

Čo skutočne znamená geologické ukladanie CO_2 ?

Zodpovedné
spotrebúvanie
fosílnych palív
(uhlie, plyn a ropa)

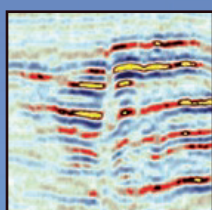
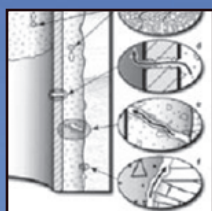
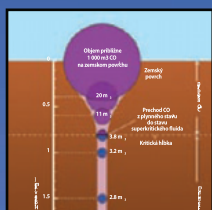
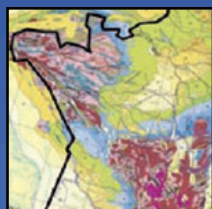
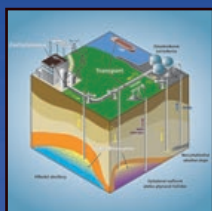
Odstránenie hlavného zdroja
skleníkových plynov

Navrátenie uhlíka naspäť do podzemia

Poskytnutie času potrebného na rozvoj
využitia energetických zdrojov
priateľských k stavu klímy



CO_2 GeoNet Európska sieť excelentnosti



Klimatická zmena a potreba geologického ukladania CO ₂	4
1. Kde a ako možno ukladať v podzemí CO ₂ ?	6
2. Ako môžeme dopravovať a zatláčať veľké množstvá CO ₂ ?	8
3. Ako sa správa CO ₂ hneď po vtlačení do kolektora?	10
4. Mohol by CO ₂ uniknúť z úložiska? Ak áno, aké by boli následky?	12
5. Akým spôsobom môžeme monitorovať úložisko v hĺbke a na povrchu?	14
6. Aké bezpečnostné kritériá je potrebné zaviesť a dodržiavať?	16
Slovník odborných výrazov	18
Čo to je CO ₂ GeoNet?	19

Táto brožúra bola vytvorená vďaka príspevkom týchto autorov:

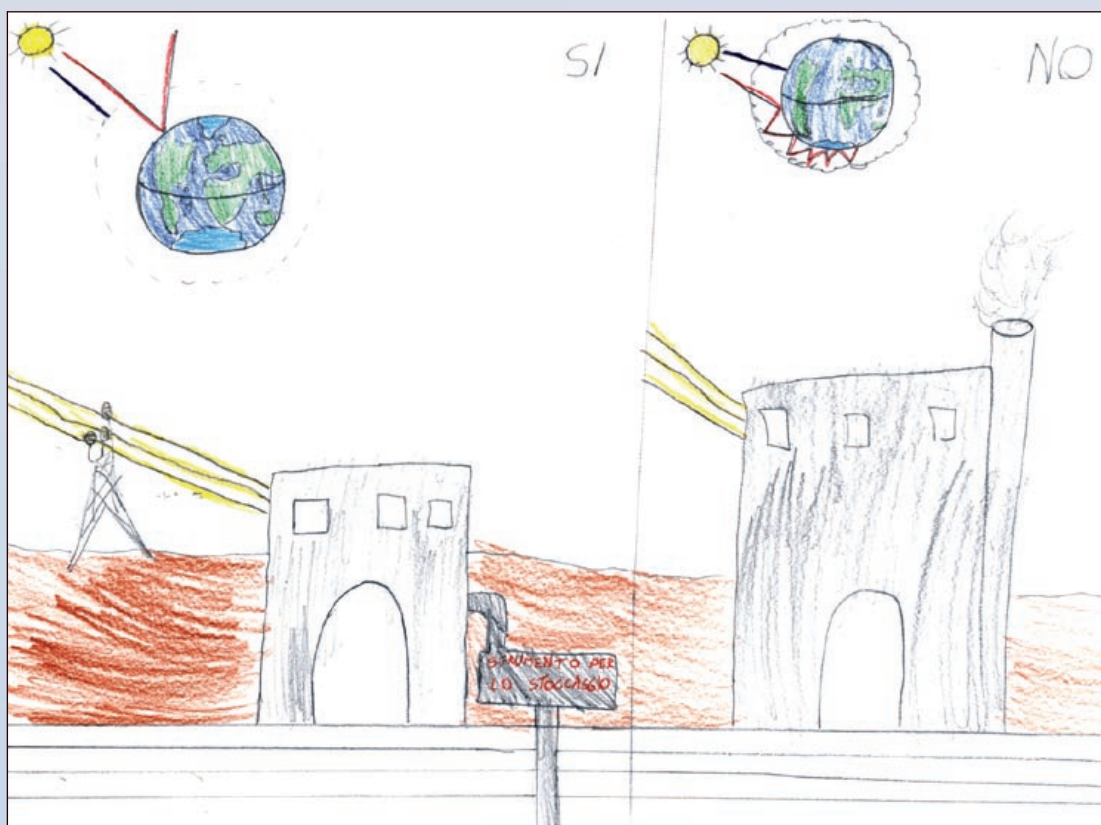
Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

Z anglického jazyka preložil Ľudovít Kucharič, jazyková úprava Janka Hrtusová, technické spracovanie Ladislav Martinský a Rudolf Szatlmayer.

Vízia do budúcnosti



Nikdy viac dymiace komíny
Potrubie dopraví CO₂ a uloží ho do podzemia
To je dobré pre našu zem



© Sapineza URS

Massimo, 10 rokov, Rím, Taliansko

Pre naše deti
Geologické ukladanie CO₂ má pre naše deti
zmysel

Klimatická zmena a potreba geologického ukladania CO₂

Obrázok 1.
Celkové emisie CO₂ spojené s ľudskou aktivitou na našej planéte predstavujú objem 30 miliárd ton (Gt) ročne, čo zodpovedá 8,1 Gt uhlíka. 6,5 Gt pochádza zo spaľovania fosílnych palív a 1,6 Gt z odlesňovania a poľnohospodárskych činností.

Ľudstvo vypúšťa do atmosféry nadmerné množstvo CO₂

V súčasnosti je známe, že civilizačné aktivity narušajú uhlíkový obeh na našej planéte. Do obdobia priemyselnej revolúcie a až takmer 10 000 rokov predtým tento vyrovnaný cyklus, ktorý zahŕňa prírodnú výmenu uhlíka medzi geosférou, biosférou, oceánmi a atmosférou, nasycoval atmosféru nízkou koncentráciou CO₂, a to približne na úrovni 280 ppm, t. j. 0,028 %. V období posledných 250 rokov „plodné“ spaľo-

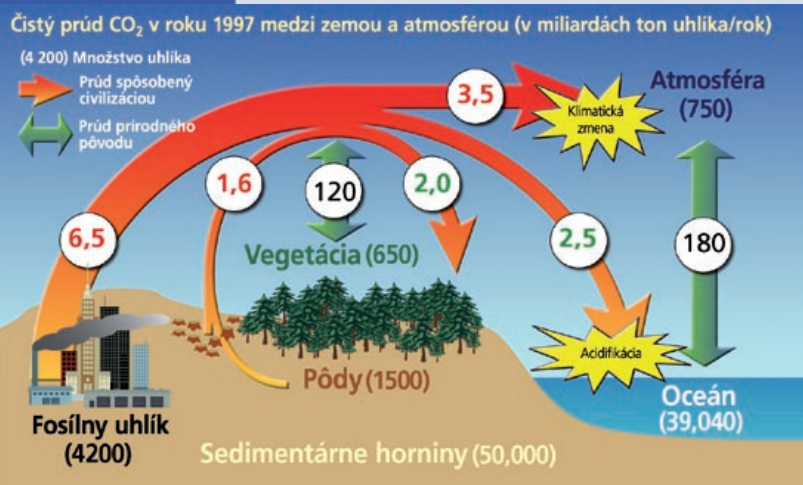
vanie fosílnych palív (uhlie, nafta a plyn) slúžiace na výrobu energie, kúrenie, priemysel a dopravu neustále zvyšovalo množstvo oxidu uhličitého vypúšťaného do atmosféry (**obr. 1**). Takmer polovica tohto CO₂ vyprodukovaného civilizáciou bola absorbovaná vegetáciou a rozpustená v oceánoch. V neskoršom období to spôsobilo acidifikáciu vôd, ktorá má potenciálne negatívny vplyv na morské rastliny a živočíchy. Zvyšok oxidu uhličitého sa akumuloval v atmosfére. Prispieva tak ku klimatickej zmene, pretože CO₂ je skleníkový plyn, ktorý zachytáva časť slnečného tepla a spôsobuje otepľovanie zemského povrchu. Je nevyhnutná okamžitá radikálna akcia, aby sme znížili súčasnú koncentráciu CO₂ dosahujúcu 387 ppm (čo je o 38 % viac ako koncentrácia v predindustriálnej ére – pred priemyselnou revolúciou), a tak zamedzili nárast v nadchádzajúcom desaťročí na kritickú úroveň 450 ppm. Experti z celého sveta sa zhodli, že presiahnutie tejto hranice by znamenalo nemožnosť odvrátenia dramatických následkov oteplenia planéty.

Navrátenie uhlíka späť do podzemia

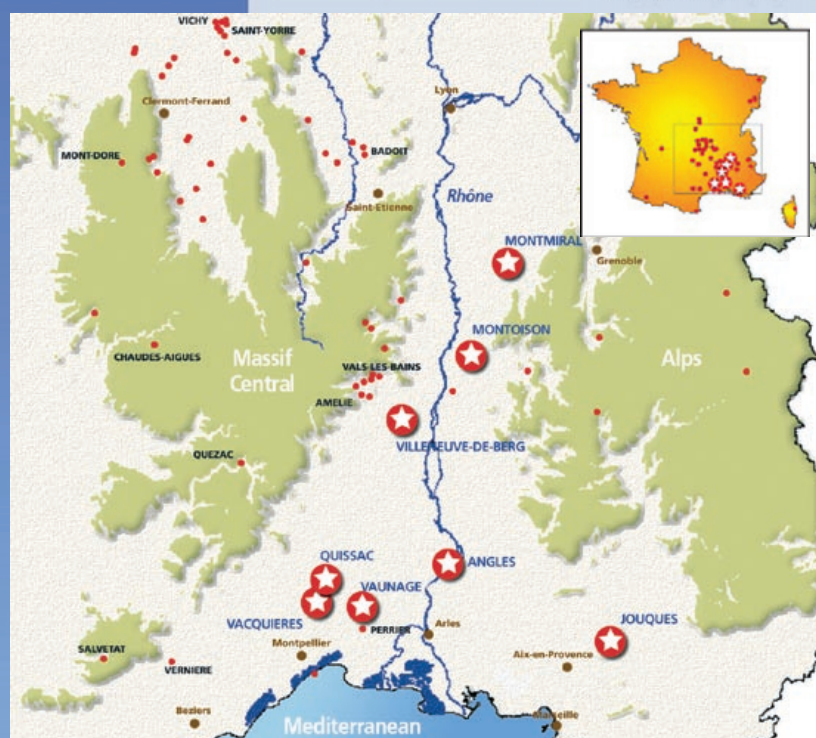
Náš svet bol a stále je veľmi silne závislý od fosílnych palív, a to od začiatku priemyselného veku, ktorý datujeme do roku 1750. Preto nie je prekvapujúce, že transformácia našej spoločnosti na spoločnosť založenú na klimaticky „priateľských“ energetických zdrojoch si bude vyžadovať čas aj peniaze. V súčasnosti potrebujeme prakticky okamžité riešenie, ktoré pomôže redukovať našu závislosť od fosílnych palív. Prvý krok je ich využitie v neznečisťujúcej forme. Tým sa získa čas potrebný na rozvoj technológií a infraštruktúry na budúce využitie obnoviteľných zdrojov energie. Jedným z takýchto riešení je vytvorenie uzatvoreného cyklu v systéme produkcie energií, v ktorom uhlík ťažený z povrchu a spod zemského povrchu vo forme uhlia, ropy a plynu sa vráti späť vo forme CO₂. Zaujímavý na tom je fakt, že podzemné ukladanie CO₂ nie je vynález ľudského dôvtipu, ale úplne prírodný rozsiahly fenomén, dokázaný v rezervoároch CO₂, ktoré existujú už tisíce, ba až milióny rokov. Jedným z takýchto príkladov je séria ôsmich prirodzených ložísk CO₂ v juhovýchodnom Francúzsku, objavených pri prieskume na ropu v 60. rokoch minulého storočia (**obr. 2**). Vo svete možno nájsť množstvo takýchto príkladov prirodzeného uloženia CO₂, ktoré dokazujú, že v geologických formáciách je možné uložiť CO₂ efektívne a bezpečne na extrémne dlhý čas.

Zachytávanie a ukladanie CO₂ – sľubná cesta na zmiernenie negatívnych vplyvov klimatickej zmeny

Zo spektra opatrení, ktoré je potrebné urgentne uviesť do činnosti na zmiernenie účinkov klimatickej zmeny a okysľovania oceánov, je zachytávanie a ukladanie CO₂ (CCS*). Ten-



Obrázok 2.
Provincie uhlíčitých vôd Francúzska.



