

Kaj geološko skladiščenje CO₂ pravzaprav pomeni?

odgovorna raba
fosilnih goriv

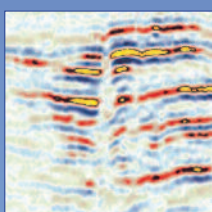
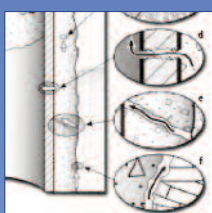
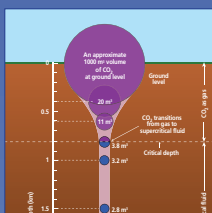
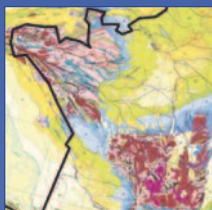
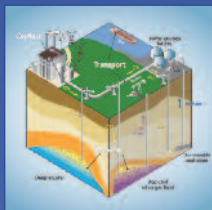
odstranitev glavnega
vira toplogrednih plinov

vračanje ogljika pod površje

pridobitev časa, potrebnega za
razvoj podnebju prijaznih virov energije



CO₂GeoNet evropska mreža odličnosti



Podnebne spremembe in potreba po geološkem skladiščenju CO₂ 4

1. Kje lahko shranimo CO₂ pod zemljo in kakšne količine? 6

2. Kako transportiramo in vtiskavamo velike količine CO₂? 8

3. Kaj se dogaja s CO₂ v podzemnem skladišču? 10

4. Ali CO₂ lahko uhaja iz skladišča in kakšne bi lahko bile posledice? 12

5. Kako spremljamo geološko skladišče CO₂ v globini in na površju? 14

6. Katera varnostna merila je treba predpisati in upoštevati? 16

Razlaga izrazov 18

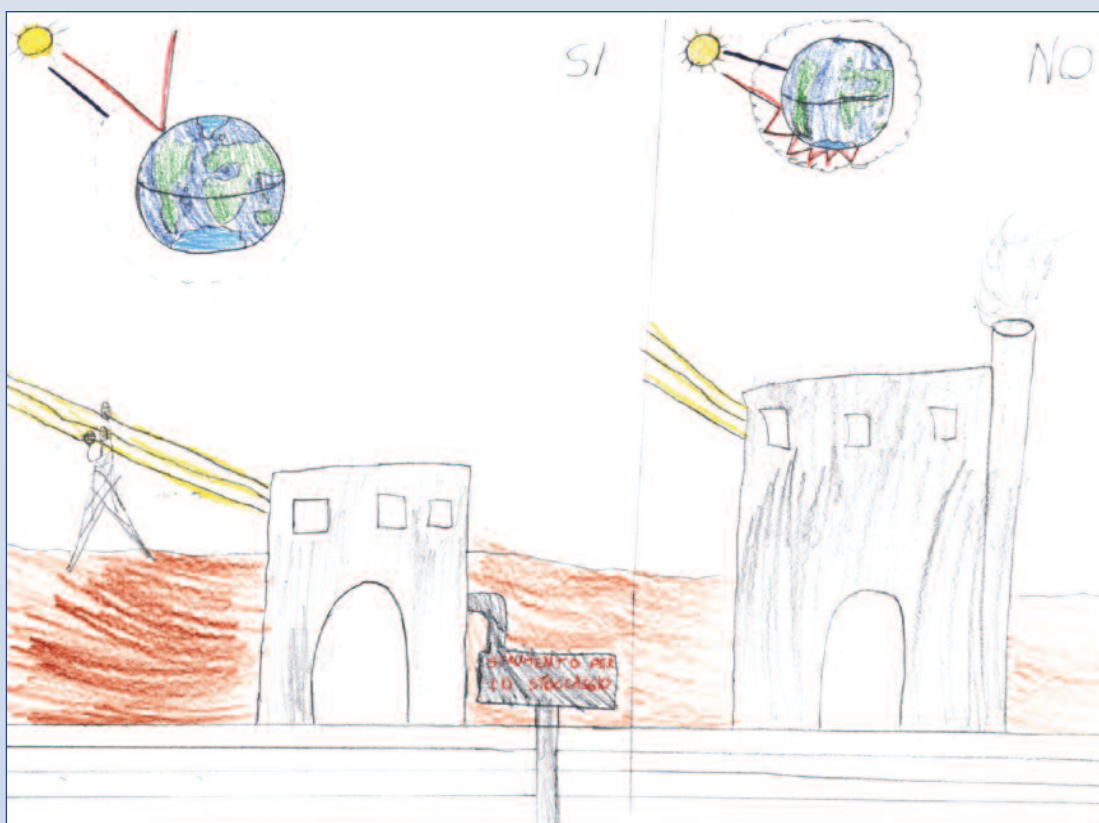
Kaj je CO₂GeoNet? 19

Besedila za brošuro so prispevali:

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.

Vizija prihodnosti

Nič več kadečih se dimnikov.
CO₂ priteče po cevovodu in se uskladišči
pod površje.
To je dobro za Zemljo.



Massimo, 10 let, Rim, Italija

Gledano z očmi naših otrok
je geološko skladiščenje CO₂ smiselno

Podnebne spremembe in potreba po geološkem skladiščenju CO₂

Slika 1
Globalni izpusti CO₂, ki so povezani s človekovo dejavnostjo, dosegajo 30 milijard ton (Gt) na leto. To pomeni 8,1 Gt ogljika, in sicer 6,5 Gt zaradi izgorevanja fosilnih goriv in 1,6 Gt zaradi krčenja gozdov in kmetijske dejavnosti.

Človeštvo izpušča odvečen CO₂ v ozračje

Znano je, da človekove dejavnosti vplivajo na naravno kroženje ogljika na našem planetu. V obdobju od pred nekaj 10.000 leti pa vse do industrijske revolucije je bila posledica tega lepo uravnoteženega procesa, ki vključuje naravno izmenjavo ogljika med geosfero, biosfero, oceani in atmosfero, nizka vsebnosti CO₂ v

atmosferi (okoli 280 ppm, tj. 0,028 %). V zadnjih 250 letih pa naša obilna raba fosilnih goriv (premoga, nafte, plina) za proizvodnjo elektrike, ogrevanje, potrebe industrije in transporta nenehno povečuje izpuste CO₂ v ozračje (**slika 1**). Približno polovico teh izpustov vsrka rastlinje oziroma se raztopi v oceanih, kar povzroča povečanje kislosti in s tem povezane negativne vplive na morsko živalstvo in rastlinstvo. Preostali CO₂ gre v ozračje, kjer prispeva k podnebnim spremembam. CO₂ je toplogredni plin, zato zadrži del sončne toplote in s tem povzroči segrevanje zemeljskega površja. Da bi preprečili povečevanje koncentracije CO₂ v ozračju z današnjih 387 ppm (kar je že 38 % povečanje glede na raven v predindustrijski dobi) na kritičnih 450 ppm v naslednjih desetletjih, so potrebni takojšnji radikalni ukrepi. Strokovnjaki po vsem svetu se strinjajo, da nad to mejo ne bo več mogoče preprečiti najbolj drastičnih posledic.

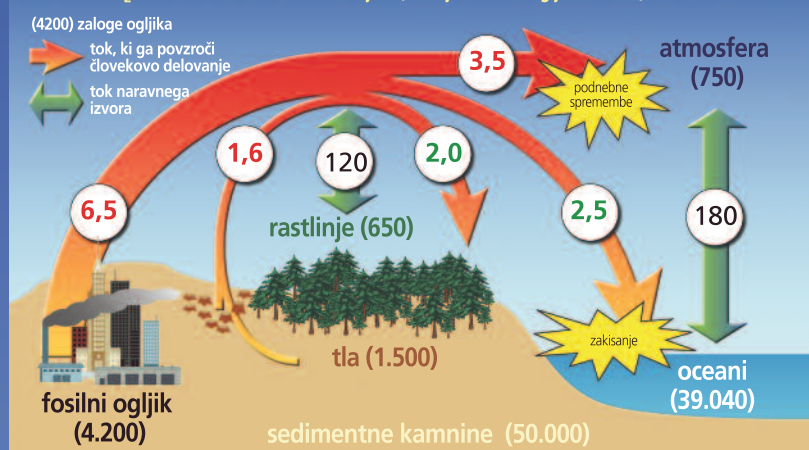
Vračanje ogljika pod površje

Vse od začetka industrijske dobe v sredini 18. stoletja je naš svet zelo odvisen od fosilnih goriv, zato ne preseneča, da bo prehod v družbo, ki bo temeljila na podnebnju prijaznih energetskega virov, zahteval čas in denar. Potrebujemo kratkoročno rešitev, ki nam bo pomagala zmanjšati našo odvisnost od fosilnih goriv, tako da jih bomo uporabljali brez dodatnega onesnaževanja, in nam tako dala čas, da razvijemo tehnologije in infrastrukturo za energijsko obnovljivo prihodnost. Ena takih možnosti je ustvariti zaprto zanko v sistemu proizvodnje energije, kjer ogljik, ki smo ga v obliki plina, nafte ali premoga vzeli iz tal, vračamo nazaj v obliki CO₂. Zanimivo je, da si podzemnega skladiščenja CO₂ ni izmislil človek, ampak je povsem naravni pojav. Naravna nahajališča CO₂ obstajajo po celem svetu že tisoče do milijone let. En tak primer je skupina osmih naravnih nahajališč CO₂ v jugovzhodni Franciji, ki so jih odkrili ob naftnih raziskavah v 60. letih prejšnjega stoletja (**slika 2**). Ta in podobna naravna nahajališča po vsem svetu dokazujejo, da je v ustreznih geoloških formacijah mogoče varno in učinkovito shranjevati CO₂ zelo dolgo.

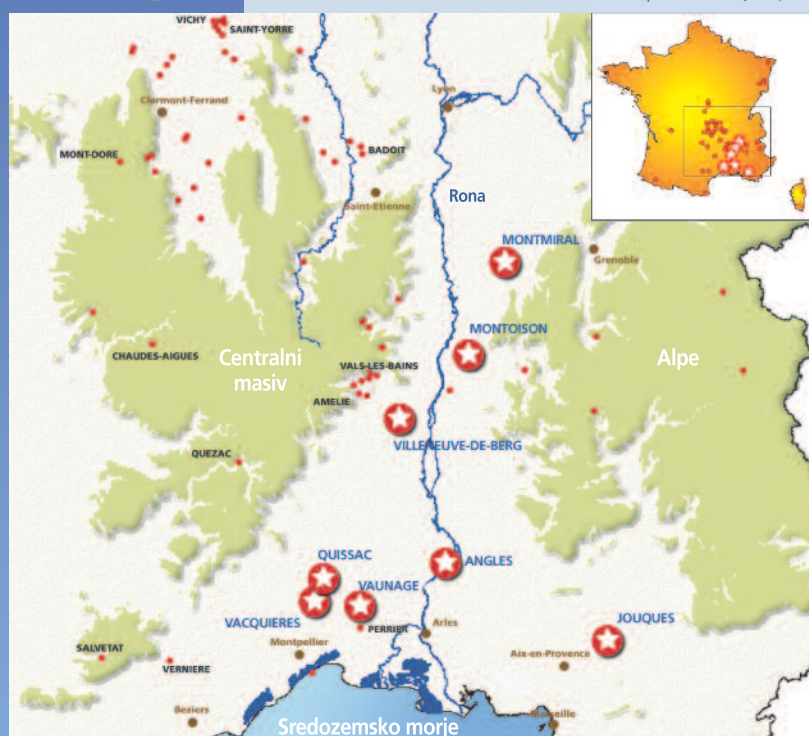
Zajem in skladiščenje CO₂: obetajoca pot za zmanjšanje emisij

Med množico ukrepov, ki jih je treba nujno vpeljati za ublažitev podnebnih sprememb in zakisanja oceanov, lahko zajem in skladiščenje CO₂ (CO₂ Capture and Storage, CCS*) odigra odločilno vlogo, saj lahko prispevata k tretjinskemu zmanjšanju CO₂, ki je potrebno do leta 2050. CCS vključuje zajem CO₂ v elektrarnah na plin ali premog in v industrijskih obratih (jeklarnah, cementarnah, rafinerijah itd.), njegov

Neto tok CO₂ v letu 1997 med tlemi in ozračjem (v milijardah ton ogljika na leto)



