

Šta zaista znači geološko skladištenje **CO₂**?

Odgovorno korišćenje
fosilnih goriva

Uklanjanje glavnog izvora
gasova staklene bašte

Vraćanje ugljenika
u zemlju

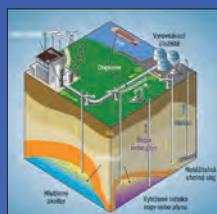
Dobijanje na vremenu potrebnom za
uvodenje energetskih resursa koji ne
ugrožavaju klimu



CO₂GeoNet Evropska mreža izvrsnosti



Sadržaj



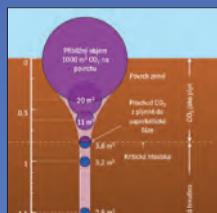
Klimatske promene i potreba za geološkim skladištenjem CO₂

4



1. Gde i koliko CO₂ možemo uskladištiti pod zemljom?

6



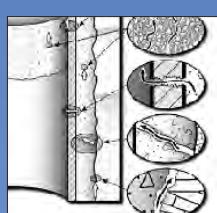
2. Kako možemo transportovati i upumpavati velike količine CO₂?

8



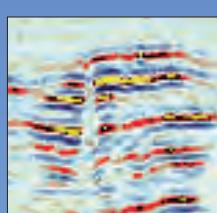
3. Šta se dešava sa CO₂ kad se nađe u podzemnom skladištu?

10



4. Da li CO₂ može da ističe iz podzemnog skladišta i koje su posledice ako može?

12



5. Kako možemo da vršimo monitoring skladišta u dubini i na površini terena?

14

6. Koji se sigurnosni kriterijumi moraju primeniti i poštovati?

16

Rečnik

18

Šta je CO₂GeoNet?

19

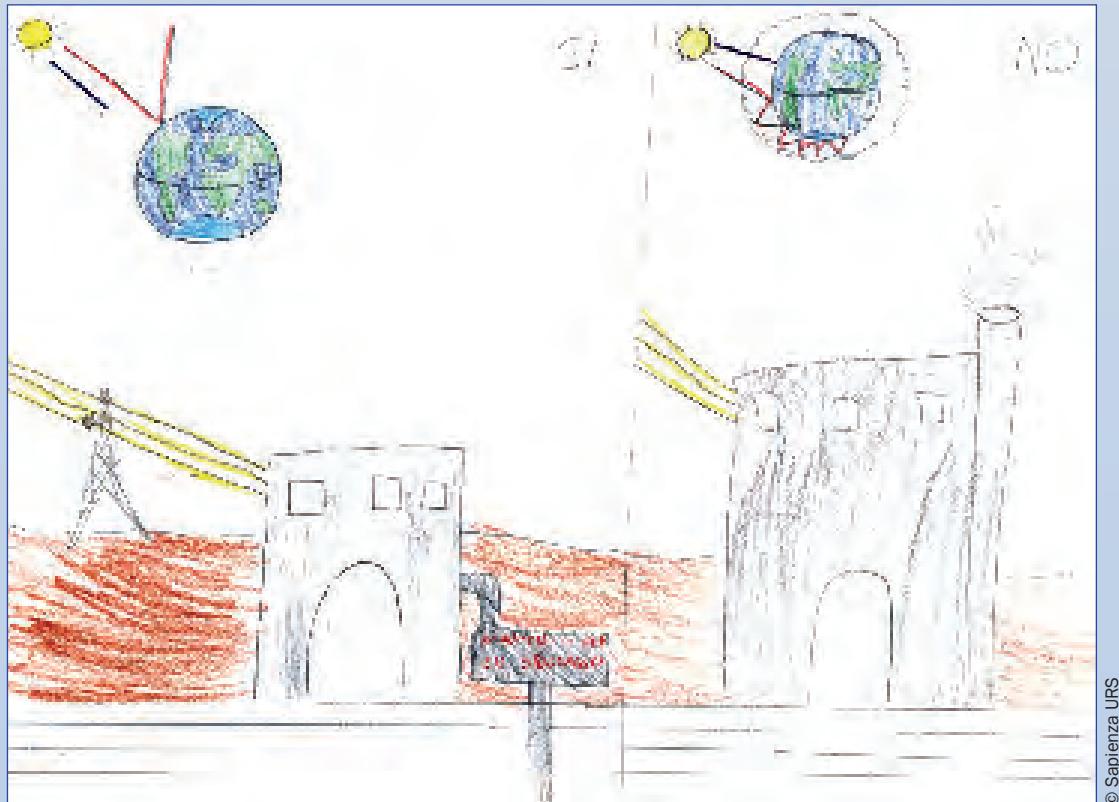
Ova brošura urađena je zahvaljujući angažovanju sledećih autora:

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 Remmerts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

Srpsku verziju prevela je Snežana Komatina-Petrović, lektorisao Miomir Komatina, a uredio Saša Smiljanić.

Vizija budućnosti

Nema više dimnjaka iz kojih izlazi dim
CO₂ se kroz cevovod upumpava pod zemlju
To je dobro za našu Planetu

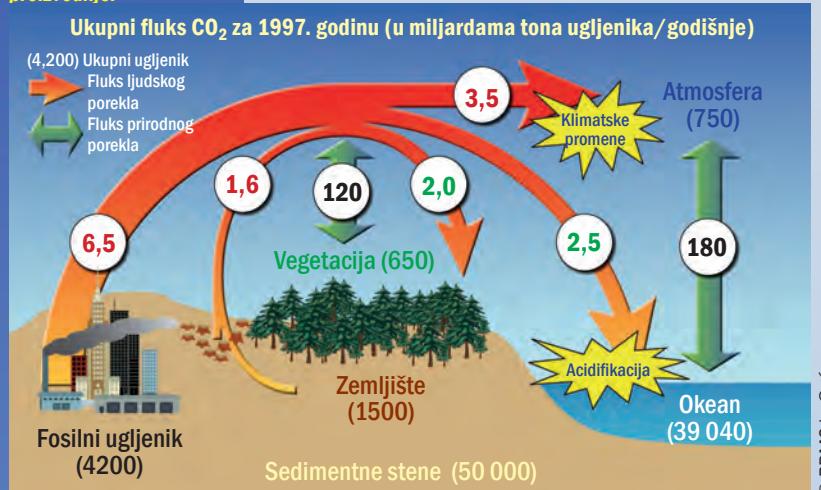


© Sapienza URS

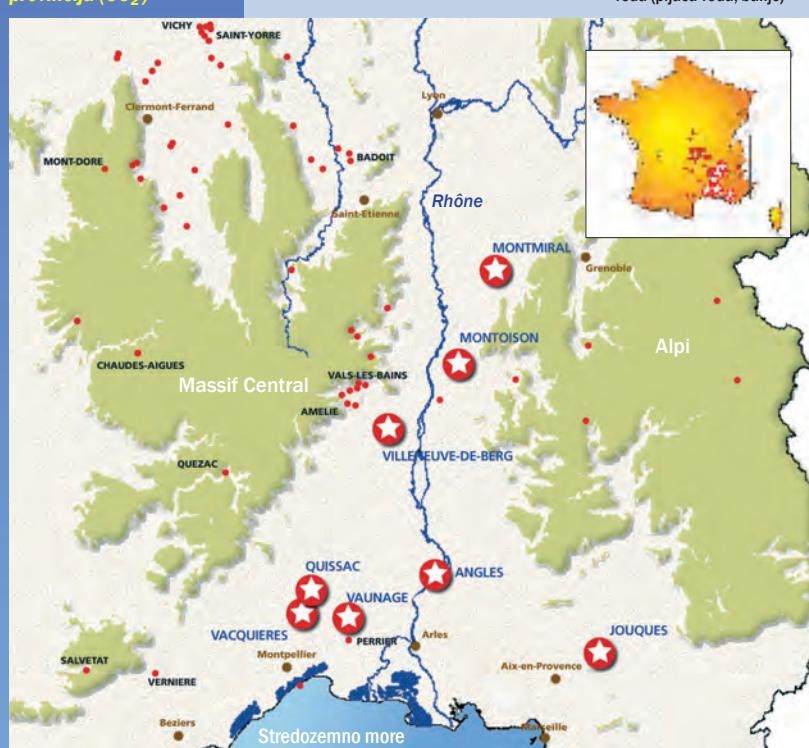
Za našu decu,
geološko skladištenje CO₂ ima smisla