© BRGM in@gé

© BRGM in@gé

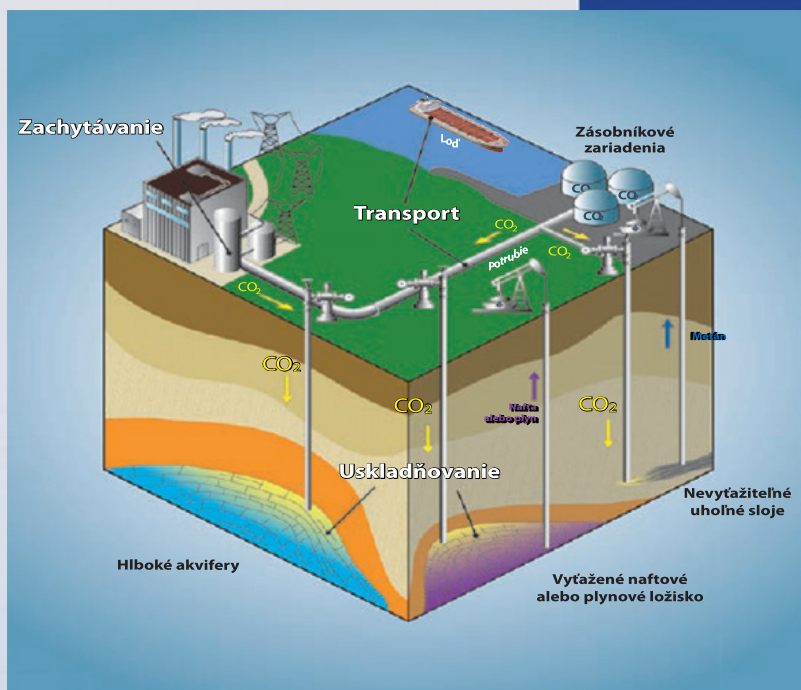
to proces môže zohrávať rozhodujúcu úlohu a môže prispieť k požadovanému 33 % zníženiu emisií CO₂ do roku 2050. CCS zahŕňa zachytávanie CO₂ na tepelných elektrárnach založených na princípe spaľovania uhlia a plynu, ako aj na priemyselných komplexoch (železiarne, cementárne, rafinérie...), jeho transport prostredníctvom potrubia alebo lodnou dopravou na vybrané skladovacie miesta a následne jeho vtláčanie (injektáž) cez vrty* do vhodného geologického prostredia, kde sa dlhodobo uloží (**obr. 3**). Pre rastúcu svetovú populáciu a zvyšujúce sa požiadavky na energiu v rozvojových krajinách, ako aj pre nedostatok veľkokapacitných „čistých“ zdrojov energie je využívanie fosílnych palív aj v najbližšom období nevyhnutnosťou. Civilizácia môže pokročiť ďalej ruka v ruke s CCS. Je to environmentálne priateľská cesta, prostredníctvom ktorej sa súčasne vytvorí premostenie do celosvetovo rozšírenej ekonomiky založenej na trvalo udržateľnej výrobe energií.

Technológia CCS vo svete sa rozvíja

Hlavné výskumné programy v problematike CCS sa realizujú v Európe, Spojených štátoch amerických, Kanade, Austrálii a v Japonsku od začiatku 90. rokov minulého storočia. Väčšina vedomostí sa získala na prvých svetových demonštratívnych projektoch, v rámci ktorých sa CO₂ injektával do podzemia už niekoľko rokov: Sleipner v Nórsku (ukladá sa približne 1 mil. ton ročne od roku 1996) (**obr. 4**), Weyburn v Kanade (okolo 1,8 mil. ton ročne od roku 2000) a In Salah v Alžírsku (asi 1 mil. ton od roku 2004). Medzinárodná spolupráca na poli ukladania CO₂ podporovaná IEAGHG* a CSLF* na uvedených a ostatných miestach je obzvlášť dôležitá pri prehľbovaní chápania a pri rozvoji celosvetovej vedeckej komunity a tvorí neoddeliteľnú zložku aktivít. Vynikajúcim príkladom toho je špeciálna správa IPCC* zaoberajúca sa zachytávaním a ukladáním emisií CO₂ (2005). Opisuje súčasný stav vedomostí a ťažkosti, ktoré je potrebné prekonať, aby sa umožnilo celosvetové zavedenie tejto technológie. Overené technické skúsenosti sú už k dispozícii a svet spoľahlivo smeruje do demonštratívnej fázy. Okrem toho je načrtnutý aj technický rozvoj, legislatívne, vykonávacie, ekonomické a politické štruktúry a existuje aj sociálne chápanie a podpora. V Európe je cieľom vytvoriť až 12 veľkých demonštratívnych projektov rozbehnutých do roku 2015, aby sa umožnilo celosvetové komerčné rozmiestnenie do roku 2020. Európska komisia vydala na tento účel *Balíček o klimatických zmenách a obnoviteľnej energii, ktorý navrhuje Smernicu na geologické ukladanie CO₂* a ostatné opatrenia na podporu rozvoja a bezpečného používania CCS.

Kľúčové otázky týkajúce sa geologického ukladania CO₂

CO₂GeoNet, sieť excelentnosti, bola vytvorená pod záštitou Európskej komisie ako skupina výskumných organizácií schopná zabezpečiť Európe popredné miesto v rozsiahlom medzinárodnom výskume. Jedným z cieľov CO₂GeoNet je komunikácia a jasné vedecké informácie o technologických aspektoch geologického ukladania CO₂ a podpora dialógu o dôležitých aspek-

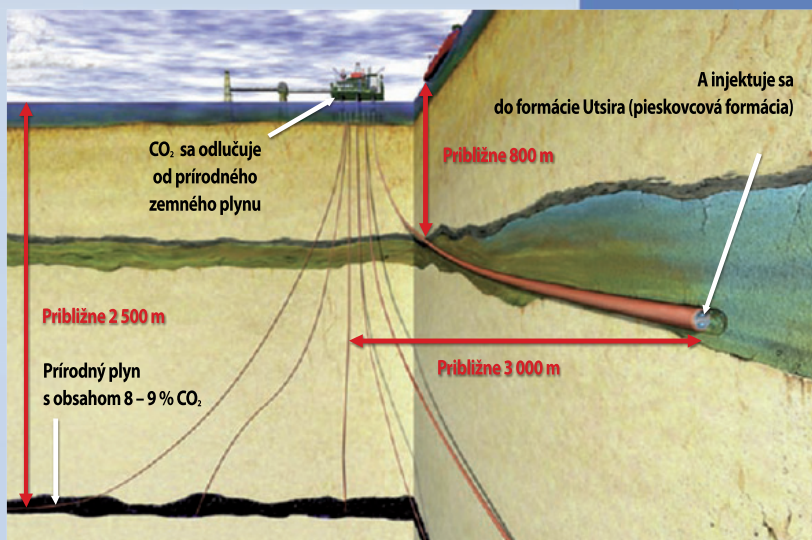


toch tejto životne dôležitej technológie. Výskumníci siete CO₂GeoNet majú pripravené základné odpovede na niekoľko často kladených otázok. Na nasledujúcich stranách je vysvetlenie, akým spôsobom sa geologické ukladanie CO₂ vykonáva, za akých podmienok je to možné a aké sú kritériá jeho bezpečnej a efektívnej realizácie.

Obrázok 4.

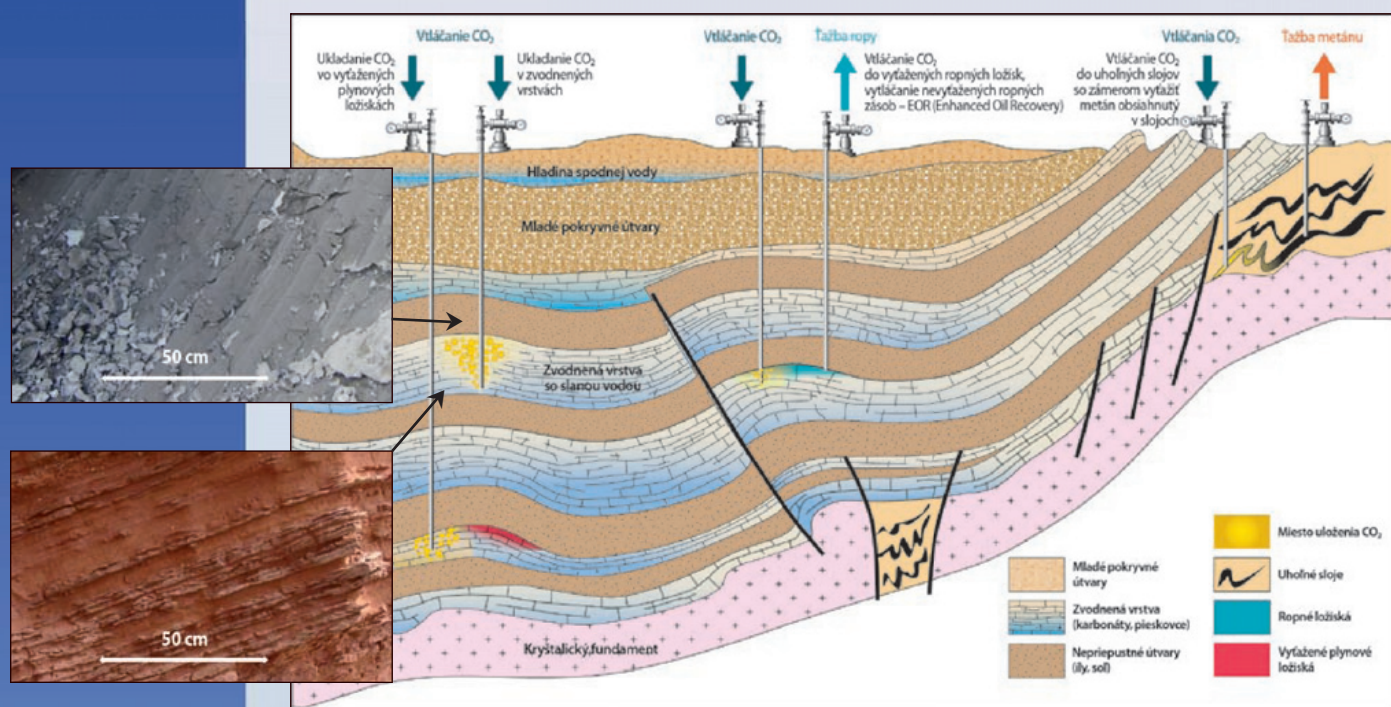
Vertikálny rez úložiskom Sleipner, Nórsko. Prírodný plyn (metán) sa ťaží v hĺbke 2 500 m, pričom obsahuje niekoľko % CO₂. Toto množstvo je potrebné odstrániť, aby sa dodržali obchodné štandardy. Preto namiesto uvoľnenia do atmosféry sa pri úprave zachytený CO₂ injektuje (vtláča) do hĺbky približne 1 000 m do pieskovcov Utsira akviferu*.

Obrázok 3. V elektrárnach sa CO₂ zachytáva separovaním od ostatných plynov. Potom sa stláča a dopravuje potrubím alebo lodnou dopravou na miesto geologického uloženia – hlboko uložené zvodnené súvrstvia so slanou vodou, vyťažované naftové a plynové ložiská alebo nevyťažiteľné uhľové sloje.



Kde a ako možno ukladať CO₂ v podzemí?

CO₂ sa nemôže ukladať v podzemí na ľubovoľnom mieste. Na tento účel sa musia nájsť vhodné horninové formácie. Potenciálne rezervoáre na geologické ukladanie CO₂ existujú prakticky na celom svete. Ponúkajú dostatočnú kapacitu na uskutočnenie podstatného príspevku k zmierneniu efektu klimatickej zmeny vyvolaného ľudstvom.



Obrázok 1. CO₂ sa vtláča do hlbokých geologických vrstiev poréznych a priepustných hornín (pieskovce v spodnejšej prílohe), nad ktorými ležia nepriepustné horniny (ilovce na hornej prílohe). Tie zabráňujú úniku CO₂ smerom na povrch. Hlavné možnosti ukladania:

1. vytlačené ropné a plynové ložiská s dotážením zvyškových zásob tam, kde je to možné – uložením CO₂ tieto zásoby vytlačíme na povrch na využitie;
2. zvodené vrstvy obsahujúce slanú vodu nevhodnú na konzumáciu;
3. hlboké neťažené uhoľné sloje, lokálne spojené s možnosťou ťažby metánu, ktorý obsahujú.

Na ukladanie CO₂ existujú tri základné možnosti (**obr. 1**):

1. vytlačené plynové a ropné ložiská – potrebné údaje sú známe z vyhľadávania a ťažby uhľovodíkov; ponúkajú okamžité možnosti na ukladanie CO₂;
2. slané akvifery (žvodené vrstvy) – poskytujú väčší potenciál na ukladanie, vo všeobecnosti však je málo relevantných údajov o potrebných charakteristikách;
3. neťažené uhoľné sloje – možnosť do budúcnosti, keď sa vyrieši problém, ako injektovať veľký objem CO₂ do nízko priepustného* uhlia.

Rezervoáre

Ak injektujeme (vtlačáme) CO₂ do vhodného rezervoára* v podzemí, akumuluje sa v póroch medzi zrnami horniny alebo v puklinových zónach. Takto vytlačá a nahrádza každé existujúce fluidum, ktoré sa v tomto priestore nachádzalo – plyn, vodu alebo ropu. Vhodné „hostiteľské“ horniny na ukladanie CO₂ musia mať preto vysokú porozitu* a permeabilitu* (priepustnosť). Takéto horninové súbory, ktoré sú výsledkom ukladania sedimentov v geologickej minulosti, sa bežne nachádzajú v tzv. sedimentárnych panvách. V miestach, kde sa tieto priepustné

horniny striedajú s nepriepustnými, nepriepustné horniny pôsobia ako tesniaci prvok. V takýchto sedimentárnych panvách sa často nachádzajú ložiská uhľovodíkov, ako aj ložiská prirodzeného CO₂. Dokazujú schopnosť zadržať tieto fluidá v dlhom časovom horizonte, pretože v takýchto pasciach sú ropa, plyn a CO₂ viazané od svojho vzniku, už milióny rokov. Podpovrchová situácia sa často na obrázkoch zobrazuje ako zjednodušená, homogénne tortovo vrstvitá štruktúra poukazujúca na vhodné možnosti ukladania CO₂. Reálna geologická situácia je v skutočnosti komplikovanejšia. Rezervoár a tesniaci nadložný komplex tvoria nerovnomerne rozmiestnené horninové formácie, často lokálne rozdrvené zlomami. Je to dôsledok heterogénneho geologického vývoja. Na základe geologických skúseností je potrebné získať také znalosti o hlbokých parametroch, ktoré by zaručili vhodnosť podzemných štruktúr na trvalé uloženie CO₂. Potenciálne úložiská oxidu uhličitého musia spĺňať množstvo kritérií, z ktorých najpodstatnejšie sú:

- dostatočná porozita, permeabilita a skladovacia kapacita;
- prítomnosť nadložnej tesniacej horniny* – tzv. cap rock (napríklad ílu, ílovca, slieňa či soli), ktorá zabráni migrácii CO₂ smerom na zemský povrch;

- prítomnosť „pascových štruktúr“, ktoré predstavujú horniny uložené v tvare klenby, regulujúce a riadiace migráciu CO_2 v rezervoári (kolektore);
- lokalizácia v hĺbke väčšej ako 800 m pod povrchom, kde tlak a teplota sú dostatočne vysoké na to, aby bol CO_2 stlačený do fluidnej fázy, čím sa minimalizuje priestor potrebný na jeho uloženie;
- neprítomnosť pitnej vody; CO_2 sa nemôže vtláčať do zvodnených horizontov (zvodnencov), ktoré slúžia na zásobovanie pitnou vodou.