Slika 2
Območja v Franciji, kjer izhaja naravni CO₂



© BRGM in@gé

© BRGM in@gé

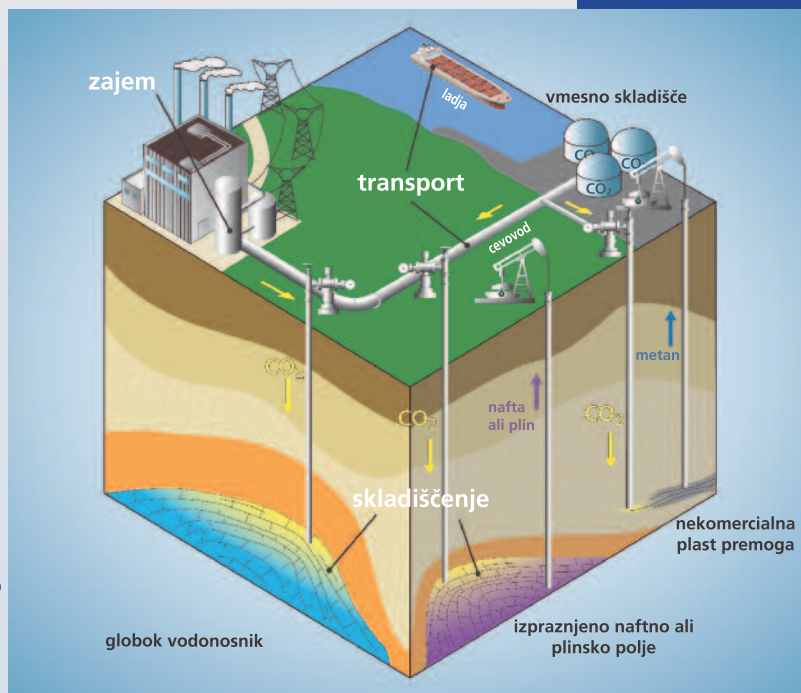
transport po cevovodih ali z ladjami do mesta skladiščenja ter vtiskanje CO₂ skozi vrtno* v primerno geološko formacijo, ki omogoča skladiščenje za daljše časovno obdobje (**slika 3**). Glede na rast svetovne populacije in vse večje zahteve po energiji v državah v razvoju kot tudi na trenutno pomanjkanje alternativnih velikih »čistih« virov energije, se rabi fosilnih goriv kratkoročno ne moremo izogniti. Z roko v roki s CCS pa se človeštvo lahko razvija na okolju prijazen način in sočasno gradi most za svetovno gospodarstvo, ki bo temeljilo na trajnostni proizvodnji energije.

Razvoj CSS v svetu je v razcvetu

Vse od 90. let prejšnjega stoletja se v Evropi, ZDA, Kanadi, Avstraliji in na Japonskem izvajajo veliki raziskovalni programi o zajemanju in skladiščenju CO₂. S prvimi obsežnimi demonstracijskimi projekti v svetu, ki potekajo v Sleipnerju na Norveškem (okoli 1 Mt/leto od leta 1996) (**slika 4**), Weyburnu v Kanadi (okoli 1,8 Mt/leto od leta 2000) in In Salahu v Alžiriji (okoli 1 Mt/leto od leta 2004), kjer CO₂ vtiskavajo globoko pod površje, smo pridobili veliko znanja. Mednarodno sodelovanje na področju raziskovanja skladiščenja CO₂ na omenjenih in drugih lokacijah, ki ga podpirata IEA-GHG* in CSLF*, je še posebej pomembno za boljše razumevanje tehnologije in oblikovanje svetovne znanstvene skupnosti, ki se ukvarja s to problematiko. Odličen primer je Posebno poročilo o CCS (2005), ki ga je izdelal IPCC*, opisuje pa trenutno znanje in ovire, ki jih je treba premagati na poti do splošne uvedbe te tehnologije. Dobre tehnične ekspertize že obstajajo, svet pa sedaj napreduje v demonstracijsko fazo. Poleg tehnološkega razvoja so bili načrtani še zakonodajni, regulativni, ekonomski in politični okviri, ugotavlja pa se tudi družbeno zaznavanje in podpora tehnologiji. Evropski cilj je, da bi do leta 2015 zagnali 12 velikih demonstracijskih projektov, kar bi omogočilo širšo komercialno uporabo do leta 2020. V ta namen je Evropska komisija januarja 2008 izdala Podnebno-energetski paket, ki uvaža Direktivo o geološkem shranjevanju ogljikovega dioksida in druge ukrepe za razvoj in varno izvajanje CCS.

Ključna vprašanja o geološkem skladiščanju CO₂

Mreža odličnosti CO₂GeoNet je bila oblikovana pod okriljem Evropske komisije kot skupina raziskovalnih ustanov, ki so sposobne doseči, da bo Evropa ostala na čelu obsežnih mednarodnih raziskovanj. Eden od ciljev CO₂GeoNet je dajanje jasnih znanstvenih informacij o tehničnih vidikih geološkega skladiščenja CO₂. Da bi spodbudili dialog o bistvenih vidikih te življenjsko pomembne tehnologije, so raziskovalci mreže CO₂GeoNet pripravili odgovore na pogosto zastavljena vprašanja. Na naslednjih straneh boste našli pojasnila, kako se izvaja geološko skladiščenje CO₂, pod kakšnimi pogoji je to možno in kakšna so merila za njegovo varno in učinkovito izvajanje.

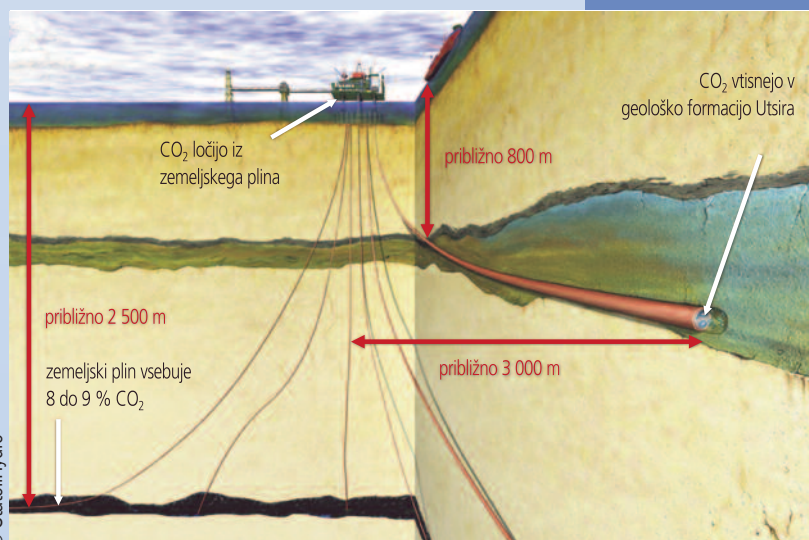


Slika 3

V elektrarnah poteka zajem z ločevanjem CO₂ iz drugih plinov. Nato ga stisnjene ga skozi cevovode ali z ladjami transportirajo do skladiščnih lokacij: globokih slanil vodonosnikov, izpraznjenih naftnih in plinskih polj, ležišč nekomercialnih plasti premoga.

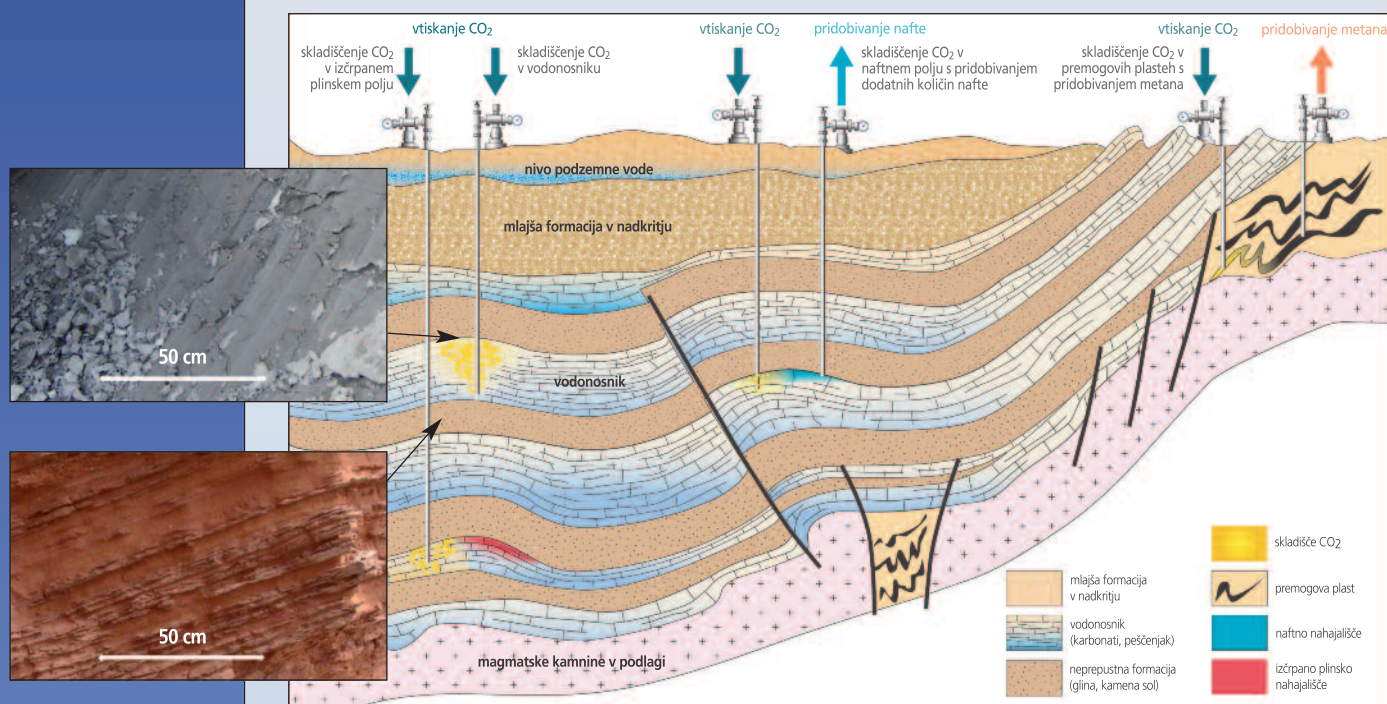
Slika 4

Presek skozi geološko skladišče Sleipner, Norveška. Zemeljski plin, ki ga zajemajo v globini 2500 m, vsebuje precej odstotkov CO₂, ki ga je treba za dosego komercialnih standardov odstraniti. Namesto da bi ga izpustili v ozračje, zajeti CO₂ vtisnejo v pesčen vodonosnik* Utsira v globino približno 1000 m.



Kje lahko shranimo CO₂ pod zemljo in kakšne količine?

CO₂ ni mogoče vtisniti kamorkoli pod površje, ampak je treba poiskati za skladiščenje primerno geološko formacijo. Take formacije obstajajo po vsem svetu, njihova prostornina pa je dovolj velika, da lahko bistveno prispevajo k ublažitvi podnebnih sprememb, katerih povzročitelj je človek.



Slika 1
CO₂ vtisnemo v globoke geološke plasti s poroznimi in prepustnimi kamninami (kot peščenjak na spodnji fotografiji), prekrite z neprepustnimi plastmi (kot glinovec na zgornji fotografiji), ki preprečujejo, da bi CO₂ ušel na površje. Glavne možnosti skladiščenja CO₂ so v:
1. v osiromašenih naftnih ali plinskih poljih oziroma s pridobitvijo dodatnih količin nafte ali plina (EOR*), kjer je to primerno;
2. vodonosnikih, v katerih je slana voda, ki ni primerna za človeško uporabo;
3. globoke nekomercialne plasti premoga, kjer lahko lokalno dodatno pridobivamo še metan

Za skladiščenje CO₂ obstajajo tri osnovne možnosti (**slika 1**):

1. izčrpana naftna in plinska polja so zaradi izkoriščanja ogljikovodikov dobro preiskana, zato predstavljajo možnost za takojšnje skladiščenje CO₂;
2. slani vodonosniki predstavljajo možnost za skladiščenje velikih količin CO₂, vendar v glavnem niso dobro raziskani;
3. nekomercialne plasti premoga so možnost za prihodnost, ko bo rešeno vprašanje vtiskanja velikih količin CO₂ v slabo prepustne* plasti premoga.

Skladiščne plasti

Ko CO₂ vtisnemo pod površje v primerno skladiščno plast*, zapolni pore med zmi in razpoke, pri tem pa izpodrine vse druge fluide (pline, vodo, nafto), ki so tam bili pred vtiskanjem. Kamnine, primerne za geološko skladiščenje, morajo zato biti čim bolj porozne* in prepustne. Takšne geološke formacije so nastale z odlaganjem sedimentov v geološki preteklosti in so pogosto v tako imenovanih sedimentnih bazenih. Tu se

prepustne plasti lahko izmenjujejo z neprepustnimi, ki lahko delujejo kot tesnilne plasti*. V sedimentnih bazenih so pogosto ogljikovodiki in naravno ujeti CO₂, kar dokazuje, da so sedimentni bazeni zmožni zelo dolgo zadrževati fluide, saj so nafta, plin in tudi naravni čisti CO₂ zadrževali že milijone let.

