritického CO₂ v horninových jednotkách.

Permeabilita (propustnost): vlastnost nebo schopnost pórovité horniny přenášet fluida; je měřítkem toho, jak snadno budou fluida protékat při existenci tlakového rozdílu.

pH: měřítko kyselosti roztoku; pH 7 odpovídá neutrální hodnotě.

Pórozita (pórovitost): procentní část celkového objemu horniny, která není vyplněna minerály. Tyto mezery se nazývají póry a mohou být vyplněny různými fluidy; v hluboko uložených horninách je typickým fluidem slaná voda, ale může to být i ropa, plyn (např. metan) a také přírodní CO₂.

Přírodní analog: přirozeně se vyskytující rezervoár CO₂. Existují jak lokality, kde CO₂ uniká, tak i lokality bez úniků. Jejich studium může zlepšit naše znalosti o dlouhodobém osudu CO₂ v hlubokých geologických systémech.

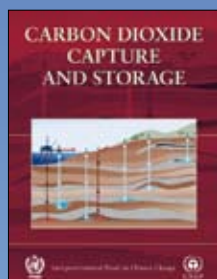
Rezervoár: těleso horniny, zpravidla sedimentární, které je dostatečně pórovité a propustné, aby mohlo přijmout a akumulovat CO₂. Nejobvyklejší rezervoárové horniny jsou pískovec a vápenec.

Solanka: velmi slaná voda obsahující vysoké koncentrace rozpuštěných solí.

Superkritický: stav fluida (tekutiny) při tlaku a teplotě, které převyšují tzv. kritické hodnoty (31,03 °C a 7,38 MPa pro CO₂). Vlastnosti takového fluida se spojitě mění; při nízkém tlaku se blíží plynu a při vysokém tlaku kapalině.

Těsnicí hornina: nepropustná vrstva horniny, která funguje jako bariéra pro pohyb kapalin a plynů a která vytváří geologickou past, pokud překrývá rezervoár.

Vrt: kruhový otvor vytvořený vrtáním, zvláště ve smyslu hlubokého otvoru o malém průměru, jako je například ropný vrt.



Další zdroje informací:

Zvláštní zpráva o CCS Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC):

http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Internetové stránky Generálního ředitelství pro klimatickou akci Evropské komise o CCS, včetně informací o právním rámci a implementaci Směrnice o geologickém ukládání oxidu uhličitého

http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs_en.htm

Internetová stránka IEA GHG s informacemi o nástrojích pro monitoring :

http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html

Co je CO₂GeoNet?



CO₂GeoNet je evropská vědecká komunita, na niž se můžete obrátit s požadavkem na jasné a podrobné informace o geologickém ukládání CO₂, důležité inovativní technologii pro zmírnění změny klimatu. CO₂GeoNet byl iniciován Evropskou komisí jako Síť excelence v 6. rámcovém programu (kontrakt EC FP6 v letech 2004–2009). Sdružuje 13 institucí ze 7 evropských zemí, vesměs s vysokým mezinárodním kreditem, které jsou hlavními aktéry v oblasti výzkumu geologického ukládání CO₂. V roce 2008 byl CO₂GeoNet zaregistrován jako neziskové sdružení podle francouzského práva, aby mohl pokračovat ve svých aktivitách i po ukončení podpory ze strany EK. CO₂GeoNet má rozsáhlé zkušenosti z výzkumných projektů zaměřených na: rezervoáry, těsnicí horniny, potenciální migrační cesty CO₂ k zemskému povrchu, nástroje pro monitoring, potenciální dopady na člověka a ekosystémy, postoje veřejnosti a komunikaci s ní. CO₂GeoNet nabízí širokou škálu služeb ve čtyřech hlavních oblastech: 1) společný výzkum; 2) odborná školení a tréninky; 3) odborné poradenství; 4) informace a komunikace.