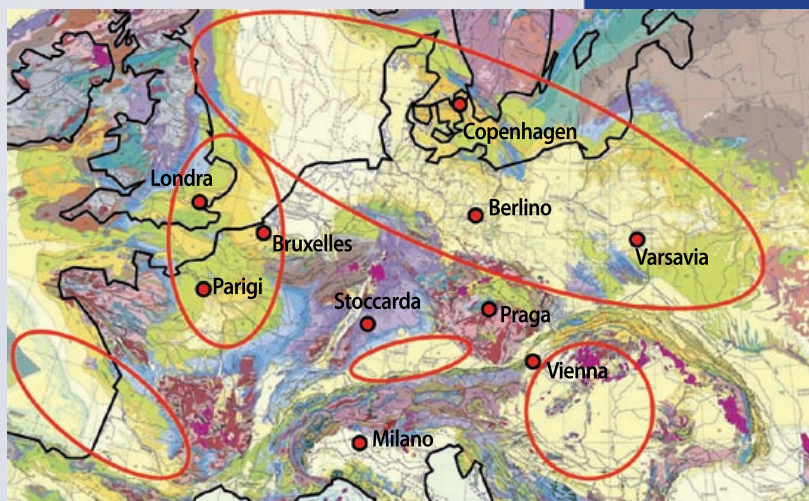
Kde sú vhodné miesta na uloženie v Európe?

Sedimentárne panvy (bazény) sú rozšírené po celom európskom kontinente a blízkom okolí, napr. pod morským dnom v Severnom mori alebo okolo alpskej horskej reťaze na súši (**obr. 2**). Množstvo sedimentárnych paniev spĺňa kritériá na geologické ukladanie a v súčasnosti ich mapujú a skúmajú tímy odborníkov. Ostatné európske oblasti, ktoré z geologického hľadiska buduje konsolidovaná kôra, ako je napríklad väčšina Škandinávského polostrova, nemajú vyvinuté horniny vhodné na ukladanie CO_2 . Jedným z príkladov je územie s obrovským potenciálom na ukladanie, južný permský bazén, ktoré siaha od Anglicka až po Poľsko (pozri najväčšiu elipsu na obr. 2). Sedimenty vyvinuté v tomto priestore počas horninotvorných procesov získali charakteristickú črtu vytvorením pórových priestorov, ktoré sa zaplnili slanou vodou, ropou alebo prirodzeným plynom. Ílovité vrstvy vyvinuté medzi pórovitými pieskovicami sa spevnili na nízko priepustné polohy, ktoré zabráňujú výstupu fluíd. Väčšina takýchto pieskovcových horizontov je situovaná v hĺbke medzi 1 – 4 km, kde je dostatočne veľký tlak na to, aby sa plyn uložil v „hustej“ fáze, vo forme kvapaliny. Koncentrácia soli vo formačných vodách, ktoré obsahujú akvifery, sa zvyšuje s hĺbkou v intervale od 100 do 400 g/l, a teda voda je oveľa slanšia ako morská (35 g/l). Slané vrstvy spolu s inými vrstvami vyplňajúcimi panvu sa pri horotvorných pohyboch plasticky deformovali vo forme vrásových kónických štruktúr. Tie následne slúžia ako pasce pre prírodný plyn. Takéto pasce sa študujú v rámci pilotných projektov aj ako možné miesta na ukladanie CO_2 .

Skladovacia kapacita

Vedomosti o kapacite úložiska CO_2 sú potrebné tak pre politikov a výkonné orgány, ako aj pre operátorov na úložisku. Skladovacie kapacity sú v prvopočiatočnom stave výskumu zvyčajne veľmi približné, založené na priestorovom rozšírení vhodnej geologickej formácie. Kapacita sa môže určiť v rôznych mierkach, od generálnej na približný odhad cez panvovú a rezervoárovú mierku, v ktorej sa počíta presnejší skladovací objem. Pri počítaní sa berie do úvahy rôznorodosť a zložitosť reálnej geologickej štruktúry.

Objemová kapacita. Publikované údaje o kapacite v jednotlivých štátoch EÚ sú vo všeobecnosti založené na výpočte objemu formačných pórov. Skladovacia kapacita danej geologickej formácie sa vypočíta násobením jej plošnej rozlohy s hrúbkou, priemernou porozitou



Obrázok 2. Geologická mapa Európy s oblasťami vývinu hlavných sedimentárnych paniev (červené elipsy), kde sa môžu nájsť vhodné úložiská CO_2 (na základe Geologickej mapy Európy v mierke 1 : 5 000 000).

a priemernou hustotou CO_2 v danej hĺbke rezervoára. Pretože pórové priestory sú vo zvodnenej vrstve zaplnené slanou vodou, len malá časť tohto objemu sa môže zaplniť, teda použiť na uloženie CO_2 . Väčšinou sa predpokladá, že je to okolo 1 – 3 %. Tento koeficient skladovacej kapacity sa používa vtedy, ak sa určuje objemová kapacita.

Realistická kapacita. Tento odhad kapacity sa robí v takých prípadoch, keď máme k dispozícii detailné výsledky výskumu z konkrétneho miesta plánovaného úložiska. Hrúbka kolektorového horizontu nemusí byť konštantná a rezervoárové vlastnosti sa môžu meniť na veľmi krátkych vzdialenostiach. Na základe takýchto informácií sa pomocou počítačovej simulácie pred injektovaním CO_2 modeluje pohyb v kolektorovom horizonte (rezervoári). Tým sa získava obraz o realistickej skladovacej kapacite.

Možná kapacita. Kapacita nie je len otázkou fyziky hornín. Socioekonomické faktory majú vplyv aj na skutočnosť, či vhodné miesto na uloženie CO_2 bude využité alebo nie. Napríklad prenos CO_2 zo zdroja emisií do miesta na uloženie ovplyvnia náklady na dopravu. Skladovacia kapacita závisí aj od čistoty CO_2 , pretože prítomnosť iných plynov v prúde CO_2 znižuje rezervoárový objem počítaný len na samotný CO_2 . Posledné slovo o tom, či sa plánované úložisko CO_2 skutočne bude využívať alebo nie, nakoniec budú mať politické rozhodnutia a schválenie verejnosťou.



Záverom môžeme zdôrazniť, že máme vedomosti o kapacitách na uloženie CO_2 v Európe, ktoré sú dostatočne veľké, dokonca aj pri uvážení nejasností týkajúcich sa zložitosti a nehomogenosti úložiska a socioekonomických faktorov. Podľa projektu EÚ GESTCO* skladovacie kapacity v uhľovodíkových ložiskách v Severnom mori a jeho okolí sú odhadnuté na objem 37 Gt. Umožnili by činnosť veľkých zariadení na injektáž CO_2 na niekoľko desaťročí. Aktualizácia a ďalšie mapovanie skladovacích možností v Európe sú predmetom prebiehajúceho výskumu v jednotlivých členských štátoch EÚ, napokon aj projekt EU GeoCapacity*.

Ako môžeme dopravovať a zatláčať veľké množstvá CO₂?

Po zachytení v priemyselnom objekte sa CO₂ stlačí, prepraví a nakoniec vtlačí do úložiska prostredníctvom jedného alebo niekoľkých injektážnych vrtov. Celý reťazec CCS by mal byť optimalizovaný tak, aby sa umožnilo uloženie niekoľko miliónov ton CO₂ každý rok.

Stlačenie

CO₂ sa stláča do formy hustého fluida, ktoré zaberá podstatne menší objem ako plyn. Po separovaní CO₂ od spalín v elektrárni alebo priemyselnom zariadení je výsledkom jeho vysoká koncentrácia. Prúd CO₂ sa dehydratuje a stlačí, aby jeho doprava a uloženie boli čo najefektívnejšie (**obr. 1**). Dehydratácia je nutná kvôli zamedzeniu korózii zariadenia a infraštruktúry a musí prebiehať pod vysokým tlakom, aby sa nevytvárali hydráty (pevné kryštály tvrdé ako ľad, ktoré môžu upchať prístrojové zariadenie a potrubie). Kompresia sa realizuje spolu s dehydratáciou v niekoľkostupňovom procese: opakovaný cyklus kompresie, ochladzovanie a separácia vody. Tlak, teplota a obsah vody sú parametre, zabezpečením ktorých sa sa CO₂ prispôsobí na prepravu a pripraví na tlakové požiadavky v úložisku. Kľúčovými faktormi pri navrhovaní schémy kompresorovej jednotky sú rýchlosť prúdu CO₂, nasávanie a plniaci tlak, teplotná kapacita plynu a efektivita kompresora. Technológia kompresie plynu je dostupná a široko sa používa v rôznych priemyselných odvetviach.

Doprava

CO₂ sa môže prepravovať potrubím alebo lodnými tankermi. Lodná doprava sa v súčasnosti využíva na priemyselné účely iba vo veľmi malom meradle (10 000 – 15 000 m³). V budúcnosti by sa mohla stať atraktívnou alternatívou pri projektoch CCS, kde zdroje emisií sú umiestnené v blízkosti pobrežia a pritom nie veľmi ďaleko od vybraného úložiska. Lode

používané na dopravu skvapalneného plynu (LPG) sú vhodné aj na prepravu CO₂. Predovšetkým polochladiace systémy, kde sa CO₂ stláča a ochladzuje, sú vhodné na jeho prepravu v kvapalnom stave. Najnovšie lode na prepravu LPG majú objem do 200 000 m³ a sú schopné prepraviť 230 000 ton CO₂. Lodná doprava však neposkytuje nepretržitý logistický prúd, a preto určité dočasné skladovacie možnosti sa požadujú v prístavoch na spracovanie a prekládku CO₂. Potrubná preprava sa bežne využíva na veľké množstvá CO₂, ktoré používajú naftové spoločnosti v Enhanced Oil Recovery* (približne 3 000 km potrubí vo svete, najviac v USA). Tento spôsob je lacnejší ako lodná doprava a umožňuje aj výhody nepretrženého toku CO₂ z miesta produkcie do úložiska. Všetky existujúce potrubia na CO₂ pracujú vo vysokotlakovom režime za superkritických podmienok, čo znamená, že CO₂ sa správa ako plyn, ale má hustotu kvapaliny. Potrubná preprava – množstvo prepraveného plynu – závisí od troch dôležitých faktorov: priemer potrubia, tlak plynu po celej trase a hrúbka stien potrubia.

Vtláčanie

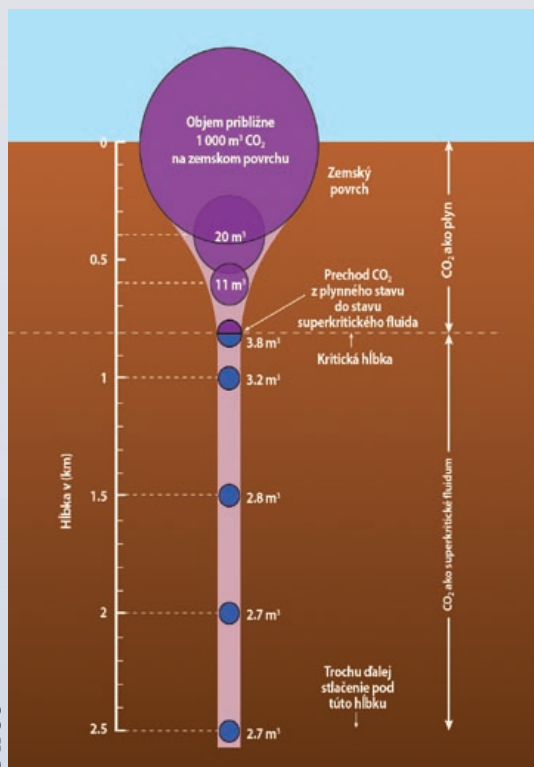
Po doprave potrubím prichádza CO₂ na miesto úložiska a pod tlakom sa vtlačá (injektuje) do rezervoára (**obr. 2**). Injektážny tlak musí byť podstatne vyšší ako tlak v rezervoári, aby sa rezervoárové fluidá mohli vytlačiť ďalej od injekčného bodu (vrtu). Počet injektážnych vrtov závisí od množstva CO₂, ktoré sa má uložiť, rýchlosti injektáže (objem CO₂ injektovaný za 1 hodinu), priepustnosti a hrúbky rezervoára, maximálneho bezpečného injektážneho tlaku a typu vrtu. Hlavnou úlohou je dlhotrvajúca kontrola uloženého CO₂ a musí sa zabezpečiť hydraulická integrita celého úložiska.