Na skicah je pod površje pogosto prikazano s pretirano poenostavljeno geološko zgradbo: homogeno zgradbo ali pravilno plastovito strukturo, podobno torti. V resnici gradijo pod površje neenakomerno razporejene in lokalno prelomljene kamninske formacije, zato so skladiščne in tesnilne plasti del kompleksne heterogene strukture. Za oceno primernosti podzemnih struktur za dolgoročno skladiščenje CO₂ je zato potrebno poglobljeno poznavanje geološke strukture lokacije in geoznanstvene izkušnje.

Potencialna geološka skladišča CO₂ morajo izpolnjevati številne pogoje, med katerimi so bistveni naslednji:

- zadostna poroznost, prepustnost in skladiščna kapaciteta;
- prisotnost neprepustnih kamnin neposredno nad skladiščno plastjo – t. i. tesnilna plast (npr. glina,

glinovec, lapor, kamena sol), ki preprečuje, da se CO₂ širi navzgor;

- prisotnost geoloških struktur v obliki pasti – recimo kupolasto oblikovana krovna plast, ki omejuje širjenje CO₂ znotraj skladiščne formacije;
- globine več kot 800 m, kjer so tlaki in temperature dovolj visoki, da omogočajo skladiščenje CO₂ v stisnjeni tekoči fazi, saj tako povečamo količino uskladiščenega CO₂;
- odsotnost pitne vode – CO₂ ne bomo shranjevali tam, kjer je prisotna voda, primerna za človeško rabo in dejavnosti.

Kje so v Evropi primerne skladiščne lokacije

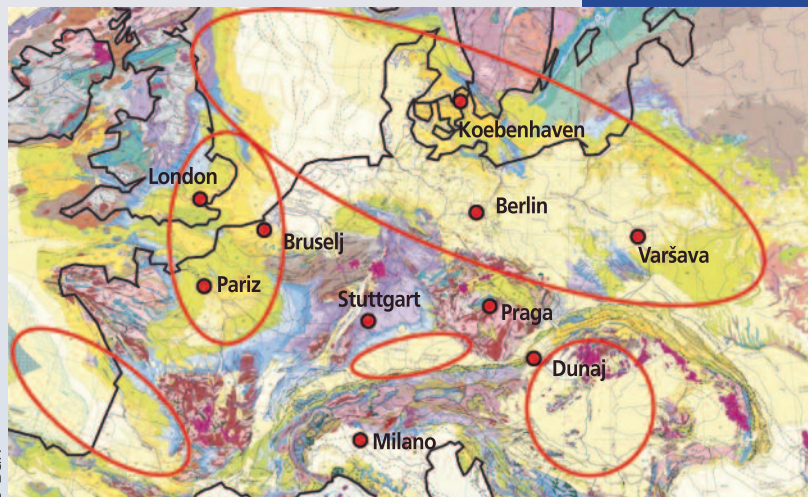
Sedimentni bazeni so razširjeni po celi Evropi, na primer pod Severnim morjem, na kopnem pa okoli alpske verige (**slika 2**). Veliko formacij v evropskih sedimentnih bazenih izpolnjuje pogoje za geološko skladiščenje in jih raziskovalci že kartirajo in raziskujejo. Ostala evropska območja gradijo konsolidirane kamnine Zemljine skorje, kot večji del Skandinavije, zato tam ni primernih kamnin za skladiščenje CO₂.

Primer potencialnega skladišča je južni permijski bazen, ki se razteza od Anglije do Poljske (največja elipsa na sliki 2). Sedimenti so bili podvrženi kamninotvornim procesom, po katerih je nekaj por ostalo zapolnjenih s slano vodo, nafto ali zemeljskim plinom. Plasti gline med poroznimi peščenjaki so se preobrazile v nizkoprepustne plasti, ki preprečujejo dvigovanje fluidov proti površju. Veliko peščenih formacij je v globinah od 1 do 4 km, kjer je tlak dovolj visok za skladiščenje CO₂ v gosti fazi. Vsebnost soli v vodi na teh globinah narašča od 100 do 400 g/l, kar je precej več od vsebnosti soli v morski vodi (35 g/l). Premiki znotraj bazena so povzročili nastanek plastičnih deformacij kamene soli, da so se oblikovale v stotine kupolastih struktur (strukture v obliki dome), kamor se je naknadno ujel zemeljski plin. Prav te pasti proučujejo kot možne skladiščne lokacije in pri pilotnih projektih.

Skladiščne kapacitete

Podatke o skladiščnih kapacitetah CO₂ potrebujejo politiki, upravni organi in izvajalci skladiščenja. Ocene so običajno zelo približne in temeljijo na prostorskem obsegu potencialno primernih formacij. Ocenimo jih lahko na različnih ravneh – na ravni države za grobo oceno ali na ravni posameznega bazena oziroma skladiščne plasti za natančnejšo oceno, kjer upoštevamo tudi heterogenost in kompleksnost dejanske geološke strukture.

Teoretične kapacitete. Objavljene državne kapacitete običajno temeljijo na izračunu prostornine por skladiščnih plasti. Teoretično se kapaciteta določene skladiščne plasti izračuna tako, da njeno površino pomnožimo z debelino, povprečno poroznostjo in



povprečno gostoto CO₂ v danih globinskih pogojih. Ker pa pore že zaseda voda, lahko za skladiščenje izkoristimo le majhen del tega prostora, v splošnem ocenjen na okoli 1 do 3 %. Tako izračunana vrednost predstavlja teoretično kapaciteto.

Efektivne kapacitete. Realnejše ocene kapacitet lahko naredimo za posamezne skladiščne lokacije s pomočjo podrobnih preiskav. Debelina plasti ni konstantna in tudi skladiščne lastnosti se lahko spreminjajo na kratke razdalje. Poznavanje velikosti, oblike in geoloških lastnosti teh struktur zmanjša negotovost pri prostorninskih izračunih. Na podlagi teh informacij lahko računalniško simuliramo vtiskavanje in napovemo gibanje CO₂ znotraj skladiščne plasti ter tako realneje ocenimo skladiščno kapaciteto.

Praktične kapacitete. Kapaciteta ni odvisna zgolj od fizikalnih lastnosti kamnin. Tudi družbeni in ekonomski dejavniki vplivajo na to, ali bo določena struktura uporabljena za skladiščenje ali ne. Na primer transport CO₂ od izvora do mesta skladiščenja je povezan z določenimi transportnimi stroški. Kapaciteta je prav tako odvisna od čistosti CO₂, saj prisotnost drugih plinov zaseda prostor, namenjen CO₂. Pri odločitvi, ali bo neka lokacija dejansko tudi uporabljena za skladiščenje, pa bosta imeli končno besedo politika in družbena sprejemljivost.

Vemo, da so skladiščne kapacitete za CO₂ v Evropi velike, kljub negotovostim glede kompleksnosti, heterogenosti in družbeno-ekonomskih dejavnikov. V okviru evropskega projekta GESTCO* so skladiščne kapacitete v nahajališčih ogljikovodikov v Severnem morju in okoli njega ocenili na 37 Gt, kar bi omogočilo postavitev infrastrukture za vtiskavanje velikih količin CO₂ za več desetletij. Posodabljanje in nadaljnje ugotavljanje skladiščnih kapacitet za posamezne evropske države se izvaja v okviru projekta EU Geocapacity* za vso Evropo.

Slika 2
Geološka karta Evrope s prikazom glavnih sedimentnih bazenov (rdeče elipse), znotraj katerih je možno najti primerno plast za skladiščenje CO₂ (osnova je Geološka karta Evrope v merilu 1 : 5.000.000).



Kako transportiramo in vtiskavamo velike količine CO₂?

V industrijskem obratu po zajemu CO₂ stisnemo, transportiramo in skozi eno ali več vrtin vtisnemo v skladiščno formacijo. Celoten proces mora biti optimiran za skladiščenje več milijonov ton CO₂ na leto.

Stiskanje

Stisnjeni CO₂ zavzema v gosti fazi bistveno manj prostora kot v plinski. Potem ko v elektrarni ali drugem industrijskem obratu ločimo CO₂ iz dimnih plinov, visokokoncentriranemu CO₂ odvzamemo vodo in ga stisnemo. S tem postaneta transport in skladiščenje bolj učinkovita (**slika 1**). Dehidriranje je pomembno za preprečevanje korozije na opremi in napeljavah, poleg tega pa pri visokem tlaku nastajajo hidrati (trdi, ledu podobni kristali, ki lahko zamašijo cevi). Stiskanje se izvaja skupaj z dehidracijo v večstopenjskem procesu: ponavljamo postopek stiskanja, hlajenja in odvajanja vode. Tlak, temperaturo in vsebnost vode je treba prilagoditi pogoju transporta in tlačnim zahtevam na lokaciji skladiščenja. Ključni dejavniki pri projektiranju tlačnih naprav so pretok plina, sesalni in povratni tlak, toplotna kapaciteta plina in izkoristek kompresorja. Tehnologija stiskanja je razvita, njena uporaba pa je razširjena v številnih industrijskih panogah.

Transport

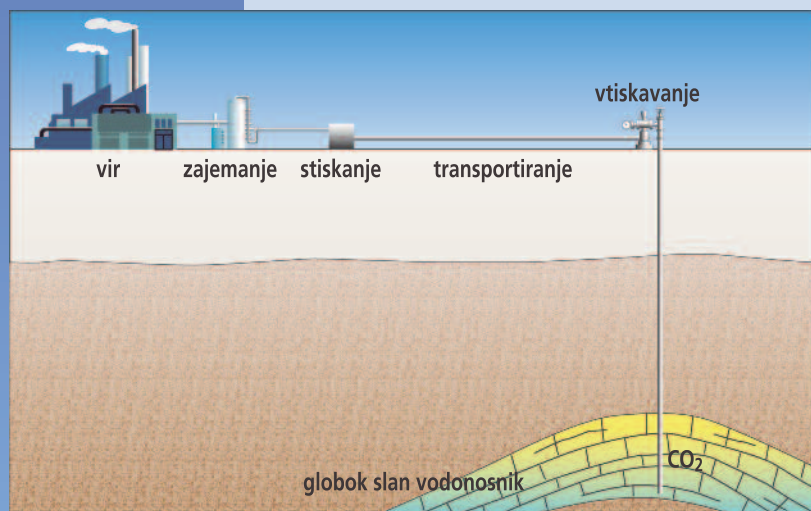
CO₂ lahko transportiramo z ladjo ali po cevovodu. Prevoz z ladjo se trenutno uporablja za industrijske namene, v zelo majhnem obsegu (10.000–15.000 m³), v prihodnosti pa bi ta način lahko postal privlačna

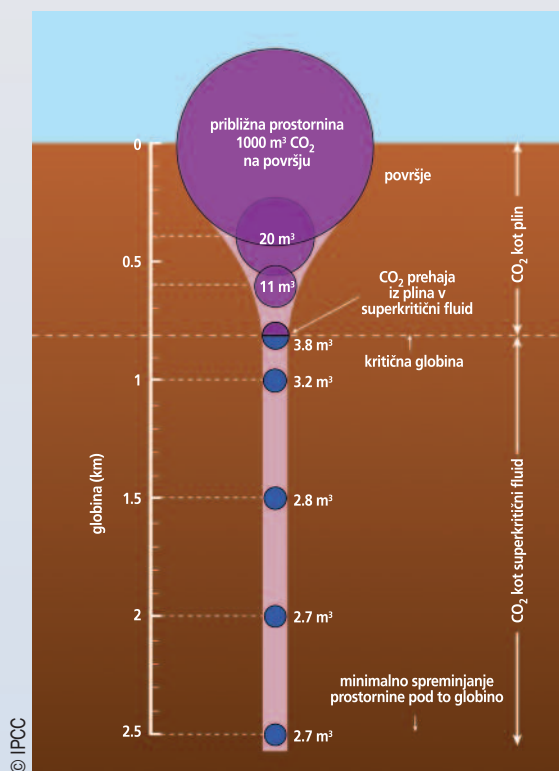
možnost povsod tam, kjer leži priobalni vir CO₂ zelo daleč od primerne skladiščne lokacije. Ladje, ki se uporabljajo za transport utekočinjenega naftnega plina (UNP), so prav tako primerne za transport CO₂. Še zlasti zato, ker so polhladilni sistemi pod tlakom in hlajeni, tako da se CO₂ lahko prevaža v tekočem stanju. Najnovejše ladje za prevoz UNP imajo kapaciteto do 200.000 m³ in lahko prevažajo do 230.000 t CO₂. Vendar pa z ladijskim prevozom ni zagotovljen stalen tok CO₂, zato so v pristaniščih nujna vmesna skladišča za pretovarjanje CO₂. Trenutno se za transport večjih količin CO₂, ki jih potrebujejo naftne družbe pri pridobivanju nafte iz osiromašenih naftnih polj (t. i. Enhanced Oil Recovery*), uporabljajo cevovodi. Po celem svetu, največ pa v ZDA, že obstaja približno 3000 km oglikovodov. Ta način transporta je stroškovno bolj učinkovit, njegova prednost pa je tudi, da zagotavlja stalen tok CO₂ od mesta zajema do mesta skladiščenja. Vsi obstoječi oglikovodi so pod visokimi tlaki, ki zagotavljajo superkritične* pogoje za CO₂, v katerih ima CO₂ gostoto tekočine, a se obnaša kot plin. Količino, ki jo lahko transportira cevovod, določajo trije pomembni dejavniki: njegov premer, tlak vzdolž cevi in posledično debelina stene cevi.