CO₂GeoNet postupně získával na síle a stal se stálou evropskou vědeckou referenční autoritou, schopnou poskytnout potřebnou vědeckou podporu širokému a bezpečnému uplatnění geologického ukládání CO₂. Rozšíření této komunity na celou Evropu právě probíhá prostřednictvím projektu CGS Europe, koordinační akce financované 7. rámcovým programem EU (2010–2013). V CGS Europe se spojilo pevné jádro tvořené asociací CO₂GeoNet s dalšími 21 institucemi; do projektu je tak zapojeno 28 evropských zemí (24 členů EU a 4 přidružené země). Celkově je tak k dispozici několik set vědců a výzkumných pracovníků, schopných zabývat se všemi aspekty geologického ukládání CO₂ na základě mezioborové integrace. Cílem je poskytovat zainteresovaným stranám a veřejnosti nezávislé a vědecky ověřené informace o geologickém ukládání CO₂.



CO₂GeoNet: Evropská síť excelence v oboru geologického ukládání CO₂

BGR (Německo); **BGS** (Velká Británie); **BRGM** (Francie); **GEUS** (Dánsko); **HWU** (Velká Británie); **IFPEN** (Francie); **IMPERIAL** (Velká Británie); **NIVA** (Norsko); **OGS** (Itálie); **IRIS** (Norsko); **SPR Sintef** (Norsko); **TNO** (Nizozemí); **URS** (Itálie).



www.co2geonet.eu

CGS Europe: Celoevropská koordinační akce v oboru geologického ukládání CO₂

CO₂GeoNet (13 členů vyjmenovaných výše); **ČGS** (Česká republika); **GBA** (Rakousko); **GEOECOMAR** (Rumunsko); **GEO-INZ** (Slovinsko); **G-IGME** (Řecko); **GSI** (Irsko); **GTC** (Litva); **GTK** (Finsko); **LEGMC** (Lotyšsko); **ELGI** (Maďarsko); **LNEG** (Portugalsko); **METU-PAL** (Turecko); **PGI-NRI** (Polsko); **RBINS-GSB** (Belgie); **SGU** (Švédsko); **SGUDS** (Slovensko); **S-IGME** (Španělsko); **SU** (Bulharsko); **TTUGI** (Estonsko); **UB** (Srbsko); **UNIZG-RGNF** (Chorvatsko).



www.cgseurope.net

CO₂GeoNet získal široké uznání na evropské i mezinárodní scéně

CO₂GeoNet byl uznán jako světově významný projekt ze strany CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum).



CO₂GeoNet úzce spolupracuje s Programem pro skleníkové plyny Mezinárodní energetické agentury (IEAGHG).



O této brožuře

Za účelem zvýšení povědomí veřejnosti o geologickém ukládání oxidu uhličitého odpovídá CO₂GeoNet na otázku „Co to vlastně je geologické ukládání CO₂?“ Tým předních vědců z CO₂GeoNet připravil aktuální odpovědi i na šest souvisejících otázek, které vycházejí z výsledků a zkušeností celosvětového výzkumu. Cílem bylo poskytnout jasné a nezájaté informace určené širokému publiku a povzbudit dialog o základních otázkách týkajících se technologických aspektů geologického ukládání CO₂. Informace shrnuté v předkládané brožuře byly prezentovány na Tréninkovém a dialogovém workshopu, který se konal v Paříži 3. října 2007.

Brožuru „Co to vlastně je geologické ukládání CO₂?“ lze v mnoha jazykových verzích stáhnout na www.co2geonet.com/brochure.

CO₂GeoNet

Evropská síť excellence v oboru geologického ukládání CO₂



www.co2geonet.eu

Sekretariát: info@co2geonet.com

BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFPEN** IFP Energies nouvelles, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Università di Roma La Sapienza-CERI.

Českou verzi brožury vytvořila Česká geologická služba v rámci projektu CGS Europe – Celoevropská koordinační akce v oboru geologického ukládání CO₂ (projekt 7. rámcového programu EU).



ISBN: 978-80-7075-767-3