Vysoká injekčná rýchlosť môže spôsobiť zvýšenie tlaku v bode injektáže, zvlášť v nízko priepustných kolektorových horizontoch. Injekčný tlak by nemal zvyčajne presiahnuť lomový tlak horniny, pretože by sa mohol poškodiť kolektorový horizont a nadložné tesnenie. Na tieto účely sa využívajú geomechanické analýzy a modely, aby sa identifikovala úroveň maximálneho možného tlaku a tým sa vyhlod porušeniu tesnenia (polámaniu) úložiska.

Intenzitu vtláčania CO₂ do úložiska ovplyvňujú aj chemické procesy. Závisí to od horninového typu, ktorý buduje kolektorový horizont, od tzv. rezervoárových podmienok (ako sú napr. teplota, tlak, objem, koncentrácia atď...), minerálneho rozpúšťania a cementačných procesov, ktoré prebiehajú najmä v blízkosti injektážneho vrtu. Všetky tieto parametre majú vplyv na zvýše-

Obrázok 1.
Etapy geologického ukladania CO₂. Aby sme preniesli CO₂ z emisného miesta (elektrárne alebo inej priemyselnej prevádzky) na miesto jeho bezpečného a trvalého uloženia, musíme prejsť celou reťazou operácií vrátane zachytenia, stlačenia, prepravy a zatlačenia.





Obrázok 2.

Keď zatláčame CO_2 do podzemia, v hĺbke okolo 800 m pod povrchom sa stáva hustým a superkritickým* fluidom. Jeho objem sa dramaticky redukuje z 1 000 m^3 na povrchu na 2,7 m^3 v hĺbke 2 km. Toto je jeden z faktorov, ktoré robia geologické ukladanie veľkých množstiev CO_2 atraktívnym.

nie alebo zníženie intenzity injeckáže. Okamžite po injektovaní sa časť CO_2 rozpúšťa v slanej vode kolektora. To spôsobuje znížovanie pH^* , vyrovnávané rozpúšťaním karbonátových minerálov, ktoré sú obsiahnuté v horninách kolektora. Karbonáty sú prvé minerály, ktoré sa rozpúšťajú, pretože ich reakčná rýchlosť je veľmi vysoká. Tento proces sa začína okamžite po injeckáži. Proces rozpúšťania hornín môže takto zvýšiť ich porozitu a tým aj ovplyvniť intenzitu injeckáže*. Na druhej strane, proces rozpúšťania môže spôsobiť opätovné vyžrážanie minerálov. Tým dochádza k zacementovaniu (upchaniu) kolektora v blízkosti vrtu. Vysoká rýchlosť prúdu injektovaného plynu sa môže využiť na obmedzenie redukcie permeability v blízkosti vrtu. Tým sa oblasť geochemickej rovnováhy vyžrážania premiestni do väčšej vzdialenosti od injeckážneho bodu. Ďalší fenomén, ktorý vzniká pri zatláčaní, je vysušenie. Zvyšková voda, ktorá sa nachádza v blízkosti injeckážneho vrtu, sa po acidifikačnej fáze (okyslení) rozpúšťa v injektovanom suchom plyne. Ten recipročne koncentruje chemické látky v solankách*. Keď má solanka dostatočne vysokú koncentráciu, minerály (soli) sa vyžrážajú. Tým sa redukuje priepustnosť okolo vrtu.

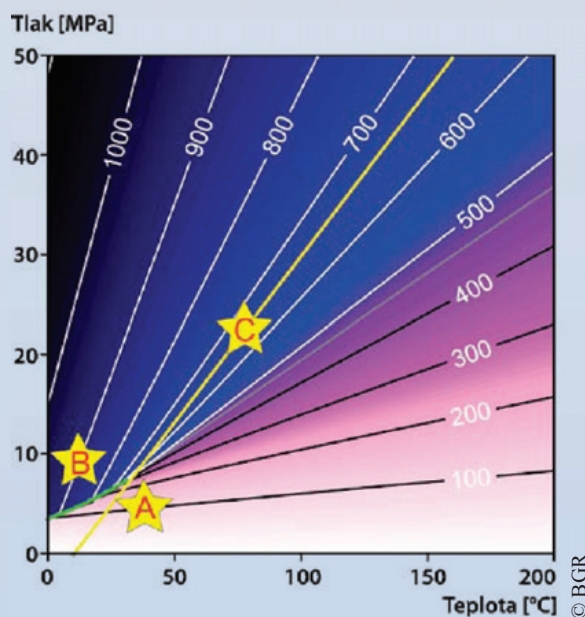
Tieto chemické reakcie spojené s injeckážou závisia od komplexu interakčných procesov, ktoré prebiehajú v blízkosti injeckážneho vrtu, ale vysoko závisia aj od času a vzdialenosti od vrtu. Tieto efekty je možné určiť numerickým modelovaním. S intenzitou injeckáže je potreb-

né zaobchádzať veľmi opatrne, aby sa vyhol procesom, ktoré by mohli obmedziť zatláčanie plánovaného množstva CO_2 .

Zloženie prúdu CO_2

Zloženie a čistota prúdu CO_2 , ktorý je výsledkom zachytávacích procesov, majú zásadný vplyv na všetky následné činnosti v procese ukladania CO_2 . Prítomnosť niekoľko percent iných substancií, ako sú voda, sírovodík (H_2S), oxidy síry a dusíka (SO_x , NO_x), dusík (N_2) a kyslík (O_2), budú ovplyvňovať fyzikálne a chemické vlastnosti CO_2 a súvisiace procesy. Prítomnosť takýchto látok sa musí preto opatrne zvažovať v kompresnej, prepravnej a zatláčacej etape a tiež pri nastavovaní prevádzkových podmienok a prístrojového vybavenia.

Preprava a zatláčanie veľkého množstva CO_2 sa v súčasnosti dá realizovať. Treba však mať na zreteli, že ak má mať geologické ukladanie CO_2 široké využitie, všetky etapy tvoriace celú technológiu musia byť „šité na mieru“ pre ten-ktorý konkrétny projekt. Rozhodujúcimi parametrami sú termodynamické vlastnosti prúdu CO_2 (obr. 3), rýchlosť prúdu a podmienky v pri-vádzači a kolektore.



Obrázok 3.

Hustota čistého CO_2 ako funkcia teploty a tlaku. Žltá čiara korešponduje s typickými teplotnými a tlakovými podmienkami v sedimentárnych bazénoch. Pri hĺbke väčšej ako 800 m pod povrchom (~8 MPa) podmienky v kolektore umožňujú vysokú hustotu (modré tieňovanie). Zelená krivka znázorňuje fázovú hranicu medzi plynným a kvapalným CO_2 . Typické tlakové a teplotné podmienky na zachytávanie (A), prepravu (B) a ukladanie (C).

Ako sa správa CO₂ hneď po vtláčení do kolektora?

Okamžite po vtláčení do kolektorového horizontu CO₂ stúpa smerom dohora (podobne ako v sódovej fľaši), vyplňajúc póry v hornine pod nadložným tesniacim horizontom. Po čase sa časť CO₂ rozpustí, prípadne sa transformuje na minerály. Tieto procesy trvajú rôzne dlhý čas a prispievajú k trvalému zachyteniu CO₂.

Zachytávací mechanizmus

Pri vtláčaní do kolektora CO₂ vypĺňa priestory v póroch horniny, ktoré sú vo väčšine prípadov vyplnené slanou vodou. Hneď pri zatlačení CO₂ sa začínajú nasledujúce procesy. Najskôr si musíme uvedomiť, že prvotným mechanizmom je zabránenie výstupu CO₂ smerom na povrch. Ostatné tri procesy ovplyvňujú zvýšenie efektívnosti a bezpečnosti uloženia v čase.

1. Akumulácia pod tesniacim horizontom (štruktúrne zachytenie)

Pretože CO₂ je ľahší ako voda, začína postupovať smerom na povrch. Tento pohyb sa zastaví, keď CO₂ dosiahne tesniaci (nepriepustný) horizont v nadloží, ktorý mu nedovolí v ďalšom postupe (tzv. *cap rock*). Tento tesniaci horizont zvyčajne tvoria íly alebo soľ. Pôsobí ako pasca pre postupujúci CO₂, pričom spôsobuje jeho akumuláciu na tejto geologickej hranici. **Obrázok 1** dokumentuje pohyb CO₂ smerom dohora cez pórové priestory v hornine kolektora (modrá farba), kým nedosiahne hranicu s tesniacim nadložným horizontom.

2. Zachytenie v malých póroch (reziduálne – zvyškové – zachytenie)

Tento druh zachytenia nastáva v prípadoch, keď sú rozmery pórov príliš malé na prechod CO₂ smerom na povrch, takže CO₂ nemôže pokračovať v tomto smere napriek tomu, že jeho hustota je odlišná od hustoty okolitej vody. Uvedený proces nastáva počas pohybu CO₂ smerom dohora a počas neho sa znehybní (zachytí) niekoľko percent vtláčaného CO₂ v závislosti od vlastností hornín v kolektore.

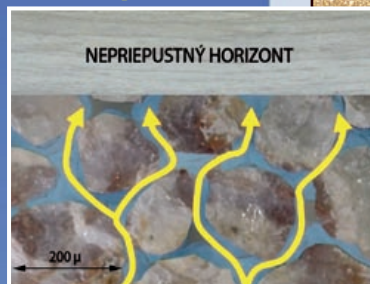
3. Rozpúšťanie (rozpúšťacie zachytenie)

Malé množstvo vtláčaného CO₂ sa rozpustí alebo prinesie do roztoku prostredníctvom slanej vody, ktorá je už prítomná v pórových priestoroch kolektora. Voda, v ktorej je rozpustený CO₂, je v dôsledku rozpúšťania ťažšia ako pôvodná voda v kolektore. To spôsobuje jej pokles na dno kolektorového horizontu (rezervoára). Intenzita rozpúšťania závisí od kontaktu medzi CO₂ a slanou vodou. Množstvo CO₂, ktoré sa môže rozpustiť, je limitované maximálnou koncentráciou. Podľa pohybu zatlačaného CO₂ smerom nahor a vody s rozpusteným CO₂ smerom nadol sa však neprerušene obnovuje kontakt medzi CO₂ a slanou vodou. To má za následok zvýšenie množstva CO₂, ktoré sa v nej môže rozpustiť. Tieto procesy sú relatívne pomalé, pretože prebiehajú v úzkych pórových priestoroch. Približný odhad na úložisku Sleipner indikuje, že približne 15 % zatlačaného CO₂ sa rozpustí po 10 rokoch injektáže.

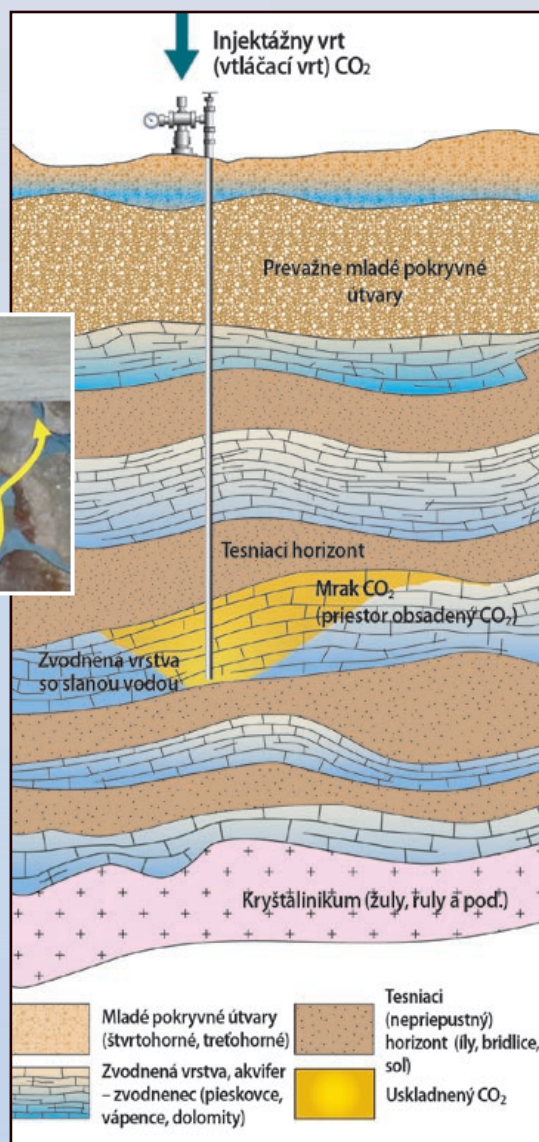
4. Mineralizácia (minerálne zachytenie, minerálna karbonatizácia)

CO₂ zvlášť v kombinácii so slanou vodou v rezervoári môže reagovať s minerálmi

Pohľad cez mikroskop.



Obrázok 1. Vtláčený CO₂ je ľahší ako voda a stúpa smerom dohora, až kým sa nezastaví na bariére nepriepustného horizontu.





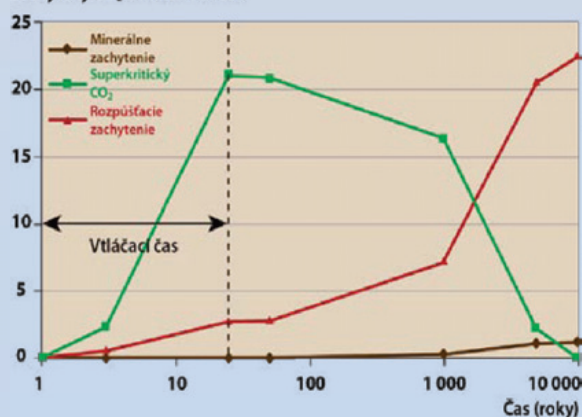
Obrázok 2.
CO₂ migruje smerom dohora (svetlomodré bublinky), rozpúšťa zrná hornín a reaguje s nimi. To vedie k vyzrážaniu karbonátových minerálov na povrchu zŕn (biele lemy).

a tým v skutočnosti vytvárať horniny. Určité minerály sa môžu rozpúšťať, iné zasa vyzrážať, a to v závislosti od stupňa pH a zloženia hornín v kolektore (obr. 2). Odhady zo Sleipner naznačujú, že prostredníctvom mineralizácie sa zachytí iba malé množstvo CO₂ počas veľmi dlhého obdobia. Po 10 000 rokoch by mohlo byť mineralizované iba 5 % injektovaného CO₂, kým 95 % by sa mohlo bez zvyšku rozpustiť, zostávajúc ako oddelená hustá fáza.