Vtiskavanje

Ko CO₂ prispe do skladiščne lokacije, ga pod pritiskom vtisnemo v skladiščno plast (**slika 2**). Tlak vtiskavanja mora biti ustrezno večji od tlaka v skladiščni plasti, da lahko izpodrine obstoječi fluid. Število vrtin za vtiskavanje je odvisno od količine CO₂, ki jo želimo shraniti, od hitrosti vtiskavanja (količina CO₂ na uro), od prepustnosti in debeline skladiščne plasti, od največjega še varnega tlaka vtiskavanja in od vrste vrtnice. Ker je naš cilj dolgoročno skladiščenje CO₂, moramo dobro poznati hidravlične lastnosti formacije. Velika hitrost vtiskavanja lahko povzroči povečanje tlaka na mestih vtiskavanja, še posebej v slabo prepustnih formacijah. Tlak, pod katerim vtiskujemo, naj ne bi presegal tlaka, pri katerem začnejo v kamnini nastajati razpoke ali porušitve, saj bi to lahko poškodovalo skladiščno ali zgoraj ležečo tesnilno plast. Z geomehanskimi preiskavami in modeli lahko določimo največji tlak vtiskavanja, pri katerem ne poškodujemo kamnin.

Slika 1
Postopek geološkega skladiščenja CO₂. Da bi CO₂ pripeljali od njegovega vira do mesta varnega in trajnega skladiščenja, mora iti skozi celotno verigo postopkov, ki vključujejo zajem, stiskanje, transportiranje in vtiskavanje.





Slika 2

Vtisnjen pod zemljo, na globino 0,8 km, postane CO_2 gost superkritičen* fluid. Njegova prostornina se na globini 2000 m dramatično zmanjša s površinskih 1000 m^3 na 2,7 m^3 . To je eden od dejavnikov, zaradi katerih je geološko skladiščenje velikih količin CO_2 tako privlačno.

Kemijski procesi lahko vplivajo na hitrost vtiskavanja CO_2 v formacijo. Okoli vrtine se lahko, odvisno od vrste kamnine v katero skladiščimo, sestave fluidov in fizikalnih pogojev v skladiščni plasti (temperature, tlaka, prostornine, koncentracije itd.), pojavijo procesi raztapljanja in izločanja mineralov. To lahko vodi do povečanja ali zmanjšanja hitrosti vtiskavanja. Takoj ko CO_2 vtisnemo, se ga del raztopi v slani vodi v skladiščni plasti, pH^* pa se rahlo zniža. Ta proces je omejen s količino raztopljenih karbonatnih mineralov v kamnini. Karbonati so prvi minerali, ki se raztopijo, saj je ta reakcija hitra in se začne takoj po začetku vtiskavanja. Proces raztapljanja sicer lahko poveča poroznost kamnine in zmožnost vtiskavanja*, vendar pa se lahko karbonatni minerali iz raztopine ponovno izločijo in zacementirajo pore v okolici vrtine. Z visokimi pretoki lahko omejimo zmanjšanje prepustnosti okoli vrtine, saj tako oddaljimo območje geokemičnega ravnovesja izločanja.

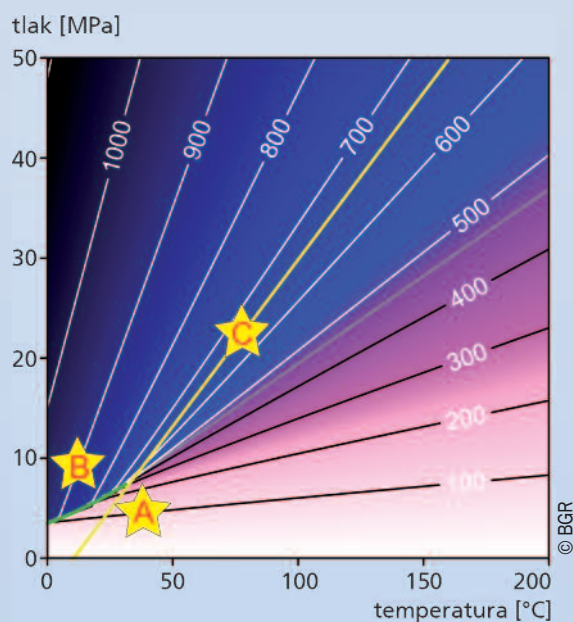
Sušenje je še en pojav, ki ga povzroča vtiskavanje. Po fazi zakisanja se preostala voda, ki obkroža vrtino, raztopi v vtisnjenem suhem plinu, kar povzroča koncentriranje kemičnih spojin v slanici*. Ko je slanica dovolj koncentrirana, se začnejo iz nje izločati minerali (npr. soli) in s tem zmanjšajo prepustnost okoli vrtine.

Ti pojavi pri vtiskavanju so odvisni od kompleksnosti medsebojnih procesov, ki se pojavljajo lokalno okoli vrtine, so pa tudi zelo odvisni od časa in oddaljenosti od vrtine. Njihove vplive ocenjujejo z numeričnimi simulacijami. Da se izognemo procesom, ki bi lahko omejili vtiskavanje zelenih količin CO_2 , moramo hitrosti vtiskavanja skrbno določiti.

Sestava toka CO_2

Sestava in čistost toka CO_2 , ki nastane v procesu zajema, pomembno vplivata na vse kasnejše vidike skladiščenja CO_2 . Prisotnost le nekaj odstotkov drugih substanc, kot so voda, vodikov sulfid (H_2S), žveplov in dušikovi oksidi (SO_x , NO_x), dušik (N_2) in kisik (O_2), spremeni fizikalne in kemične lastnosti CO_2 ter s tem njegovo obnašanje in učinke. Prisotnost teh substanc je treba skrbno upoštevati pri projektiranju postopkov stiskanja, transporta in vtiskavanja, pa tudi pri nastavitvah opreme in pogojev delovanja.

Skratka, transportiranje in vtiskavanje velikih količin CO_2 je že izvedljivo. Seveda bo treba vse postopke prilagoditi vsakemu projektu posebej, da bo geološko skladiščenje CO_2 postalo čim bolj razširjeno. Ključni parametri pri tem so termodinamične lastnosti toka CO_2 (slika 3), hitrosti toka ter pogoji vzdolž celotne transportne in skladiščne poti.



Slika 3

Gostota čistega CO_2 (v kg/m^3) v odvisnosti od temperature in tlaka. Rumena črta ustreza tipičnemu tlaku in temperaturnemu gradientu v sedimentnih bazenih. Več kot 800 m globoko (pribl. 8 MPa) omogočajo pogoji v skladiščni plasti visoke gostote (modro senčenje). Zelena krivulja je fazna meja med plinastim in tekočim stanjem CO_2 . Tipični tlačni in temperaturni pogoji so označeni za zajem (A), transport (B) in skladiščenje (C).

Kaj se dogaja s CO₂ v podzemnem skladišču?

Ko CO₂ vtisnemo v skladiščno plast, se ta začne vzgonsko dvigovati inapolnjevati pore pod tesnilno plastjo. Sčasoma se del CO₂ raztopi in končno mineralizira. Ti procesi potekajo v različnih časovnih okvirih in pripomorejo k trajnemu ujetju.

Mehanizmi ujetja

Ko CO₂ vtisnemo v skladiščno plast, začneapolnjevati pore v kamnini, ki so v večini primerov že zapolnjene s slanico.

Po vtisku se sprožijo štirje mehanizmi. Prvi je najpomembnejši in preprečuje, da bi se CO₂ dvignil na površje. Preostali trije pripomorejo k večjemu izkoristku in varnosti skladiščenja v daljšem časovnem obdobju.

1. Akumulacija pod tesnilno plastjo (strukturno ujetje)

Ker je gosti CO₂ lažji od vode, se začne dvigovati. Dvigovanje se ustavi, ko CO₂ doseže neprepustno kamnino, ki jo imenujemo tesnilna plast. Ta je običajno glina ali kamena sol in deluje kot past, ki CO₂ preprečuje pot navzgor, zato se nabere neposredno pod njo. **Slika 1** prikazuje dvigovanje CO₂ po medzrnskih prostorih (modro), vse dokler ne doseže tesnilne plasti.

2. Imobilizacija v majhnih porah (rezidualno ujetje)

Rezidualna imobilizacija se pojavi, ko so pore v skladiščni plasti tako ozke, da se CO₂ ne more dvigovati kljub razlikam v gostoti glede na okoliško vodo. Ta proces se v glavnem pojavi med migracijo CO₂. V odvisnosti od lastnosti skladiščne plasti običajno imobilizira le nekaj odstotkov vtisnjene CO₂.

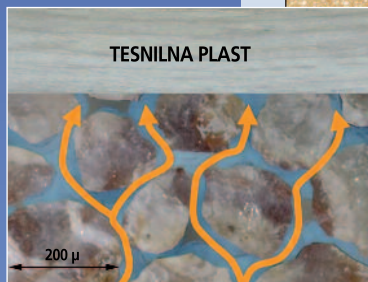
3. Raztapljanje (ujetje z raztapljanjem)

Majhen delež vtisnjene CO₂ se raztopi v slanici, ki je že prisotna v porah skladiščne plasti. Voda z raztopljenim CO₂ je težja od vode brez njega, zato tone proti dnu skladiščne plasti. Hitrost oziroma obseg raztapljanja sta odvisna od stika CO₂ s slanico. Količina CO₂, ki se lahko raztopi, je omejena z največjo koncentracijo. Ker vtisnjeni CO₂ potuje navzgor, voda z raztopljenim CO₂ pa navzdol, je omogočen stalen dotok nove slanice, kar povečuje količino raztopljenega CO₂. Proces raztapljanja so razmeroma počasni, saj se vse dogaja znotraj ozkih por. Po grobih ocenah se je pri projektu Sleipner v desetih letih vtiskanja raztopilo okrog 15 % CO₂.

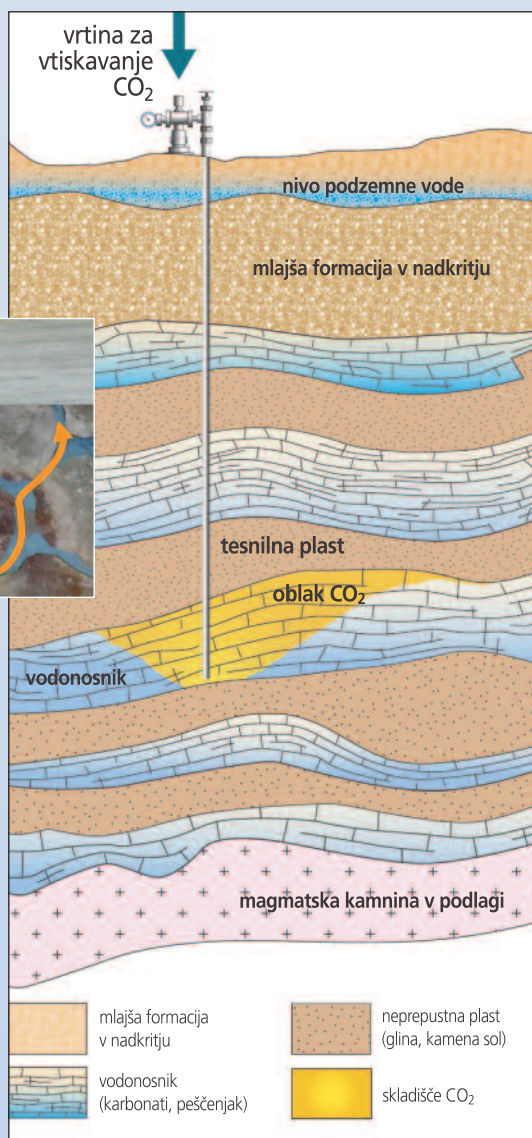
4. Mineralizacija (ujetje z mineralizacijo)

CO₂ lahko, še posebej v kombinaciji s slanico v skladiščni plasti, reagira z minerali iz kamnine te plasti. Nekateri minerali se lahko raztopijo, nekateri se lahko izločijo, odvisno od pH in od mineraloške sestave kamnine skladiščne plasti (**slika 2**). Ocene za Sleipner kažejo, da se v zelo dolgem obdobju z mineralizacijo imobilizira relativno majhen delež CO₂. V 10.000 letih naj bi se mineraliziralo le 5 % goste faze CO₂, 95 % pa raztopilo. V ločeni gosti fazi

mikroskopski pogled



Slika 1
Vtisnjeni CO₂, ki je lažji od vode, potuje navzgor, kjer ga ustavi zgornja neprepustna tesnilna plast.