Relatívna dôležitosť týchto zachytávacích mechanizmov je pri každom ťažisku špecifická, t. j. závisí od charakteristík každej jednotlivej lokality. Napríklad v pasciach s klenbovým uzáverom by CO₂ mal zostať prevažne v hustej fáze dokonca po dlhý čas, kým v ťažiskách s málo vyklenutým stropom väčšina CO₂ sa hlavne rozpustí.

Vývoj zachytenia CO₂ proporcionálne v jednotlivých zachytávacích mechanizmoch v prípade ťažiska Sleipner je ilustrovaný na obr. 3.

Zachytený CO₂ v miliónoch ton



Obrázok 3.
Správanie CO₂ v kolektorovom horizonte v rôznych formách zachytenia (pozri text, body 1 – 4) na ťažisku Sleipner podľa výsledku hydrodynamického modelovania. CO₂ je zachytený v superkritickom stave prostredníctvom mechanizmov 1 a 2, rozpustený mechanizmom 3 a ďalej prispieva k vytváraniu minerálnych foriem podľa mechanizmu 4.

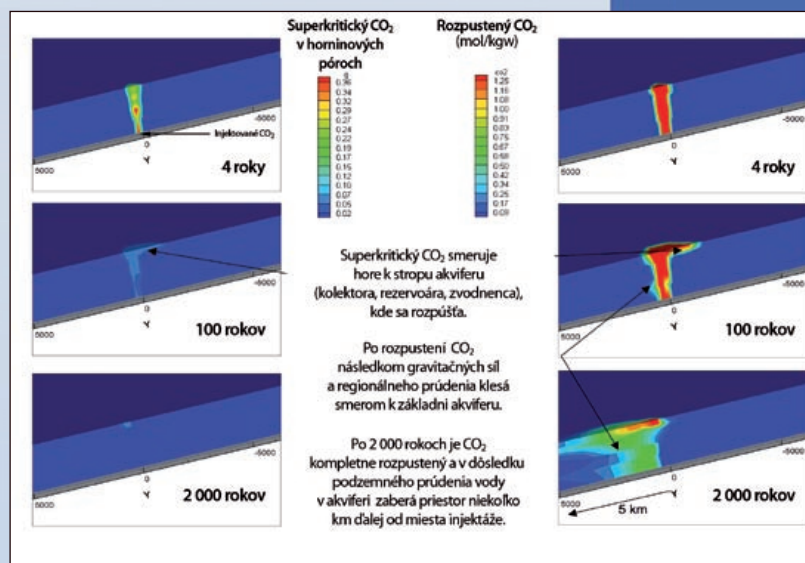
Ako sme sa to všetko dozvedeli?

Vedomosti o týchto procesoch prichádzajú zo štyroch hlavných zdrojov informácií:

- **Laboratórne merania.** Experimenty v malých mierkach v prípade mineralizácie, prúdu a rozpúšťania môžu prebiehať na vzorkách hornín a poskytovať prienik do krátkodobých a detailných procesov.
- **Numerické modelovanie.** Boli vyvinuté počítačové softvéry, pomocou ktorých možno predpovedať správanie CO₂ počas dlhého času (obr. 4). Laboratórne pokusy sa využívajú na kalibráciu numerického modelovania.
- **Štúdium prirodzených ložísk CO₂.** CO₂ (vo všeobecnosti vulkanického pôvodu) bol zachytený v podzemí na dlhý čas, až milióny rokov. Takéto prostredie sa uvádza ako „prírodný analóg“. Tieto miesta poskytujú informácie o správaní plynu v podzemí vo veľmi dlhých časových horizontoch.
- **Monitoring existujúcich demonštratívnych projektov geologického ukladania CO₂.** Príkladom sú Sleipner (pod dnom Severného mora, Nórsko), Weyburn (na pevnine, Kanada), In Salah (Sahara, Alžírsko) a K12-B (pod morským dnom, Holandsko). Výsledky modelovania v krátkodobom časovom úseku sa takto môžu porovnávať s reálnymi terénnymi údajmi a tým sú nápomocné pri spresňovaní výsledkov modelovania.

Iba prostredníctvom vzájomnej (krížovej) informovanosti a výmeny poznatkov z týchto štyroch

Obrázok 4.
3D modelovanie migrácie CO₂ v rezervoári po 4 rokoch. Na obrázku sú znázornené stavy superkritického CO₂ (vľavo) a rozpusteného CO₂ (vpravo) v sol'anke po 4, 100 a 2 000 rokoch po vtláčaní. Modelovanie je založené na terénnych údajoch a experimentoch.



lokalít je možné získať spoľahlivé údaje zo všetkých procesov, odohrávajúcich sa v hĺbke tisíc a viac metrov.

Zdôrazňujeme, že cieľom z dlhodobého časového hľadiska je dosiahnuť zvýšenie bezpečnosti miesta ťažiska CO₂. Najdôležitejším bodom je nájsť ťažisko s takým vhodným krycím horizontom, aby sme sa mohli vyhnúť štruktúrnemu zachyteniu, ktoré vytvára tlak na strop ťažiska a tým sa zvyšuje riziko porušenia jeho integrity. Procesy súvisiace s rozpúšťacím, minerálnym a reziduálnym zachytením zabraňujú migrácii CO₂ smerom na povrch a tým akumulujú CO₂ v spodných častiach kolektorového horizontu.

Mohol by CO₂ uniknúť z úložiska? Ak áno, aké by boli následky?

Na základe štúdia prírodných systémov možno predpokladať, že v prípade dôsledne vybraných úložísk sa neočakávajú žiadne významné úniky. Prírodné rezervoáre (ložiská zemného plynu) pomáhajú porozumieť podmienkam, pri ktorých sa plyn v úložisku zadržiava, alebo naopak, uniká. Lokality, kde možno pozorovať prírodné úniky, pomáhajú teda pochopiť, aké by mohli byť dôsledky úniku CO₂.

Únikové cesty

Potenciálne únikové cesty sú buď umelo vytvorené diela (napr. vrtý zasahujúce do úložiska), alebo „prírodné cesty“ (napr. geologické zlomy, resp. zlomové systémy).

Prevádzkové, ale aj opustené vrtý (napr. v naftovo-plynových ložiskách) môžu predstavovať migračné cesty, pretože tvoria nielen priame spojenie medzi povrchom a rezervoárom, ale zvyčajne sú vystrojené materiálom, ktorý môže v dlhodobom časovom horizonte korodovať (obr. 1). Komplikáciou navyše môže byť aj skutočnosť, že nie všetky vrtý sa realizovali rovnakou technológiou. Závisí to od času, keď sa uskutočnili, a preto sú vo všeobecnosti nové vrtý bezpečnejšie ako staré, pretože sa predpokladá využitie modernejších technológií. Možno však očakávať, že riziko únikov pozdĺž vrtov bude relatívne nízke, pretože vrtý sa môžu efektívne monitorovať pri využití citlivých geochemických a geofyzikálnych metód. Okrem toho, v naftovo-plynovom priemysle existujú technológie na akékoľvek nápravné opatrenia, ak vznikne potreba sanácie únikov.

Problém únikov pozdĺž zlomov alebo puklín, ktoré by mohli existovať v tesniacom horizonte alebo všeobecne v nadloží* úložiska, je zložitejší. Môže ísť o nepravidelné štruktúry s premenlivou priepustnosťou. Správne vedecké a technické pochopenie prírodných systémov s únikami a bez nich nám umožní navrhnuť také projekty na ukla-

danie CO₂, ktoré budú vykazovať rovnaké charakteristiky ako prirodzené ložiská CO₂ alebo metánu. Tie zadržiujú tieto plyny bezpečne útesnené stovky tisícov až miliónov rokov.

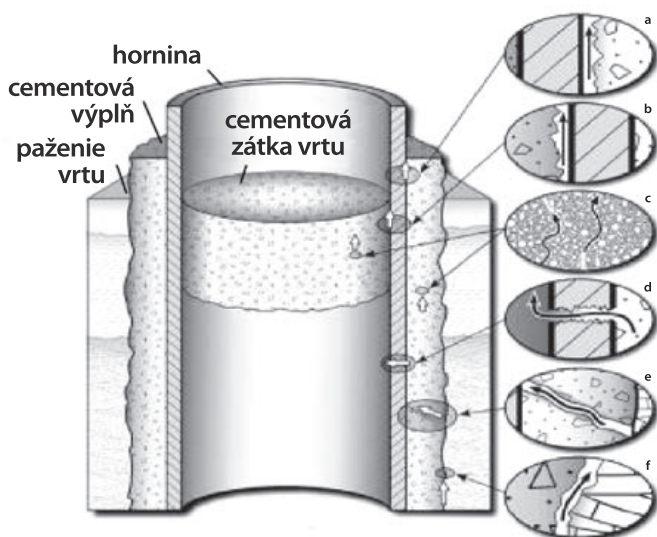
Prírodné analógy – čo sme sa naučili

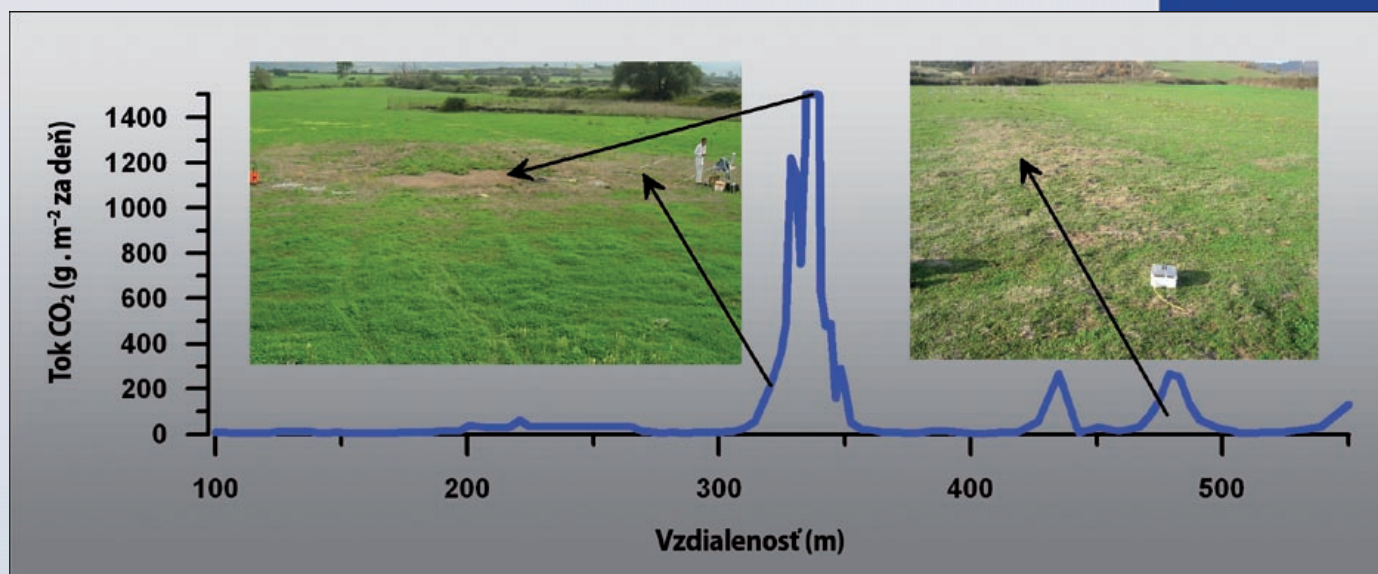
Prírodné systémy (tzv. analógy) sú neoceniteľným zdrojom informácií pri zvyšovaní úrovne našich vedomostí o hlboké migrácii plynov, ako aj o prirodzenej výmene plynov medzi zemou a atmosférou. Základné poznatky získané štúdiom mnohých rezervoárov prírodných plynov, tak s únikami, ako aj bez nich, možno zhrnúť takto:

- za priaznivých geologických podmienok sa môže vzniknutý plyn zadržiavať v úložisku stovky tisícov až miliónov rokov.
- prirodzené rezervoáre a „kapsy“ sa dokonca vyskytujú aj v menej priaznivých geologických podmienkach (napr. vo vulkanických oblastiach).
- migrácia akéhokoľvek významnejšieho množstva plynu vyžaduje advekciu (t. j. prúdenie spôsobené tlakom), pretože difúzia je veľmi pomalý proces.
- advekcia nastáva v takých prípadoch, ak tlak uloženého fluida je blízky litostatickému tlaku.* Zlomy a pukliny ostávajú otvorené, alebo sa mechanicky vytvoria nové cesty.
- miesta, v ktorých dochádza k únikom prirodzene sa vyskytujúcich plynov na povrchu, sa prakticky výhradne nachádzajú na výrazne tektonicky porušených zónach, vo vulkanických a seizmických oblastiach, kde výrony plynov sú situované na aktívnych alebo nedávno aktivovaných zlomoch.
- významné úniky plynu sa vyskytujú len zriedka a sú v podstate obmedzené na vulkanické a geotermálne oblasti výrazne porušené zlomami, kde prírodné procesy nepretržite produkujú CO₂.
- anómálie plynu na povrchu sa obvykle nachádzajú vo forme plošne ohraničených bodových výskytov, ktoré majú limitovaný priestorový dosah na okolité prostredie.

Z uvedených poznatkov vyplýva, že na vytvorenie únikov plynu je potrebná kombinácia množstva špecifických podmienok. Je teda málo pravdepodobné, že na dôkladne vybranom a zodpovedne prevádzkovanom úložisku CO₂ by mohli nastať úniky. Napriek tomuto faktu je potrebné porozumieť všetkým súvisiacim procesom a prípadným negatívnym dosahom potenciálnych únikov, aby bolo možné vybrať, naprojektovať a prevádzkovať čo najbezpečnejšie geologické úložisko CO₂.

Obrázok 1. Možné cesty pohybu CO₂ vo vrte. Únik je možný cez porušený materiál (c, d, e) alebo pozdĺž stykových plôch (a, b, f).





Účinky na človeka

CO₂ vlastne neustále vdychujeme. Pre ľudské zdravie je nebezpečný len vo veľmi vysokej koncentrácii, približne od 50 000 ppm (5 %), keď spôsobuje bolesti hlavy, závraty a nevoľnosť. Hodnoty vyššie ako uvedená úroveň môžu spôsobiť smrť, ak je človek vystavený takýmto účinkom príliš dlho. Prakticky to znamená smrť udusením, čo predstavuje stav, keď koncentrácia kyslíka vo vzduchu poklesne pod úroveň 16 %, ktorá je potrebná na udržanie ľudského života. Ak však CO₂ uniká v plochom, otvorenom teréne, rýchlo sa rozplynie vo vzduchu, a to aj pri slabom vetre. Potenciálne ohrozenie pre obyvateľstvo je tak obmedzené na uzatvorené prostredie alebo terénne depresie, kde koncentrácia CO₂ môže narastať v dôsledku toho, že tento plyn je ťažší ako vzduch. Pri prevencii a minimalizácii rizík sú veľmi dôležité vedomosti o charakteristikách odplynienia územia. V reálnom svete množstvo ľudí trvale obýva oblasti s každodennými prirodzenými výronmi plynu. Napríklad v Ciampine v Taliansku neďaleko Ríma sú obytné domy postavené len 30 m od miest výronov plynu, kde koncentrácia CO₂ v pôde dosahuje 90 % a denne uniká do atmosféry 7 ton CO₂. Miestni obyvatelia sa vyhýbajú akémukoľvek riziku dodržiavaním jednoduchých preventívnych opatrení, akými sú dobré vetranie a zásada nespäť v prízemných priestoroch.

Dosahy na životné prostredie

Potenciálne negatívne dosahy na ekosystémy by sa líšili v závislosti od toho, či je úložisko situované na pevnine alebo pod morským dnom. V prípade morských ekosystémov je hlavný účinok CO₂ lokálny. Spočíva v znížení pH a s tým súvisiacimi vplyvmi, najmä na faunu, ktorá žije na morskom dne a nemôže sa presunúť na iné miesto. Prípadné dôsledky sú však priestorovo ohraničené a po prerušení výronu plynu ekosystémy pomerne rýchle vykazujú známky obnovy. V prípade pevninských ekosystémov sa môžu

negatívne účinky zhrnúť takto:

- **Vegetácia.** Napriek tomu, že koncentrácia CO₂ v pôdnom vzduchu na úrovni 20 – 30 % je vlastne priaznivá z hľadiska výživy rastlín a zvyšuje rýchlosť rastu niektorých druhov, hodnoty vyššie ako tento limit môžu byť pre niektoré rastliny (nie ale všetky) smrtiace. Tento jav sa výrazne koncentruje na bezprostredných miestach okolia výronu plynu; vegetácia vo vzdialenosti niekoľko metrov od výronu zostáva zdravá a silná (obr. 2).
- **Kvalita podzemnej vody.** Pridaním CO₂ do podzemnej vody sa jej chemické zloženie zmení, pretože voda sa stáva kyslejšou a z hornín a minerálov tvoriacich akvifer sa môžu uvoľniť niektoré prvky. Aj v prípade, keby CO₂ unikol do akviferu s pitnou vodou, jeho účinky by boli priestorovo obmedzené. Kvantifikácia dosahov tohto typu je v súčasnosti predmetom výskumov. Je zaujímavé, že množstvo akviferov v Európe je obohatené prírodným CO₂ a takáto voda sa často zachytáva do fliaš a predáva sa v obchodnej sieti ako minerálna voda.
- **Integrita hornín.** Zvyšovanie kyslosti podzemnej vody môže vyústiť do rozpustenia hornín akviferu, zníženia štruktúrálnej celistvosti a vytvárania kavern. Tento typ javov sa však vyskytuje vo veľmi špecifických geologických a hydrogeologických podmienkach (tektonicky aktívne akvifery s vysokou rýchlosťou pohybu fluíd, mineralogicky tvorené karbonátmi), ktorých výskyt v prípade umeľých úložísk je menej pravdepodobný.

Pretože dosahy akéhokoľvek hypotetického úniku CO₂ budú závisieť od miestnych podmienok úložiska, len dôkladná znalosť jeho geologickej a štruktúrnej stavby umožní v konečnom dôsledku identifikovať všetky potenciálne unikové cesty plynu, vybrať úložisko s najmenej pravdepodobným potenciálom únikov a predpovedať jeho správanie, ak predsa len únik nastane. Na takomto základe je preto možné posúdiť a vopred eliminovať možné závažné dosahy na človeka a ekosystémy.

Obrázok 2.
Dosahy úniku CO₂ na vegetáciu pri silnom (vľavo) a miernom (vpravo) toku plynu. Dosahy sú obmedzené na miesta, kde CO₂ uniká.

Akým spôsobom môžeme monitorovať úložisko v hĺbke a na povrchu?

Všetky úložiská bude nutné monitorovať kvôli prevádzkovým, bezpečnostným, spoločenským a ekonomickým dôvodom, ako aj z hľadiska ochrany životného prostredia. Musí sa vypracovať stratégia, v ktorej bude presne definované, čo sa bude monitorovať (ktorá časť úložiska) a ako.

Prečo potrebujeme monitoring?

Monitorovanie prevádzky ložiska bude rozhodujúce pri dosiahnutí základného cieľa geologického ukladania CO₂ – t. j. dosiahnutí dlhodobej izolácie antropogénneho CO₂ od atmosféry. Pri monitoringu úložísk sú rozhodujúce najmä tieto dôvody:

- **prevádzkové** – riadiť a optimalizovať proces injeckáže;
- **bezpečnostné a environmentálne** – predchádzať akémukoľvek negatívnemu dosahu na obyvateľstvo, faunu a ekosystémy v mieste ložiska, prípadne tieto dosahy minimalizovať a prispieť k zmierneniu globálnej zmeny klímy;
- **spoločenské** – poskytnúť verejnosti informácie potrebné na to, aby porozumela bezpečnosti úložiska, a na získanie jej dôvery;
- **finančné** – získať dôveru trhu v technológiu CCS a overiť uložený objem CO₂, aby mohol byť posúdený ako „nevypustené emisie“ v budúcich fázach Systému obchodovania s emisiami Európskej únie (ETS).

Monitorovanie pôvodného stavu prostredia (tzv. *baseline* – nulový variant pred ukladaním) a následného vývoja v ložisku je dôležitou regulatívnou požiadavkou Európskej smernice o geologickom ukladaní CO₂, vydané 23. apríla 2009. Operátori na ložisku musia byť schopní preukázať, že prevádzka ložiska je v súlade s predpismi a tento stav bude zachovaný aj v dlhodobom časovom horizonte. Monitoring je významným faktorom na zníženie neistoty súvisiacej so „správaním“ ložiska a ako celok by mal byť prepojený s aktivitami riadenia bezpečnosti.

Aké sú ciele monitoringu?

Monitoring môže byť zameraný na rôzne ciele a procesy v rôznych častiach ložiska, ako

napríklad:

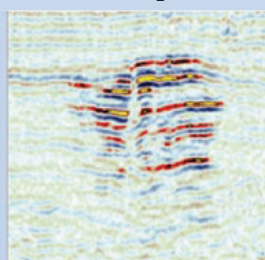
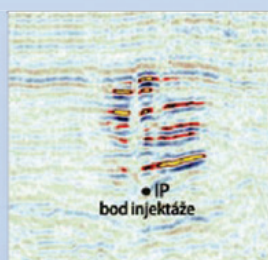
- Zobrazenie mraku CO₂. Ide o sledovanie jeho pohybu od bodu injeckáže (vtláčania) do kolektora. Takýto typ monitoringu poskytuje kľúčové údaje pri kalibrácii modelov, ktoré predpovedajú budúce rozloženie CO₂ v ložisku. K dispozícii je celý rad overených technológií, najmä opakované seizmické merania, ktoré sa úspešne využili pri niekoľkých demonstračných a pilotných projektoch (**obr. 1**).
- Neporušenosť tesniacej horniny v nadloží rezervoára. Tento typ monitoringu sa vyžaduje pri posúdení, či je CO₂ dôkladne izolovaný v kolektorovej časti ložiska, a tiež kvôli tomu, aby bolo možné prijať včasné varovné opatrenia v prípade neočakávanej migrácie smerom na povrch. Tento typ monitoringu je dôležitý najmä vo fáze injeckáže, keď tlak v rezervoári, aj keď dočasne, predsa len vzrastá.
- Integrita vrtov (celistvosť). Ide o významnú záležitosť, pretože, ako sme už spomenuli, hlboké vrty môžu slúžiť ako únikové cesty pri migrácii CO₂ smerom na povrch. Injeckážne vrty, pozorovacie vrty, ako aj všetky staršie vrty v území ložiska sa musia v priebehu zatlačania a po ňom pozorne monitorovať, aby sa predišlo náhlemu úniku CO₂. Monitoring sa realizuje aj ako kontrolná činnosť, či boli nepoužívané vrty dostatočne utesnené. Existujúce geofyzikálne a geochemické monitorovacie systémy, ktoré sa bežne využívajú v ropno-plynovom priemysle, sa môžu inštalovať tak vo vrte, ako aj na povrchu nad ním, aby mohli včas poskytnúť relevantné údaje.
- Migrácia do nadložia. Pri úložiskách, kde sa v nadloží vyskytujú ďalšie, plytšie vrstvy s podobnými vlastnosťami, ako má tesniaca hornina, môže byť nadložie kľúčovou zložkou redukujúcou riziko pri únikoch do mora alebo do atmosféry. Ak monitorovanie úložiska alebo oblasti tesniaceho horizontu indikuje nečakanú migráciu cez tesniacu horninu, stáva sa monitoring nadložia nutnosťou. V nadloží sa môže použiť celý rad technológií na sledovanie mraku CO₂.
- Povrchové úniky a detekcia, ako aj merania v atmosfére. Aby sme sa uistili, že zatlačený CO₂ nesmeroval na povrch rezervoára, máme k dispozícii celú paletu geochemických a biologických metód, ako aj metód diaľkového pozorovania zeme, ktoré sú schopné lokalizovať úniky, posúdiť ich a monitorovať distribúciu CO₂ v pôde a rozptýl v atmosfére alebo v morskom prostredí (**obr. 2**).
- Množstvo uloženého CO₂ na regulatívne a fiškálne účely. – Hoci množstvo zatlače-

Obrázok 1.
Seizmické záznamy monitorujúce mrak CO₂ * na úložisku Sleipner pred injeckážou (ktorá sa začala v r. 1996) a po injeckáži (o 3 a 5 rokov neskôr).

Stav pred injeckážou (1994)

2,35 Mt CO₂ (1999)

4,36 Mt CO₂ (2001)



ného CO₂ možno veľmi spoľahlivo zistiť na uzávere vrtu, jeho kvantifikácia v rezervoári je technicky veľmi obťažná. Ak unikne do prieporných vrstiev, musí sa uniknutý objem kvantifikovať kvôli potrebe vykazovania v rámci národnej inventúry skleníkových plynov a budúcich schém ETS.

- Pohyby povrchu a mikroseizmicita*. – Zvýšený tlak v rezervoári spôsobený inekciou CO₂ by v špecifických prípadoch mohol spôsobiť nárast potenciálu mikroseizmicity a pohyby povrchu malého rozsahu. K dispozícii sú monitorovacie metódy na sledovanie mikroseiziem a metódy diaľkového prieskumu (merania z lietadla alebo z družíc), ktoré sú schopné merať aj veľmi malé deformácie povrchu (rádovo v mm).

Ako sa vykonáva monitoring?

V rámci prebiehajúcich demonštratívnych a výskumných projektov sa už uplatnil celý rad monitorovacích technológií zahŕňajúcich metódy, ktoré priamo monitorujú CO₂, aj tie, ktoré nepriamym spôsobom merajú vplyv CO₂ na horniny, fluida a okolité prostredie. Priame merania zahŕňajú analýzy z hlbokých vrtov alebo merania koncentrácie plynu v pôde či atmosfére. K nepriamym metódam možno priradiť geofyzikálne merania a monitorovanie zmien tlaku vo vrtoch, ako aj meranie zmien pH v podzemnej vode.

Monitoring sa požaduje na úložiskách na pevnine aj pod morským dnom. Výber vhodných monitorovacích metód bude závisieť od technických a geologických charakteristík úložiska a predmetu monitoringu. Už dnes je k dispozícii široká škála technológií (**obr. 3**), z ktorých je celý rad neoddeliteľnou súčasťou ťažby ropy a plynu. Tieto technológie sa teraz adaptujú na účely monitorovania CO₂. Prebieha aj výskum zameraný na optimalizáciu existujúcich metód, ako aj vývoj nových technológií s cieľom zlepšiť ich rozlišovacie schopnosti a spoľahlivosť, znížiť náklady, automatizovať prevádzku a preukázať ich účinnosť.