© BRGM im@gé



Slika 2
Gosti CO₂ potuje navzgor (svetlo modri mehurčki), ob tem se raztaplja in reagira z zmi kamnine, kar vodi v izločanje karbonatnih mineralov na površini zemlje (belo).

torej ne bi ostalo nič CO₂.

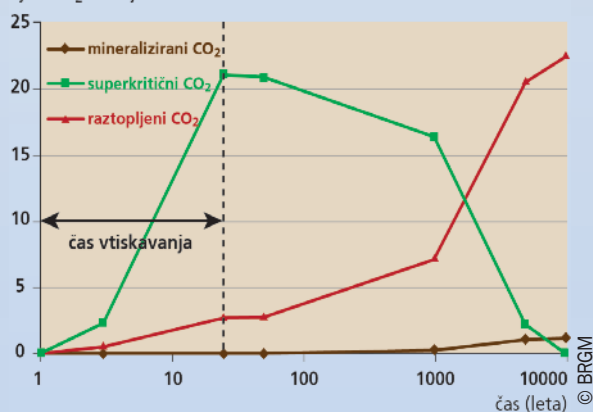
Relativna pomembnost mehanizmov ujetja je lokacijsko specifična, tj. odvisna od lastnosti posamezne lokacije. Na primer v kupolasto oblikovanih skladiščih bo CO₂ ostal pretežno v gosti fazi tudi daljše časovno obdobje, medtem ko se bo v sploščenih skladiščnih strukturah, kot na primer pri Sleipnerju, večino vtisnjenega CO₂ raztopilo in mineraliziralo. Na **sliki 3** so prikazani deleži CO₂, ki se bodo v Sleipnerju ujeli z različnimi mehanizmi v odvisnosti od časa.

Kako vemo vse to?

Znanje o teh procesih smo pridobili predvsem s štirimi viri informacij.

- **Laboratorijske meritve.** Gre za poskuse manjšega obsega, s katerimi proučujemo procese mineralizacije, pretoka in raztapljanja na vzorcih kamnin. Tako spoznavamo po obsegu manjše in kratkoročne procese.

ujeti CO₂ v milijonih ton



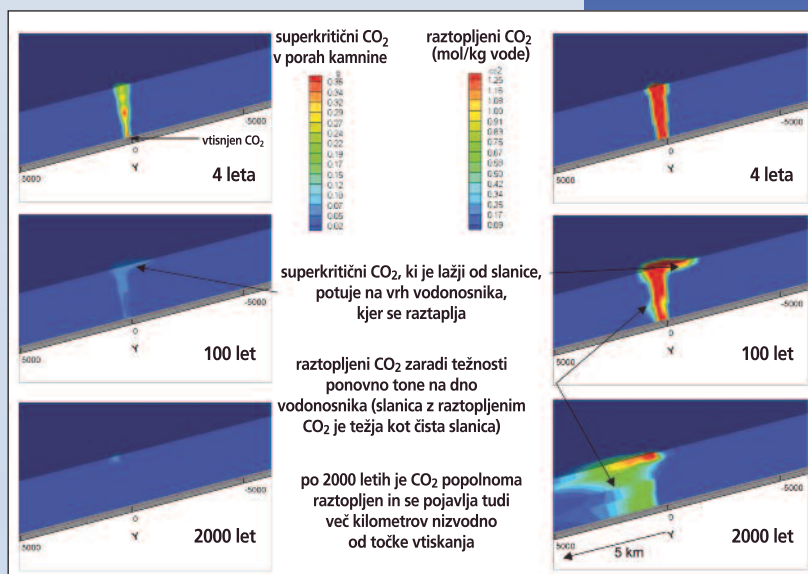
Slika 3
Razvoj različnih oblik CO₂ po simulacijah na lokaciji Sleipner. CO₂ se v superkritični obliki ujame s pomočjo mehanizmov 1 in 2, s pomočjo mehanizma 3 se raztaplja, s pomočjo mehanizma 4 pa mineralizira.

- **Numerične simulacije.** Z računalniškimi algoritmi lahko predvidimo obnašanje CO₂ v veliko daljšem časovnem obdobju (**slika 4**), pri tem pa laboratorijske poskuse uporabimo za umerjanje numeričnih simulacij.

- **Proučevanje naravnih nahajališč CO₂**, kjer je CO₂ (običajno vulkanskega izvora) ujet pod površjem že dolga obdobja, pogosto milijone let. Taka nahajališča, označujemo jih kot naravni analogi*, so vir podatkov o obnašanju plina in posledicah dolgotrajne prisotnosti CO₂ pod površjem.

- **Spremljanje obstoječih demonstracijskih projektov geološkega skladiščenja CO₂**, kot so Sleipner (v norveškem morju), Weyburn (Kanada), In Salah (Alžirija) in K12-B (nizozemsko morje). Rezultate simulacij lahko kratkoročno primerjamo z dejanskimi terenskimi podatki, kar pomaga izboljšati modele.

Slika 4
Tridimenzionalno modeliranje migracije CO₂ po štiriletnem vtiskavanju 150.000 ton v doggerski vodonosnik v Franciji. Predstavljamo situacijo za superkritični CO₂ (na sliki levo) in v slanici raztopljeni CO₂ (na sliki desno) 4 leta, 100 let in 2000 let po začetku vtiskavanja. Simulacija temelji na terenskih podatkih in poskusih.



Samo s stalnim navzkrižnim povezovanjem in preverjanjem podatkov iz teh štirih virov je mogoče pridobiti zanesljivo znanje o procesih, ki se pojavljajo nekaj tisoč metrov globoko pod našimi nogami.

Povzamemo torej lahko, da varnost skladiščenja CO₂ narašča s časom. Najbolj kritična točka je poiskati ustrezno skladiščno plast s primerno zgoraj ležečo tesnilno plastjo, ki lahko zadrži CO₂ (strukturno ujetje). Proces, kot so raztapljanje, mineralizacija in rezidualno ujetje, pomagajo preprečevati uhajanje CO₂ na površje.

Ali CO₂ lahko uhaja iz skladišča in kakšne bi lahko bile posledice?

Na podlagi proučevanja naravnih sistemov ne pričakujemo, da bi CO₂ iz skladiščnih lokacij, ki smo jih pazljivo izbrali, kakorkoli znatneje uhajal. Naravna nahajališča plina nam pomagajo razumeti, v kakšnih pogojih je plin ujet ali se sprošča. Poleg tega nam lokacije, kjer plin izhaja, pomagajo razumeti, kakšne morebitne posledice bi imelo uhajanje CO₂.

Poti uhajanja

Poti uhajanja lahko nastanejo zaradi človekovega delovanja (kot npr. globoke vrtine) ali pa so naravnega izvora (kot npr. razpoklinske cone in prelomi).

Poti uhajanja lahko predstavljajo tako aktivne kot opuščene vrtine, saj so neposredna povezava med površjem in skladiščno plastjo in so narejene iz materialov, ki sčasoma lahko korodirajo (*slika 1*). Dodatna težava je, da vse vrtine niso narejene z enako tehnologijo – novejšje so na splošno varnejše kot starejše. Kakorkoli, pričakovano tveganje uhajanja skozi vrtine je majhno, saj lahko tako stare kot nove vrtine zelo uspešno opazujemo z občutljivimi geokemičnimi in geofizikalnimi metodami, poleg tega pa v naftni industriji že poznajo tehnologije za sanacijske ukrepe, ki bi morebiti bili potrebni.

Uhajanje po naravnih prelomih in razpokah v tesnilni plasti ali v nadkritju* je bolj kompleksno, saj imamo opravka s ploskvami nepravilnih oblik s spremenljivo prepustnostjo. Dobro strokovno in tehnično razumevanje naravnih nahajališč, kjer plin izhaja, in tistih, kjer ne izhaja, nam omogoča načrtovanje

skladišča za CO₂ z enakimi lastnostmi, kot jih imajo milijone let stara naravna nahajališča CO₂ in metana.

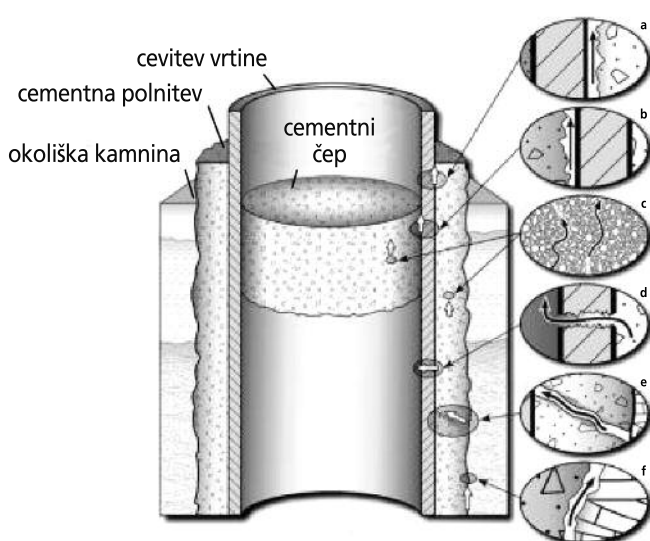
Naravni analogi in kaj smo se iz njih naučili?

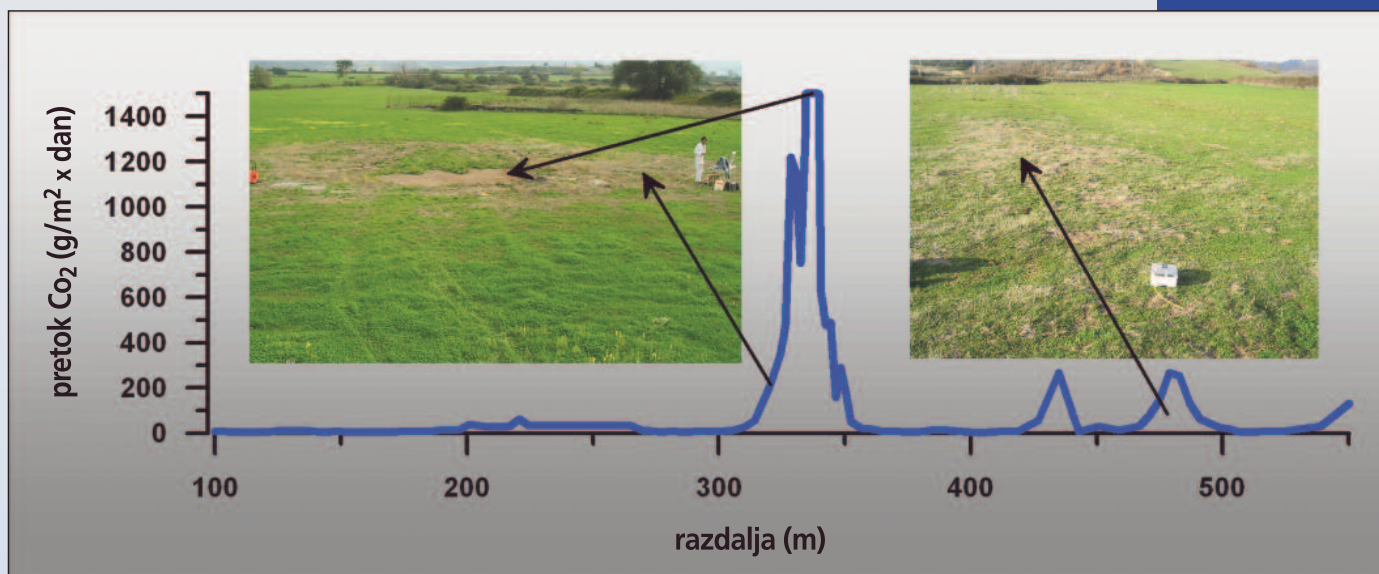
Naravni analogi, kot strokovno imenujemo naravna nahajališča, so neprecenljiv vir informacij za izboljšanje našega razumevanja migracije plinov v globinah in naravno izmenjavo plinov med Zemeljno površino in atmosfero. Glavne ugotovitve študij o številnih naravnih nahajališčih plina, iz katerih lahko izhaja CO₂, so:

- Plin, ki je nastal po naravni poti, je v ugodnih geoloških pogojih lahko ujet pod površjem sto tisoče in milijone let.
- Izolirana plinska nahajališča in žepi obstajajo celo v manj ugodnih geoloških pogojih (vulkanska območja).
- Migracija pomembnejših količin plina zahteva advekcijo (t. j. tok zaradi tlačnih razlik), saj je difuzija zelo počasen proces.
- Pogoji, pri katerih pride do advekcije: stanje fluida v skladiščni plasti je blizu litostatičnemu* tlaku, prelomi in razpoke ostanejo odprte, mehansko pa se lahko odprejo še nove poti.
- Območja, kjer naravni plin izhaja na površje, so skoraj izključno na močno razpokanih vulkanskih in potresnih območjih, mesta izhajanja pa so vzdolž aktivnih ali pred kratkim aktiviranih prelomov.
- Znatnejša izhajanja plina na površje so redka in so omejena na močno prelomljena vulkanska in geotermalna območja, kjer CO₂ neprekinjeno nastaja kot produkt naravnih procesov.
- Plinske anomalije na površju se običajno pojavljajo lokalno in z omejenimi prostorskimi vplivi na blizupovršinsko okolje.