Stratégia monitoringu

Ak plánujeme stratégiu monitoringu, je potrebné vykonať mnoho rozhodnutí, ktoré závisia od geologických a technických podmienok, špecifických pre každé úložisko. Sú to najmä geometria a hĺbka rezervoára, očakávaný rozmer mraku CO₂, potenciálne únikové cesty, geológia nadložia, čas a rýchlosť zatlačania. K tomu je potrebné priradiť povrchové charakteristiky, ku ktorým patria najmä topografia, hustota populácie, infraštruktúra a ekosystémy. Hneď ako sa určia najvhodnejšie metódy a miesta monitoringu, ešte pred začatím zatlačania sa musí vykonať základné meranie (*baseline* alebo tzv. nulový variant), ktoré slúži ako referenčné meranie pre všetky ďalšie merania, ktoré sa vykonajú v budúcnosti.

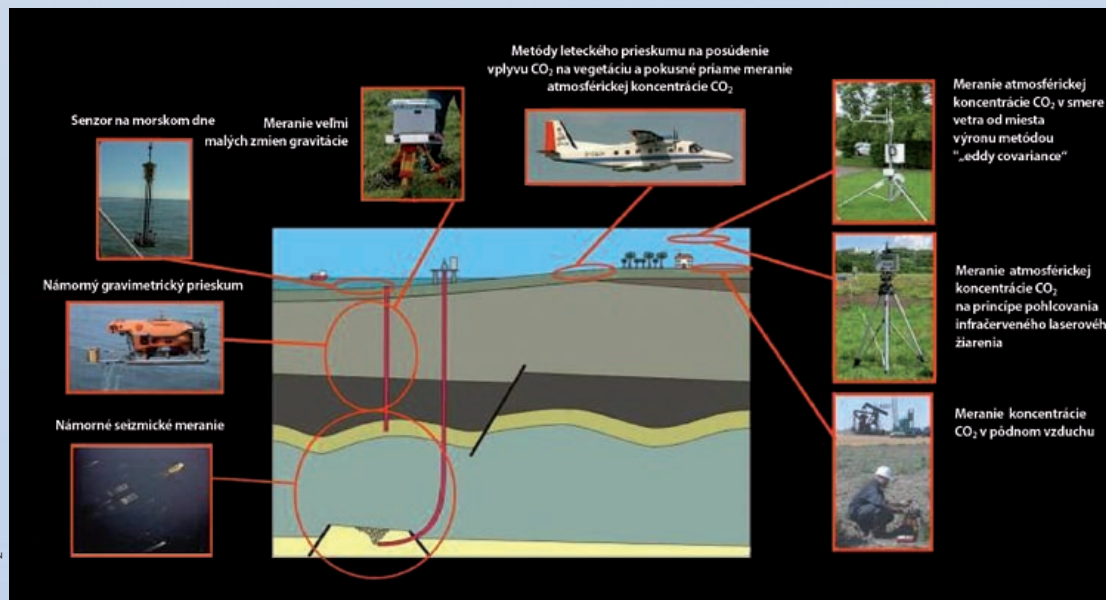
Každý monitorovací program musí byť flexibilný, aby sa mohol vyvíjať súčasne s prebiehajúcim vývojom projektu ukladania. Stratégia monitoringu, ktorá bude schopná integrovať všetky tieto problémy a ktorá bude zároveň zlepšovať efektivitu vynaložených nákladov, bude najdôležitejšou zložkou rizikovej analýzy a overenia bezpečnosti a správneho fungovania úložiska.

Už dnes možno konštatovať, že monitoring úložiska CO₂ sa dá realizovať s využitím celej škály technológií, ktoré sú už dnes na trhu, alebo sú v štádiu vývoja. Výskum prebiehajúci v súčasnosti má za cieľ nielen vyvinúť nové prístroje (najmä na využitie na morskom dne), ale aj optimalizovať monitorovací výkon s cieľom znížiť náklady.



© CO₂ GeoNet

Obrázok 2. Monitorovacie bóje so solármi panelmi na zaistenie energie plavákmi a zariadením na vzorkovanie plynu na morskom dne.



Obrázok 3. Malý výber ilustrujúci rozsah technológií, ktoré sú k dispozícii na monitorovanie rôznych častí systému úložiska CO₂.

Aké bezpečnostné kritériá je potrebné zaviesť a dodržiavať?

Kvôli zaisteniu bezpečnosti a účinnosti ukladania musia regulačné orgány stanoviť podmienky spracovania projektu v prevádzke úložiska, ktoré prevádzkovateľ je povinný dodržiavať.

Napriek tomu, že v súčasnosti sa geologické ukladanie CO₂ prijíma ako jedna z dôveryhodných možností na zmiernenie účinkov klimatickej zmeny, je potrebné stanoviť bezpečnostné kritériá týkajúce sa ochrany ľudského zdravia a okolitého prostredia, a to skôr, než sa táto technológia plošne rozšíri v priemyselnej sfére. Takéto kritériá sa môžu definovať ako požiadavky kladené zo strany regulačných orgánov na prevádzkovateľov. Musia zaistiť, že miestne vplyvy na zdravie, bezpečnosť a životné prostredie (vrátane zdrojov podzemnej vody) budú zanedbateľné, a to v krátkodobom, strednodobom aj dlhodobom časovom horizonte.

Najpodstatnejším aspektom geologického ukladania CO₂ je, že uloženie musí byť trvalé, to znamená, že sa neočakáva existencia únikov z úložiska. Napriek tomu, v rámci scenára „čo keby?“ sa musia posúdiť všetky možné riziká. Od prevádzkovateľov úložiska sa bude požadovať dodržiavanie opatrení, ktoré zabránia akémukoľvek úniku alebo anomálnemu správaniu úložiska. Podľa IPCC je potrebné, aby uložený CO₂ zostal v podzemí minimálne 1 000 rokov. To by umožnilo stabilizáciu alebo pokles atmosférickej koncentrácie CO₂ prostredníctvom prirodzenej výmeny medzi vodou morí a oceánov. Tým by sa minimalizoval nárast povrchovej teploty v dôsledku globálneho otepľovania. Miestne vplyvy je potrebné posudzovať v časovom meradle od dní až po mnoho tisíc rokov.

V priebehu životného cyklu projektu ukladania CO₂ možno identifikovať niekoľko hlavných krokov (obr. 1).

a nepriepustnej tesniacej horniny;

- vziať do úvahy zloženie prúdu CO₂ a venovať pozornosť najmä akýmkoľvek nečistotám, ktoré neboli eliminované v procese zachytávania; je to dôležité z hľadiska zabránenia nežiaducim interakciám s vrtom, rezervoárom, tesniacou horninou a v prípade úniku so všetkými zvodnencami (akvifermi) v nadloží.

Bezpečnostné kritériá spracovania projektu

Bezpečnosť sa musí preukázať ešte pred začatím prevádzky. Hlavné zložky prostredia, ktoré sa musia preveriť s ohľadom na výber úložiska, zahŕňajú:

- rezervoár a tesniacu horninu,
- nadlozie a zvlášť nepriepustné vrstvy, ktoré by mohli fungovať ako sekundárne tesniace horizonty,
- prítomnosť priepustných zlomov alebo vrtov, ktoré by mohli pôsobiť ako únikové cesty na povrch,
- akvifery s pitnou podzemnou vodou,
- osídlenie a obmedzenia z hľadiska životného prostredia na povrchu.

Ako sme už spomenuli, na posúdenie geologických a geometrických parametrov úložiska sa používajú technológie používané pri prieskume uhľovodíkov. Modelovanie pohybu fluid, geochemické a geomechanické modelovanie úložiska umožňuje predpokladať správanie CO₂ a dlhodobý výsledok celého procesu, ako aj definovať parametre účinného zatlačania. V konečnom dôsledku by dôkladná charakteristika úložiska mala umožniť definovať scenár jeho „normálneho správania“ zodpovedajúceho takému úložisku, na ktorom je zaručená istota, že skladovaný plyn v ňom zostane. Pri posudzovaní rizík je ale potrebné pracovať aj s menej prijateľnými scenármi budúceho stavu úložiska vrátane možnosti vzniku mimoriadnych udalostí. Je potrebné počítať najmä s potenciálnymi únikovými cestami, vystavením účinkom pôsobenia CO₂ a ďalšími možnými následkami (obr. 2).

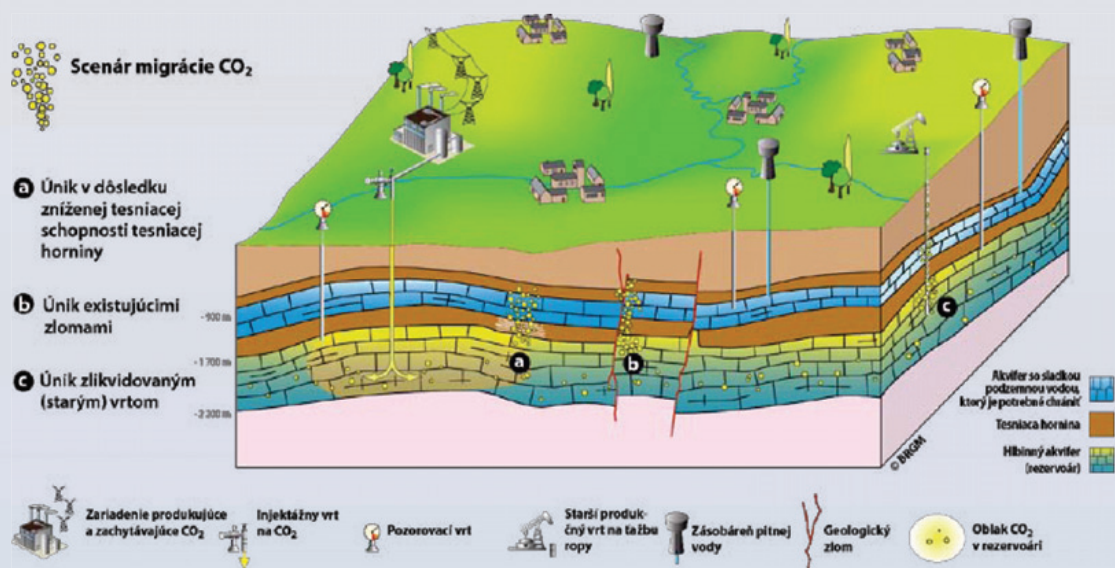
Každý scenár úniku CO₂ z úložiska by sa mal expertízne posúdiť a tam, kde je to možné, by sa malo použiť numerické modelovanie s cieľom posúdiť pravdepodobnosť výskytu a potenciálnu závažnosť. Veľmi dôsledne by sa mal zmapovať mrak CO₂, aby sa zistilo akékoľvek prepojenie so zlomovou zónou. Pri posudzovaní rizík je rovnako potrebné pozorne posúdiť citlivosť na zmeny vstupných parametrov a neistoty. Odhadmi prípadných vplyvov na človeka a životné prostredie by sa mala zaoberať štúdia, ktorá je bežnou súčasťou všetkých povolovacích procesov v prípade priemyselných zariadení (EIA). V rámci tohto procesu sa skúmajú ako normálny sce-

Obrázok 1.
Jednotlivé etapy
projektu ukladania.



Bezpečnosť sa zaistí pomocou:

- dôkladného výberu a posúdenia úložiska,
 - posúdenia bezpečnosti,
 - správneho prevádzkovania,
 - vhodného monitorovacieho plánu,
 - primeraného plánu nápravných opatrení.
- S tým sú spojené zásadné ciele:
- zaistiť, aby CO₂ zostal v rezervoári;
 - udržiavať integritu vrtov;
 - zachovať fyzikálne vlastnosti rezervoára (vrátane porozity, permeability a injektivity)



Obrázok 2.
Príklady potenciálnych
scenárov úniku.

nár aj ako scenár s únikom CO₂, aby bolo možné posúdiť všetky potenciálne riziká spojené s konkrétnym zariadením.

Monitorovací program, tak krátkodobý, ako aj dlhodobý, by sa mal vytvoriť podľa výsledkov analýzy rizík a mal by zohľadniť kritické parametre, definované v rámci rôznych scenárov. Jeho hlavnými cieľmi sú sledovanie migrácie mračna CO₂, kontrola integrity vrtov a tesniaceho nadložia, detekcia akéhokoľvek úniku CO₂, posúdenie kvality podzemnej vody a záruka, že CO₂ neunikol z rezervoára. Poslednou súčasťou posúdenia bezpečnosti je plán nápravných opatrení, ako aj opatrení na zmiernenie následkov. Musí byť zameraný na detailné rozpracovanie jednotlivých činností, aby bolo jasné, ako treba v prípade havarijnej situácie postupovať. Zameriava sa aj na neporušenosť tesniacej horniny a haváriu vrtu v priebehu injeckáže i po nej a berie do úvahy aj extrémne nápravné opatrenia, akými sú napr. spätné čerpanie CO₂. Existujúci know-how obsahuje technológie, ktoré sa bežne používajú pri ťažbe ropy a plynu, ako sú napr. zásah do už skompletizovaného vrtu, zníženie injeckážneho tlaku, čiastočné alebo úplné odobratie plynu, extrakcia vody s cieľom znížiť tlak, odstránenie plytko uloženého plynu a pod.

Bezpečnostné kritériá v priebehu prevádzky úložiska a po jeho zatvorení

Hlavné obavy o bezpečnosť úložiska sú spojené s etapou prevádzky úložiska: po skončení injeckáže sa zníži tlak na nadložný tesniaci komplex, čím sa bezpečnosť úložiska zvyšuje. Dôvera v schopnosť injektovať a uložiť CO₂ bezpečným spôsobom je spojená so skúsenosťami priemyselných firiem. CO₂ je v zásade bezpečný produkt používaný v celej škále priemyselných odvetví, takže zaobchádzanie s takouto substanciou nevyvoláva žiadne nové problémy. Plán a riadenie prevádzky budú založené najmä na know-how z priemyslu plynu a ropy, najmä zo sezónneho ukladania zemného plynu do podzemných plynových zásobníkov a z intenzifikácie ťažby ropy (EOR – Enhanced Oil Recovery). Hlavné parametre riadenia operácií:

- injeckážny tlak a rýchlosť injeckáže – tlak by sa mal udržiavať pod hranicou hraničného tlaku,

pri ktorého prekročení sa v tesniacej hornine vytvárajú trhliny;

- injektovaný objem – kvôli porovnaniu s predpokladmi definovanými modelovaním;
- zloženie prúdu injektovaného CO₂;
- integrita injeckážnych vrtov a všetkých ďalších vrtov situovaných v oblasti rozšírenia oblaku CO₂ alebo v rámci vyčleneného rezervoára;
- rozsah oblaku CO₂ a zistenie akéhokoľvek úniku;
- stabilita povrchu.

V priebehu injeckáže bude potrebné opakovane porovnávať správanie injektovaného CO₂ s predpokladmi získanými modelovaním. Tým sa sústavne zvyšuje úroveň našich vedomostí o úložisku. Ak sa zistí akékoľvek anomálne správanie, je nutné upraviť monitorovací program a v prípade potreby prijať nápravné opatrenia. Ak sa objaví podozrivý únik, vhodné monitorovacie nástroje možno zamerať na konkrétne časti úložiska od rezervoára až po povrch. Tým sa zistí výstup CO₂ a akékoľvek nepriaznivé vplyvy na akvifery s pitnou vodou, životné prostredie a v konečnom dôsledku aj na obyvateľstvo.

Po skončení injeckáže sa začína fáza uzatvárania úložiska: vrtý musia byť správne utesnené a zlikvidované, modelovacie a monitorovacie programy aktualizované a ak je to potrebné, prijímajú sa nápravné opatrenia na zníženie rizika. Hneď ako možno úroveň rizika považovať za dostatočne nízku, zodpovednosť za úložisko sa prenesie na štátne orgány, pričom monitorovací plán sa môže minimalizovať.

Schválená európska smernica vytvára právny rámec, ktorý zabezpečuje, že zachytávanie a ukladanie CO₂ je dostupná alternatíva na zmiernenie účinkov zmeny klímy a môže sa vykonávať bezpečne a zodpovedne.

Bezpečnostné kritériá sú zásadnou podmienkou úspešného priemyselného ukladania CO₂. Musia byť ale „šité“ na podmienky každého jednotlivého úložiska. Tieto kritériá budú zvlášť významné pri hľadaní podpory verejnosti a pri zásadnom povoľovacom procese, v rámci ktorého musia regulačné orgány definovať úroveň detailov bezpečnostných požiadaviek.

akvifer – priepustné horninové teleso obsahujúce vodu (zvodnenec). Akvifery najbližšie k povrchu obsahujú sladkú vodu, ktorá sa využíva na spotrebu obyvateľstva. Hlbšie akvifery sú naplnené slanou vodou (mineralizovanou), ktorá nie je vhodná na žiadne potreby obyvateľstva. Nazývajú sa slané akvifery.

CCS – zachytávanie a ukladanie CO₂ (Carbon Capture and Storage).

CSLF – Carbon Sequestration Leadership Forum (Lídorské fórum pre znižovanie uhlíka) – medzinárodná iniciatíva v oblasti zmeny klímy, ktorá sa zameriava na vývoj zlepšených, efektívnych technológií separácie a zachytávania oxidu uhličitého a jeho transportu a dlhodobého bezpečného uloženia.

EU GeoCapacity – dokončený európsky výskumný projekt, ktorý posúdil celkovú kapacitu na geologické ukladanie antropogénnych emisií CO₂ v Európe.

GESTCO – dokončený európsky výskumný projekt, ktorý posúdil možnosti geologického ukladania CO₂ v 8 krajinách (Nórsko, Dánsko, Veľká Británia, Belgicko, Holandsko, Nemecko, Francúzsko a Grécko).

IEAGHG – Medzinárodná energetická agentúra – agentúra, ktorej program je zameraný na výskum a vývoj skleníkových plynov. Medzinárodná spolupráca má za cieľ zhodnotiť technológie znižovania emisií skleníkových plynov, šíriť výsledky týchto štúdií, identifikovať ciele výskumu, vývoja a demonštratívnych aktivít a podporovať príslušné aktivity.

injektivita (vtlačiteľnosť) – charakteristika, ktorá vyjadruje, ako ľahko môže byť tekutina (ako napr. CO₂) injektovaná do geologickej formácie. Je definovaná ako rýchlosť injektáže delená rozdielom tlakov medzi bodom injektáže vo vrte na jeho dne a v rezervoárovej formácii.

intenzifikácia ťažby ropy (EOR) – technológia zvyšujúca ťažbu ropy pomocou injektáže fluid (napr. pary alebo CO₂), ktoré pomáhajú mobilizovať ropu v ložisku.

IPCC – Medzivládny panel pre zmenu klímy – organizácia, ktorú v roku 1988 založili Svetová meteorologická organizácia (WMO) a Program OSN na ochranu životného prostredia (UNEP). Zameriava sa na posudzovanie vedeckých, technických a socioekonomických informácií významných z hľadiska porozumenia zmene klímy, jej potenciálnym nega-

Ďalšie zdroje informácií:

Zvláštna správa o CCS – Medzivládny panel pre zmenu klímy (IPCC):

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

Internetové stránky Generálneho riaditeľstva pre klimatickú zmenu Európskej komisie o CCS vrátane informácií o právnom rámci a implementácii Smernice o geologickom ukladaní oxidu uhličitého

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

Internetová stránka IEAGHG s informáciami o nástrojoch monitoringu:

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

tívnym dosahom a možnostiam jej zmiernenia a adaptácie. Organizácii IPCC a p. Alovi Gorovi bola udelená Nobelova cena za mier za rok 2007.

litostatický tlak – sila vyvíjaná na horninu pod zemským povrchom nadložnými horninami. Litostatický tlak sa s hĺbkou zvyšuje.

mikroseizmicitá – mierne chvenie alebo vibrácie v zemskej kôre, ktoré nesúvisia so zemetrasením. Môžu byť spôsobené rôznymi prirodzenými aj umelými činiteľmi.

mrak CO₂ – priestorové rozloženie superkritického CO₂ v horninových jednotkách.

nadlošie – geologické vrstvy ležiace medzi tesniacou horninou rezervoára a zemským povrchom (alebo morským dnom).

permeabilita (priepustnosť) – vlastnosť alebo schopnosť pórovitej horniny prenášať fluidá; je meradlom toho, ako ľahko budú fluidá pretekať pri existencii tlakového rozdielu.

pH – meradlo kyslosti roztoku; pH 7 zodpovedá neutrálnej hodnote.

porozita – percentuálna časť celkového objemu horniny, ktorá nie je vyplnená minerálmi. Tieto medzery sa nazývajú póry a môžu byť vyplnené rozličnými fluidami. V hlboko uložených horninách je typickým fluidom slaná voda, ale môže to byť aj ropa, plyn (napr. metán) a tiež prírodný CO₂.

prírodný analóg – prirodzene sa vyskytujúci rezervoár CO₂. Existujú lokality, kde CO₂ uniká, aj lokality bez únikov. Ich štúdium môže zlepšiť naše znalosti o dlhodobom osude CO₂ v hlbokých geologických systémoch.

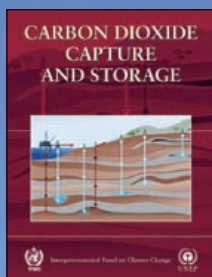
rezervoár – teleso horniny, spravidla sedimentárnej, ktoré je dostatočne pórovité a priepustné, aby mohlo prijať a akumulovať CO₂. Najobvyklejšie rezervoárové horniny sú pieskovec a vápenec.

soľanka – veľmi slaná voda s vysokou koncentráciou rozpustených solí.

superkritický stav – stav fluida (tekutiny) pri tlaku a teplote, ktoré prevyšujú tzv. kritické hodnoty (pri CO₂ 31,03 °C a 7,38 MPa). Vlastnosti takéhoto fluida sa spojitým menia; pri nízkom tlaku sa blížia k plynu a pri vysokom tlaku ku kvapaline.

tesniaca hornina – nepriepustná vrstva horniny, ktorá funguje ako bariéra pohybu kvapalín a plynov. Ak prekrýva rezervoár, vytvára geologickú pascu.

vrt – kruhový otvor vytvorený vrtaním, hlboký otvor s malým priemerom, ako je napr. ropný vrt.



Čo to je CO₂GeoNet?



CO₂GeoNet je európska vedecká komunita, na ktorú sa môžete obrátiť s požiadavkou na získanie jasných a podrobných informácií o geologickom ukladaní CO₂, dôležitej inovatívnej technológii na zmiernenie účinkov klimatických zmien. CO₂GeoNet bol iniciovaný Európskou komisiou ako sieť excelentnosti v 6. rámcovom programe (kontrakt EK FP6 v rokoch 2002 – 2009). Združuje 13 inštitúcií zo 7 európskych krajín, ktoré majú vysoký medzinárodný kredit a ktoré sú hlavnými aktérmi v oblasti výskumu geologického ukladania CO₂. V roku 2008 bolo zoskupenie CO₂GeoNet zaregistrované ako neziskové združenie podľa francúzskej legislatívy, aby mohlo pokračovať vo svojich aktivitách aj po skončení podpory zo strany Európskej komisie.

CO₂GeoNet má rozsiahle skúsenosti z výskumných projektov zameraných na rezervoáre, tesniace horniny, potenciálne migračné cesty CO₂ smerom na zemský povrch, nástroje na monitoring, potenciálne dosahy na človeka a ekosystémy, postoje verejnosti a komunikáciu s ňou.

CO₂GeoNet ponúka širokú škálu služieb v štyroch hlavných oblastiach: 1. spoločný výskum, 2. odborné školenia a tréning, 3. odborné poradenstvo, 4. informácie a komunikácia.

Združenie CO₂GeoNet postupne získavalo dobré meno a stalo sa stálou európskou vedeckou referenčnou autoritou schopnou poskytnúť potrebnú vedeckú podporu širokému a bezpečnému uplatneniu geologického ukladania CO₂. Rozšírenie tejto komunity na skutočne celoeurópsku skupinu prebieha práve prostredníctvom projektu CGS Europe, koordinačnej akcie financovanej 7. rámcovým programom EÚ (2010 – 2013). V CGS Europe sa k pevnému jadru tvorenému asociáciou CO₂GeoNet pripojilo 21 ďalších inštitúcií. Do projektu je tak zapojených 28 európskych krajín (24 členov EÚ a 4 pridružené krajiny). Celkovo je k dispozícii niekoľko stoviek vedcov a výskumných pracovníkov schopných zaoberať sa všetkými aspektmi geologického ukladania CO₂ na základe medziodborovej integrácie. Cieľom je poskytovať zainteresovaným stranám a verejnosti nezávislé a vedecky overené informácie o geologickom ukladaní CO₂.



CO₂GeoNet: Európska sieť excelentnosti v odbore geologického ukladania CO₂

BGR (Nemecko), **BGS** (Veľká Británia), **BRGM** (Francúzsko), **GEUS** (Dánsko), **HWU** (Veľká Británia), **IFPEN** (Francúzsko), **IMPERIAL** (Veľká Británia), **NIVA** (Nórsko), **OGS** (Taliansko), **IRIS** (Nórsko), **SPR** Sintef (Nórsko), **TNO** (Holandsko), **URS** (Taliansko).



CGS Europe: Celoeurópska koordinačná akcia v odbore geologického ukladania CO₂:

CO₂GeoNet (13 uvedených štátov), **ČGS** (Česká republika), **GBA** (Rakúsko), **GEOCOMAR** (Rumunsko), **GEO-INZ** (Slovinsko), **G-IGME** (Grécko), **GSI** (Írsko), **GTC** (Litva), **GTK** (Fínsko), **LEGMC** (Lotyšsko), **ELGI** (Maďarsko), **LNEG** (Portugalsko), **METU-PAL** (Turecko), **PGI-NRI** (Poľsko), **RBINS-GSB** (Belgicko), **SGU** (Švédsko), **ŠGUDŠ** (Slovensko), **S-IGME** (Španielsko), **SU** (Bulharsko), **TTUGI** (Estónsko), **UB** (Srbsko), **UNIZG-RGNF** (Chorvátsko).



Združenie CO₂GeoNet získalo široké uznanie na európskej aj svetovej scéne.

CO₂GeoNet bolo uznané ako svetovo významný projekt zo strany CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum)



CO₂GeoNet úzko spolupracuje s Programom pre skleníkové plyny Medzinárodnej energetickej agentúry (IEAGHG).



O tejto brožúre

S cieľom zvýšiť povedomie verejnosti o geologickom ukladaní CO₂ a možných spôsoboch znižovania nepriaznivých účinkov klimatickej zmeny sa združenie CO₂GeoNet dotklo všeobecnej otázky „Čo skutočne znamená geologické uskladňovanie CO₂?“. Tím popredných vedcov z CO₂GeoNet pripravil aktuálne odpovede na šesť súvisiacich otázok založených na výsledkoch a skúsenostiach z celosvetového výskumu v tejto problematike. Cieľom bolo poskytnúť jasné a nezaujaté informácie určené širokému publiku a iniciovať dialóg o základných otázkach týkajúcich sa technologických aspektov geologického ukladania CO₂. Táto práca zhrnutá v tejto brožúre bola prezentovaná na *Tréningovom a dialógovom workshope*, ktorý sa konal v Paríži 3. septembra 2007.

Brožúru *Čo skutočne znamená geologické ukládanie CO₂* je možné v mnohých jazykových verziách stiahnuť na stránke www.co2geonet.com/brochure.

CO₂GeoNet

Európska sieť excelentnosti v odbore geologického ukladania 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.

Túto slovenskú verziu vytvoril (preklad a aktualizácia) Štátny geologický ústav Dionýza Štúra v Bratislave v rámci projektu CGS Europe – Celoeurópska koordinačná akcia v odbore geologického ukladania CO₂ (projekt 7. rámcového programu EÚ).



ISBN 978-80-89343-63-8