Da pride do uhajanja plina, mora sovpasti kar nekaj pogojev, zato je zelo malo verjetno, da bi plin uhajal iz dobro izbranega in strokovno projektiranega geološkega skladišča CO₂. Za varno geološko skladiščenje CO₂ je treba pravilno izbrati lokacijo, načrtovati gradnjo in nadzorovati delovanje, za kar je treba zelo dobro poznati vse s tem povezane procese in možne učinke.

Slika 1
Možne poti uhajanja v vrtini. Uhajanje zaradi spremenjenega materiala (c, d, e) ali vzdolž stičnih ploskev (a, b, f).





Vpliv na ljudi

CO₂ vdihavamo ves čas. Človekovo zdravje ogroža le v velikih koncentracijah, saj vrednosti več kot 50.000 ppm (5 %) povzročajo glavobol, omotičnost in slabost. Večje vrednosti lahko povzročijo smrt, če je izpostavljenost daljša, oziroma zadušitev, če vsebnost kisika v zraku pade pod nivo, ki je potreben za človeško življenje (16 %). Če CO₂ uhaja v odprtem, ravnem okolju, se v zraku hitro razprši, tudi če skoraj ni vetra. Možno tveganje za prebivalstvo je tako omejeno na uhajanje plina v zaprtih okoljih ali v topografskih depresijah, kjer lahko pride do povečanja koncentracije CO₂, saj je težji od zraka in se zato zbira pri tleh. Poznavanje značilnosti območij naravnega izhajanja CO₂ je koristno pri preprečevanju tveganja in upravljanju. V resničnem svetu veliko ljudi živi na območjih, kjer je izhajanje naravnega plina vsakodnevni pojav. Na primer v Italiji, v Ciampinu blizu Rima, so hiše postavljene le 30 m od mesta izhajanja plina. Tu koncentracije CO₂ v tleh dosega 90 %, v ozračje pa vsak dan uide okrog 7 ton CO₂. Lokalni prebivalci se nevarnosti izogibajo tako, da upoštevajo preproste varnostne ukrepe, npr. ne spijo v pritličnih prostorih in dobro prezračujejo stavbe.

Vpliv na okolje

Možni vplivi na ekosistem se razlikujejo glede na to, ali je skladiščna lokacija pod morjem ali na kopnem. V morskih ekosistemih je glavna posledica uhajanja CO₂ lokalno znižanje pH in s tem povezani vplivi, primarno na živalstvo morskega dna, ki se ne more umakniti. Te posledice so prostorsko omejene, ekosistem pa, ko uhajanje pojenja, kmalu začne kazati znake okrevanja. V kopenskih ekosistemih lahko vplive združimo v tri skupine:

- **Vegetacija.** 20- do 30-odstotna koncentracija CO₂ v tleh je za gnojenje in pospeševanje rasti nekaterih rastlinskih vrst lahko celo koristna. Večje koncentracije so za nekatere vrste lahko tudi usodne. Ta vpliv je zelo lokaliziran na mesto izhajanja; le nekaj metrov stran je rastlinje že močno in zdravo (**slika 2**).
- **Kakovost podzemne vode.** Z dodanim CO₂ se spremeni kemična sestava podzemne vode, ki postane bolj kislila, iz mineralov in kamnin vodonosnika pa se lahko izločijo elementi. Tudi če bi CO₂ uhajal v vodonosnik s pitno vodo, bi vpliv ostal lokalni, znanstveniki pa še ugotavljajo količinski vpliv takega uhajanja. Zanimivo je, da je precej evropskih vodonosnikov obogatenih z naravnim CO₂, vodo iz njih stekleničijo in prodajajo kot »gazirano mineralno vodo«.
- **Kamninska neokrnjenost.** Zakisanje podzemne vode povzroča raztapljanje kamnine, zmanjšuje njeno strukturno celovitost in lahko pospeši nastanek udorov. Tovrstni vplivi se lahko pojavijo le v zelo specifičnih geoloških in hidrogeoloških razmerah (tektonska aktivnost, vodonosniki z velikim pretokom, s karbonati bogata mineraloška sestava) in ni verjetno, da bi se zgodili nad geološkimi skladišči.

Vplivi kakršnegakoli hipotetičnega uhajanja CO₂ bi bili specifični za vsako lokacijo posebej. Poglobljeno poznavanje geološkega in strukturnega stanja nam bo omogočilo odkriti morebitne poti premikanja plina, izbrati lokacije z najmanjšo verjetnostjo uhajanja, predvideti obnašanje plina ter tako ovrednotiti in preprečiti kakršnekoli bistvene vplive na ljudi in ekosistem.

Slika 2
Vpliv uhajanja CO₂ na vegetacijo pri velikem (levo) in zmanjšanem (desno) pretoku. Vpliv je omejen na mesto izhajanja CO₂

Kako spremljamo geološko skladišče CO₂ v globini in na površju?

Opazovanja skladiščnih lokacij CO₂ bomo morali izvajati iz obratovalnih, varnostnih, okoljskih, družbenih in ekonomskih razlogov. Predpisati je treba samo strategijo, kaj točno bomo opazovali in kako.

Zakaj je potrebno opazovanje?

Cilj geološkega skladiščenja CO₂ je dolgoročna izolacija antropogenega CO₂ iz atmosfere. Da bo ta cilj dosežen, je opazovanje skladiščne lokacije bistvenega pomena. Razlogi za opazovanje so številni:

- **obratovalni**, za nadzor in optimizacijo procesa vtiskanja;
- **varnostni in okoljski**, za zmanjšanje in preprečevanje vplivov na ljudi, živalstvo in ekosistem v bližini skladiščnih lokacij ter za blaženje globalnih podnebnih sprememb;
- **družbeni**, za zagotovitev obveščenosti javnosti, ki je pomembna za razumevanje varnosti skladiščenja in za pridobitev javnega zaupanja;
- **finančni**, za vzpostavitev zaupanja trga v CCS-tehnologijo in za preverjanje shranjenih količin CO₂, ki jih prijavljamo kot »preprečene emisije« v prihodnjih fazah trgovanja z emisijami (ETS).

Opazovanje tako začetnega stanja okolja kot kasnejšega stanja skladiščne lokacije sta pomembni regulativni zahtevi v Direktivi Evropske komisije o CCS, objavljeni z dne 23. 4. 2009. Upravljalci morajo dokazati, da skladiščenje poteka v skladu s predpisi in da bo tako tudi dolgoročno. Opazovanje je pomemben člen, ki zmanjša negotovost glede stanja skladiščne lokacije, zato mora biti tesno povezano z varnostnim upravljanjem.

Kateri so cilji opazovanja?

Opazovanje je lahko osredotočeno na različne cilje in procese v različnih delih skladišča.

- Spremljanje oblaka CO₂*. Gre za sledenje razširjanja CO₂ od točke vtiskavanja, kar zagotavlja ključne podatke za umerjanje modelov, ki napovedujejo nadaljnjo porazdelitev CO₂ znotraj skladiščne plasti.

Na voljo je veliko uveljavljenih metod, najbolj znane pa so seizmične meritve s ponovitvami, ki so jih že večkrat uspešno uporabili pri različnih pilotskih in demonstracijskih projektih (**slika 1**).

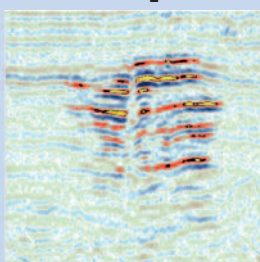
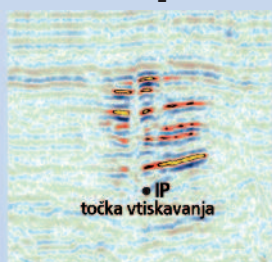
- **Tesnost krovnine**. Preveriti je treba, ali je CO₂ izoliran v skladiščni plasti, in zagotoviti zgodnje opozorilo v primeru nepričakovane migracije CO₂ proti površju. To je še posebej pomembno med fazo vtiskavanja, ko so tlaki v skladiščni plasti občutno, a začasno, povečani.
- **Celovitost vrtine**. Ta dejavnik je pomemben, saj lahko globoke vrtine predstavljajo neposredno pot uhajanja CO₂ proti površju. Vse vrtine za vtiskavanje CO₂, in za njegovo opazovanje ter morebitne obstoječe in opuščene vrtine moramo med fazo vtiskavanja in kasneje, skrbno opazovati, da lahko preprečimo nenaden izpust CO₂. Z opazovanjem tudi zagotovimo, da so vse vrtine, ki jih ne uporabljamo več, učinkovito zatesnjene. V vrtine ali na njihova ustja lahko namestimo sisteme za geofizikalno in geokemično opazovanje, ki so stalna praksa v naftni in plinski industriji, in tako z zgodnjim alarmiranjem zagotovimo varnost.
- **Migracija v nadkritje**. Na skladiščnih lokacijah, kjer v zgornjih delih nadkritja obstajajo plasti s podobnimi lastnostmi, kot jih ima tesnilna plast, predstavlja nadkritje ključno komponento za zmanjšanje tveganja uhajanja CO₂ v morje ali ozračje. Opazovanje nadkritja je potrebno takrat, ko opazovanja skladiščne plasti in njene okolice pokažejo nepričakovano prehajanje CO₂ skozi tesnilno plast. Za to lahko uporabimo različne metode spremljanja oblaka CO₂ ali celovitosti krovnine.
- **Površinsko uhajanje ter zaznavanje in meritve v atmosferi**. Da bi se prepričali, da se vtisnjeni CO₂ ne dviguje nazaj na površje, imamo na voljo vrsto geokemičnih in biokemičnih metod ter metod daljinskega zaznavanja. Z njimi lahko lociramo mesta uhajanja, ter ocenimo in opazujemo porazdelitev CO₂ v tleh in njegovo razpršenost v ozračju ali morskem okolju (**slika 2**).
- **Količina shranjenega CO₂** za upravne in finančne namene. Kljub temu da količino vtisnjenega CO₂ lahko merimo na ustju vrtine, je določanje količin v skladiščni plasti tehnično zelo zahtevno. Če pride do uhajanja v blizupovršinske plasti, je te količine treba ugotoviti za potrebe izračunov državne evidence izpustov toplogrednih plinov in za potrebe prihodnje trgovalne sheme z emisijami.

Slika 1
Seizmične meritve za spremljanje oblaka CO₂ v pilotskem projektu Sleipner pred začetkom vtiskavanja (leta 1996) in po vtiskavanju (3 oziroma 5 let kasneje).

pred vtiskavanjem (1994)

2.35 Mt CO₂ (1999)

4.36 Mt CO₂ (2001)



© StatoilHydro

- Premiki tal in mikroseizmičnost*. Povečan tlak v skladiščni plasti zaradi vtiskanja CO₂ lahko v določenih primerih poveča možnost za pojav mikroseizmičnosti in manjših premikov tal. Metode mikroseizmičnega opazovanja in metode daljinskega zaznavanja (iz letal in satelitov) omogočajo meritve tudi zelo majhnih deformacij površja.

Kako poteka opazovanje?

V obstoječih demonstracijskih in raziskovalnih projektih se že uporablja širok spekter opazovalnih metod. Vključene so metode, ki neposredno spremljajo CO₂, in metode, ki posredno spremljajo njegov vpliv na kamnine, fluide in okolje. Neposredne metode so recimo analize fluidov iz globokih vrtin ali meritve koncentracij plina v tleh in v ozračju. Posredne metode pa vključujejo geofizikalne metode, meritve spremembe tlaka v vrtini ali meritve sprememb pH v podzemni vodi.

Opazovanje je potrebno tako v morskih kot kopenskih skladiščih CO₂. Izbira ustreznih metod je odvisna od tehničnih in geoloških značilnosti skladiščne lokacije in ciljev, zaradi katerih opazovanje izvajamo. Na voljo so številne metode opazovanja, mnoge od njih so dobro utečene v naftni in plinski industriji (**slika 3**), zdaj pa so jih prilagodili za potrebe skladiščenja CO₂. Potekajo tudi raziskave za optimizacijo obstoječih metod in razvoj inovativnih tehnik, vse zato, da bi izboljšali ločljivost in zanesljivost ter s tem zmanjšali stroške, da bi avtomatizirali obratovanje in da bi dokazovali učinkovitosti.

Strategija opazovanja

Pri načrtovanju strategije opazovanja je treba sprejeti številne odločitve, ki so odvisne od geoloških in inženirskih razmer in so specifične za vsako skladiščno lokacijo posebej ter od razmer na površju. K prvim

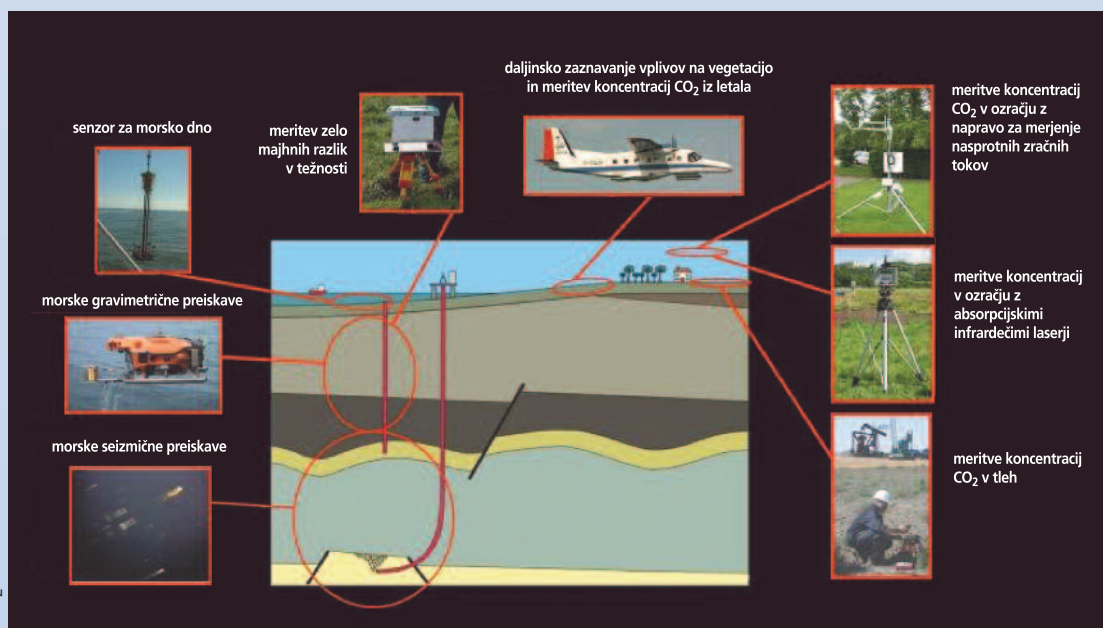


© CO₂-GeoNet

Slika 2
Boja za opazovanje, ki se energijsko napaja s sončnimi celicami, služi za vzorčevanje plina na morskem dnu.

štejemo geometrijo in globino skladiščne plasti, pričakovano širjenje oblaka CO₂, morebitne poti uhajanja, geološko zgradbo nadkritja, čas in hitrost vtiskavanja. Površinske značilnosti so topografija, gostota prebivalstva, infrastruktura in vrsta ekosistema. Ko se enkrat odločimo za najbolj primerne metode in za mesta opazovanja, moramo še pred začetkom vtiskavanja narediti začetne preiskave, ki so referenčne za vse nadaljnje meritve. Ne nazadnje, vsak program opazovanja mora biti fleksibilen, da se lahko razvija, kot se razvija sam projekt skladiščenja. Strategija opazovanja, ki vključuje vsa navedena vprašanja in hkrati izboljšuje stroškovno učinkovitost, predstavlja bistveno komponento za analizo tveganja in preverjanja varnosti in učinkovitosti skladiščenja.

Skratka, vemo, da je za opazovanje skladiščnih lokacij na voljo veliko metod in še razvijajo nove. Cilj raziskav ni le razvijanje novih inštrumentov (zlasti za uporabo na morskih tleh), ampak tudi optimiranje opazovanja in zmanjševanje stroškov.



Slika 3
Manjši izbor metod, ki so na voljo za spremljanje različnih komponent skladiščne lokacije.

Katera varnostna merila je treba predpisati in upoštevati?

Za zagotovitev varnosti in učinkovitosti skladiščenja morajo upravni organi predpisati pogoje za projektiranje in delovanje, upravljalci pa jih morajo upoštevati.

Geološko skladiščenje CO₂ je zdaj že splošno sprejeto kot ena od verodostojnih možnosti za blaženje podnebnih sprememb. Toda pred splošno industrijsko uporabo je treba vzpostaviti varnostna merila za zaščito zdravja ljudi in lokalnega okolja. Upravni organi merila predpišejo upravljalcem kot zagotovilo, da bodo vplivi na zdravje, varnost in okolje (vključno z vodnimi viri) kratkoročno, srednjeročno in dolgoročno zanemarljivi.

Eno ključnih izhodišč geološkega skladiščenja CO₂ je, da mora biti trajno. Posledično pričakujemo, da CO₂ iz skladišča ne bo uhajal. Toda kaj, če? Ta scenarij pomeni, da je treba oceniti tveganje, upravljalci pa morajo izvajati ukrepe za preprečitev uhajanja ali drugih nepravilnosti na skladiščni lokaciji. Po podatkih IPCC mora vtisnjeni CO₂ ostati pod zemljo najmanj tisoč let, da bi se vsebnost CO₂ v atmosferi ustalila oziroma zmanjšala z izmenjavo z oceansko vodo, kar bi minimiziralo dvig temperature na površini zaradi globalnega segrevanja. Seveda pa je lokalne vplive treba oceniti v časovnem razponu od nekaj dni do več tisoč let.

V življenjski dobi projekta geološkega skladiščenja CO₂ je pomembnih nekaj ključnih faz (**slika 1**).

- s skrbno izbiro skladiščne lokacije in njeno karakterizacijo,
- z oceno varnosti,
- s pravilnim obratovanjem,
- z ustreznim načrtom opazovanja,
- z ustreznim načrtom sanacije.

da preprečimo neugodne medsebojne vplive z vrtino, skladiščno plastjo, tesnilno plastjo in v primeru uhajanja tudi vpliv na podzemno vodo v višjih plasteh.

Varnostna merila za projektiranje

Varnost mora biti dokazana pred začetkom obratovanja. V zvezi z izbiro lokacije je treba proučiti:

- skladiščno in tesnilno plast;
- celotno nadkritje in znotraj tega še posebej neprepustne plasti, ki bi lahko služile kot pomožno tesnilo;
- prisotnost prepustnih prelomov ali vrtin, ki bi lahko predstavljali poti na površje;
- vodonosnike s pitno vodo;
- poseljenost in okoljske omejitve na površju.

Z raziskovalnimi metodami, ki so uveljavljene pri raziskavah za nafto in plin, ocenjujemo geologijo in geometrijo skladiščne lokacije.

Tok fluidov ter kemično in geomehansko modeliranje CO₂ v skladiščni plasti nam omogoča napovedovanje obnašanja CO₂ in dolgoročen izid ter opredelitev parametrov za učinkovito vtiskavanje. Skrbna karakterizacija skladiščne lokacije omogoča opredelitev pogojev »normalnega« poteka shranjevanja za ustrezno skladiščno lokacijo, za katero smo prepričani, da bo uspešno zadrževala CO₂ v skladišču. Ocena tveganja mora upoštevati tudi manj verjetne scenarije, do katerih bi lahko prišlo v skladišču, vključno z nepričakovanimi dogodki. Predvsem je pomembno predvideti morebitne poti uhajanja, izpostavljenost lokacije in s tem povezane morebitne posledice (**slika 2**).

Vsak scenarij uhajanja morajo analizirati strokovnjaki, in kjer je le mogoče, uporabiti numerične modele, da se oceni verjetnost nastanka dogodka in njegova resnost. Npr. razvoj oblaka CO₂ je treba skrbno spremljati, da odkrijemo morebitno povezavo s prelomno cono. V oceni tveganja je treba natančno ovrednotiti občutljivost spremenljivosti vhodnih parametrov in njihovo nezanesljivost. Ocenjevanje možnih vplivov CO₂ na ljudi in okolje mora biti opredeljeno v študiji presoje vplivov na okolje, kar je običajna praksa v postopkih izdaje dovoljenj industrijskim objektom. V postopku za ocenitev morebitnega tveganja v povezavi z objektom se proučita oba scenarija, normalni in tisti z uhajanjem CO₂.

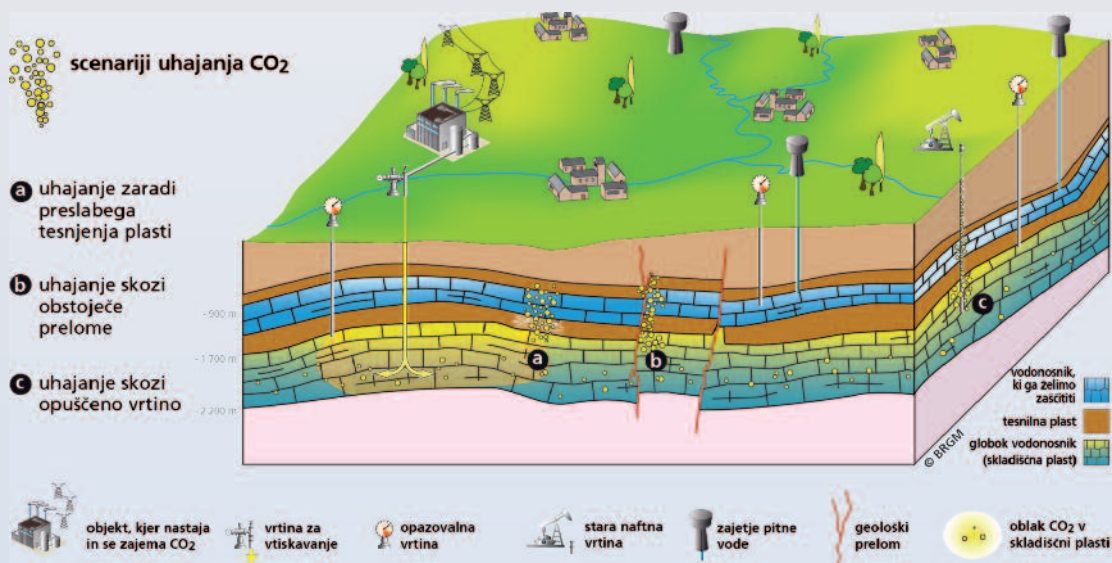
V skladu z analizo ocene tveganja je treba izdelati dolgoročni in kratkoročni program opazovanja, s katerim

Slika 1
Faze skladiščenja.



S tem povezani ključni cilji so:

- zagotoviti tesnjenje skladišča;
- zagotavljanje neoporečnosti vrtin;
- ohraniti fizikalne lastnosti skladiščne formacije (vključno s poroznostjo, prepustnostjo, zmožnostjo vtiskavanja) in neprepustnost tesnilne plasti;
- upoštevati sestavo CO₂, ki ga skladiščimo, in biti posebej pozoren na kakršnekoli nečistoče, ki niso bile odstranjene pri zajemu. To je pomembno,



Slika 2
Možni scenariji uhajanja

se spremlja kritične parametre, opredeljene v različnih scenarijih. Glavni namen opazovanja je spremljanje širjenja oblaka CO₂, preverjanje neoporečnosti vrtine in tesnilne plasti, odkrivanje vsakega uhajanja CO₂, določanje kakovosti podzemne vode in zagotavljanje, da CO₂ ni dosegel površja. Ocena tveganja vsebuje načrt blažilnih ukrepov in sanacijskih postopkov. Del načrta je tudi podroben seznam popravnih ukrepov, ki bi jih potrebovali v primeru uhajanja ali nepravilnega delovanja skladišča. Načrt vključuje poškodbe tesnilne plasti in napake na vrtini v fazi vtiskavanja in po njej ter predvideva skrajne sanacijske rešitve, kot je reverzibilnost skladiščenja. Poleg teh upoštevajo tudi obstoječe znanje in standardne postopke, ki se uporabljajo pri raziskavah in izkoriščanju nafte in plina, kot so popravo vrtin, znižanje tlaka vtiskavanja, delno ali popolno odstranitev plina, izčrpavanje vode za znižanje tlaka, črpanje plina iz površinskih plasti itd.

Varnostna merila med obratovanjem in po zaprtju

Glavna skrb glede varnosti se pojavlja v fazi obratovanja: po končanem vtiskavanju se tlak zniža, kar prispeva k varnosti. Zaupanje v sposobnost varnega vtiskavanja in skladiščenja CO₂ temelji na izkušnjah iz industrije. CO₂ se dokaj pogosto uporablja v različnih industrijah, zato delo z njim ne predstavlja nobenih novih težav. Načrtovanje in nadzor obratovanja bosta temeljila predvsem na znanju iz naftno-plinske industrije, še posebej na izkušnjah s sezonskim skladiščenjem zemeljskega plina ali pridobivanjem dodatnih količin ogljikovodikov z vtiskavanjem fluidov (EOR-/EGR-postopki). Nadzorovati bo treba naslednje glavne parametre:

- tlak vtiskavanja in hitrost toka – tlak vtiskavanja se vzdržuje pod mejo tlaka porušitve, to je tlaka, nad katerim se v tesnilni plasti pojavijo razpoke;

- vtisnjeno količino za preverjanje ustreznosti modelnih napovedi;
- sestavo vtisnjenega CO₂;
- stanje in neporušenost vrtine za vtiskavanje in vseh vrtin, ki so v bližini območja razširjanja oblaka CO₂;
- razširjanje oblaka CO₂ in odkrivanje uhajanja;
- stabilnost tal.

Med vtiskavanjem je treba obnašanje CO₂ ves čas primerjati z napovedmi. To prispeva k boljšemu poznavanju skladiščne lokacije. Če zaznamo kakšno nenavadno dogajanje, moramo ustrezno prilagoditi program opazovanja in, če je potrebno, izvesti popravne ukrepe. Če sumimo, da plin uhaja, moramo metode za opazovanje osredotočiti na točno določen del skladišča, od skladiščne plasti pa do površja. Tako lahko odkrijemo dvigovanje CO₂ in morebitne škodljive medsebojne vplive, ki bi lahko prizadeli vodonosnik s pitno vodo, okolje in končno ljudi.

Ko je vtiskavanje končano, je na vrsti faza zapiranja. Vrtine je treba ustrezno zapreti in opustiti, ustrezno prilagoditi modeliranje in program opazovanja in po potrebi opraviti popravne ukrepe za zmanjšanje tveganja. Ko je stopnja tveganja dovolj nizka, se odgovornost za skladišče prenese na državne organe, opazovanje pa se minimizira ali popolnoma ustavi.

Evropska direktiva 2009/31/ES vzpostavlja pravni okvir, ki opredeljuje zajem in skladiščenje CO₂ kot veljavno možnost za zmanjšanje emisij, ki jo je možno izvajati varno in odgovorno.

Za konec. Varnostna merila so bistvenega pomena za uspešno izvajanje geološkega skladiščenja CO₂ v industrijskem obsegu. Prilagojena morajo biti vsaki skladiščni lokaciji posebej. Ta merila bodo še posebej pomembna za družbeno sprejemljivost in bistvena za izdajo dovoljenj, v katerih upravni organi določijo varnostna merila.

Razlaga izrazov

CCS (CO₂ Capture and Storage) • Zajem in skladiščenje CO₂.

CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) – Vodstveni forum za sekvenciranje ogljika • Mednarodna iniciativa za podnebne spremembe, ki je usmerjena v razvoj izboljšanih, cenovno učinkovitih tehnologij za ločevanje in zajem CO₂ ter njegov transport in dolgoročno varno skladiščenje.

EOR (Enhanced Oil Recovery) • Dodatno pridobljene količine nafte. Tehnika, s katero ob vtiskavanju fluidov (npr. CO₂) dodatno mobiliziramo nafto in tako povečamo njeno proizvodnjo.

EU Geocapacity • Evropski raziskovalni projekt, v okviru katerega so ocenili kapacitete za geološko skladiščenje CO₂ v Evropi v povezavi z antropogenimi izpusti CO₂.

GESTCO • Evropski raziskovalni projekt, v okviru katerega so ugotavljali možnosti geološkega skladiščenja CO₂ v 8 državah: Norveški, Danski, Veliki Britaniji, Belgiji, Nizozemski, Nemčiji, Franciji in Grčiji.

IEA-GHG (International Energy Agency – Greenhouse Gas R&D Programme) – Mednarodna agencija za energijo – raziskovalno-razvojni program o toplogrednih plinih • Mednarodno sodelovanje je usmerjeno v vrednotenje tehnologij za zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov, širjenje izsledkov teh študij, zaznavanje raziskovalnih, razvojnih in demonstracijskih ciljev in njihovo promocijo.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) – Medvladni forum o podnebnih spremembah • Organizacijo sta leta 1988 ustanovili WMO (World Meteorological Organization), Svetovna meteorološka organizacija, in UNEP (United Nations Environmental Programme), Program Združenih narodov za okolje z namenom pridobiti znanstvene, tehnične in socialno-ekonomske informacije, ki so pomembne za razumevanje podnebnih sprememb, njihovih morebitnih vplivov ter možnosti prilagajanja in obvladovanja. IPCC in Al Gore sta bila dobitnika Nobelove nagrade za leto 2007.

litostatični tlak • Sila, ki deluje na kamnino pod površjem, na enoto površine zaradi zgoraj ležečih plasti. Litostatični tlak narašča z globino.

mikroseizmičnost • Rahlo tresenje ali nihanje v Zemljini skorji, ki ni povezano s potresi. Sprožijo ga lahko različni naravni in umetni dejavniki.

nadkritje • Geološke plasti, ki ležijo med zaporno/tesnilno plastjo

in površino (ali morskim dnom).

naravni analogi • Naravno nahajališče CO₂. Obstajajo zaprta nahajališča in takšna, kjer CO₂ izhaja na površje. Njihovo raziskovanje lahko pripomore k boljšemu razumevanju dolgoročnih dogajanj v globokih geoloških sistemih.

oblak CO₂ • Območje znotraj kamninske mase, kjer se nahaja CO₂ pod superkritičnimi pogoji.

pH • Mera za kislost raztopin, kjer pH 7 pomeni nevtralnno vrednost.

poroznost • Odstotek celotne prostornine kamnine, ki ni zapolnjen z minerali. Vmesne praznine imenujemo pore in so lahko zapolnjene z različnimi fluidi. V večjih globinah je fluid tipično slana voda, lahko pa tudi nafta ali plini kot metan ali naravno nastali CO₂.

prepustnost • Lastnost porozne kamnine, da omogoča pretakanje fluidov. Mera relativne zmožnosti toka fluida ob določeni tlačni razliki.

skladiščna plast • Kamninsko telo, ki je zadosti porozno in prepustno, da sprejme in skladišči CO₂. Kot skladiščna kamnina najpogosteje nastopa peščenjak in apnenec.

slanica • Zelo slana voda, ki vsebuje zelo veliko količino raztopljenih soli.

superkritičen • Stanje fluida nad kritičnimi vrednostmi temperature in tlaka (31,03 °C in 7,38 MPa za CO₂). Lastnosti fluidov se zvezno spreminjajo – ob nizkih tlakih so bolj podobne plinom, ob visokih tlakih pa tekočinam.

tesnilna plast • Neprepustna kamninska plast, ki v primeru, da prekriva skladiščno plast, oblikuje past, ki preprečuje gibanje tekočin in plinov.

vodonosnik • Prepustno kamninsko telo, ki vsebuje vodo. Blizu površine ležeči vodonosniki se uporabljajo za oskrbo ljudi z vodo. Globlje ležeči vodonosniki običajno vsebujejo slano vodo, ki ni primerna za človekove potrebe. To so t.i. slani vodonosniki.

vertina • Krožna odprtina, ki jo naredimo z vrtnjem; zlasti globoka vertina majhnega premera, kot je npr. naftna vertina.

zmožnost vtiskavanja • Pove, na kakšen način se fluidi (npr. CO₂) vtiskavajo v geološko formacijo. Določen je s hitrostjo vtiskavanja, deljeno z razliko tlakov na dnu vrtnice za vtiskavanje, ter tlakom v geološki formaciji.

Še druge povezave:

Posebno poročilo Medvladnega foruma o podnebnih spremembah (IPCC) o CCS:

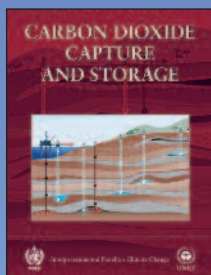
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Spletna stran Evropske komisije o CCSz informacijami o pravnih okvirih in izvajanju CCS Direktive:

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

Spletna IEA-GHG o možnih načinih opazovanja:

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



Kaj je CO₂GeoNet?



CO₂GeoNet je evropska znanstvena skupnost, na katero se lahko obrnete za jasne in izčrpne informacije o geološkem skladiščenju CO₂, inovativni in bistveni tehnologiji za ublažitev podnebnih sprememb. CO₂GeoNet je v začetku podprla Evropska komisija kot enega od projektov v okviru Mrež odličnosti 6. Okvirnega programa (EK OP6 pogodba 2004-2009). Mreža združuje 13 javnih raziskovalnih inštitutov iz 7 evropskih držav, vse z velikim mednarodnim ugledom in s kritično maso virov za raziskovanje geološkega skladiščenja CO₂. V letu 2008 se je CO₂GeoNet registrirala kot neprofitno združenje po določenih francoske zakonodaje z namenom, da bi nadaljevala z aktivnostmi tudi po zaključku financiranja s strani Evropske komisije.

CO₂GeoNet ima bogate izkušnje pri raziskovalnih projektih, ki obravnavajo skladiščno plast, tesnilno plast, načine opazovanja skladiščne lokacije, možne poti za migracijo CO₂ na površje, v primeru uhajanja CO₂ pa morebitne vplive na človeka in ekosistem, zaznavanje javnosti in sporočanje. CO₂GeoNet tako nudi podporo na štirih glavnih področjih: 1) skupno raziskovanje; 2) šolanje; 3) strokovno svetovanje; 4) informiranje in sporočanje.

CO₂GeoNet je sčasoma pridobila kapacitete ter je postala trajna znanstvena referenčna točka in avtoriteta v Evropi, ki je sposobna nuditi znanstveno podporo za široko in varno uporabo geološkega skladiščenja CO₂. V teku je razširitev te skupnosti na vseevropsko raven s projektom CGS Europe, koordinacijsko aktivnostjo, ki se financira iz 7. Okvirnega programa Evropske komisije (2010-2013). CGS Europe združuje zdravo jedro CO₂GeoNet in 21 drugih raziskovalnih institucij, ki tako pokriva 28 evropskih držav (24 držav članic EU in 4 pridružene članice). Tako se je oblikovala skupina več sto znanstvenikov, ki so pripravljeni z multidisciplinarnim povezovanjem obravnavati vse vidike geološkega skladiščenja CO₂. Naš namen je industriji in javnosti zagotoviti neodvisne in znanstveno podprte informacije o geološkem skladiščenju CO₂.



CO₂GeoNet: evropska mreža odličnosti za geološko skladiščenje CO₂

BGR (Nemčija); **BGS** (Združeno kraljestvo); **BRGM** (Francija); **GEUS** (Danska); **HWU** (Združeno kraljestvo); **IFPEN** (Francija); **IMPERIAL** (Združeno kraljestvo); **NIVA** (Norveška); **OGS** (Italija); **IRIS** (Norveška); **SPR** Sintef (Norveška); **TNO** (Nizozemska); **URS** (Italija);



CGS Europe: vseevropske koordinacijske aktivnosti za geološko skladiščenje CO₂

CO₂GeoNet (13 članic navedenih zgoraj); **CzGS** (Češka); **GBA** (Austrija); **GEOECOMAR** (Romunija); **GEO-INZ** (Slovenija); **G-IGME** (Grčija); **GSi** (Irska); **GTC** (Litva); **GTK** (Finska); **LEGMC** (Latvija); **ELGI** (Madžarska); **LNEG** (Portugalska); **METU-PAL** (Turčija); **PGI-NRI** (Poljska); **RBINS-GSB** (Belgija); **SGU** (Švedska); **SGUDS** (Slovaška); **S-IGME** (Španija); **SU** (Bolgarija); **TTUGI** (Estonija); **UB** (Srbija); **UNIZG-RGNF** (Hrvaška);



CO₂GeoNet si je pridobila široko priznanje na evropskem in mednarodnem prizorišču

CO₂GeoNet je priznana s strani Vodstvenega foruma za sekvenciranje ogljika (CSLF).



CO₂GeoNet tesno sodeluje z raziskovalno-razvojnimi programom o toplogrednih plinih Mednarodne agencije za energijo (IEAGHG).



Nastanek brošure

CO₂GeoNet je sprožila osnovno vprašanje, »kaj geološko skladiščenje CO₂ pravzaprav pomeni?« in to z namenom, da bi javnost seznanili z geološkim skladiščenjem CO₂. Iz izkušenj, ki izhajajo iz raziskav po vsem svetu, so ugledni znanstveniki CO₂GeoNet-a pripravili sodobne odgovore na šest bistvenih vprašanj. Namen teh prizadevanj je širši javnosti dati jasno in nepristransko znanstveno informacijo in vzpodbuditi dialog o bistvenih vprašanjih, ki zadevajo tehnične vidike geološkega skladiščenja CO₂. Delo, povzeto v tej brošuri, je bilo predstavljeno na prvi delavnici CO₂GeoNet v Parizu 3. oktobra 2007.

Brošura »Kaj geološko skladiščenje CO₂ pravzaprav pomeni?« je v več jezikih dosegljiva na:

www.co2geonet.com/brochure

CO₂GeoNet

evropska mreža odličnosti za geološko skladiščenje CO₂



www.co2geonet.eu

sekretariat: info@co2geonet.com



Slovenska različica te brošure je nastala v okviru projekta FP7 CGS Europe – Pan-European Coordination Action on CO₂ Geological Storage. Prevod je pripravil projektni partner Geoinženiring iz Ljubljane.



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** Petroleumforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Università di Roma La Sapienza-CERI