Klimatske promene i potreba za geološkim skladištenjem CO₂

Slika 1
Globalna emisija CO₂ izazvana čovekovim aktivnostima iznosi do 30 miljardi tona (Gt) godišnje, što odgovara 8,1 Gt ugljenika: 6,5 Gt usled sagorevanja fosilnih goriva i 1,6 Gt zbog uništavanja šuma i poljoprivredne proizvodnje.



Slika 2
Francuska gasonosna provincija (CO₂)



Način je prihvaćena činjenica da čovekove aktivnosti ometaju ciklus kruženja ugljenika na Planeti. Od pre više od 10 000 godina, pa do industrijske revolucije, ovaj fino uravnoteženi ciklus, koji obuhvata prirodnu razmenu ugljenika između geosfere, biosfere, hidrosfere i atmosfere, doveo je do niskog sadržaja CO₂ u atmosferi (oko 280 ppm, tj. 0,028%). Međutim, u poslednjih 250 godina, korišćenje sve većih količina fosilnih goriva (ugalj, nafta, gas) za proizvodnju električne energije, grejanje, industriju i saobraćaj, neprekidno povećava količinu CO₂ koja se ispušta u atmosferu (**Slika 1**). Oko polovine ovog viška CO₂, nastalog čovekovom delatnošću, ponovo apsorbuje vegetacija ili se razgrađuje u okeanima, što dalje izaziva acidifikaciju i prateće štetne efekte na morske biljke i životinje. Ostatak se akumulira u atmosferi, izazivajući klimatske promene, pošto CO₂ spada u grupu gasova staklene baštice, koji zadržavaju deo Sunčeve topline i tako izazivaju zagrevanje Zemljine površine. Potrebno je hitno angažovanje na zaustavljanju daljeg porasta koncentracije CO₂ u atmosferi, sa sadašnjih 387 ppm (već sada je to porast od 38% u poređenju sa vrednostima pre pojave industrije) na kritični nivo od 450 ppm u narednim decenijama. Stručnjaci širom sveta slažu se da iznad ovog nivoa ne bi bilo moguće sprečiti najdrastičnije posledice.

Vraćanje ugljenika pod zemlju

Naš svet uglavnom zavisi od fosilnih goriva još od početka industrijskog doba 1750-ih godina, tako da ne iznenađuje što će pretvaranje našeg društva u društvo koje će se zasnovati na izvorima energije koji ne štete klimi zahtevati i vreme i novac. Ono što nam treba je prelazno rešenje, koje će nam pomoći da se smanji zavisnost od fosilnih goriva, a prvi korak bi trebalo da bude korišćenje ovih sirovina, u meri da ne zagađujemo životnu sredinu. Na taj način ćemo osigurati vreme koje nam je potrebno za razvoj tehnologije i infrastrukture za obnovljive izvore energije. Jedna od takvih opcija je i kreiranje zatvorenog kruga u sistemu proizvodnje energije, pomoću koga bi se ugljenik koji je izvorno izvaden iz zemlje u obliku gasa, nafte i uglja, ponovo vratio tamo u obliku CO₂. Zanimljivo je da podzemno skladištenje CO₂ nije ljudski izum, nego u potpunosti prirodna, raširena pojava, koja se ogleda u ležištima CO₂ koja postoje hiljadama i milionima godina. Jedan takav primer je niz od osam prirodnih ležišta CO₂ u jugoistočnoj Francuskoj, koja su otkrivena tokom naftnih istraživanja 1960-ih godina (**Slika 2**). Slična otkrića širom sveta dokazuju da geološke formacije mogu skladištitи CO₂ efikasno i sigurno tokom izuzetno dugih vremenskih razdoblja.

Kaptiranje i skladištenje CO₂: obećavajući put ublažavanja klimatskih promena

U okviru spektra mera koje hitno treba primeniti kako bi se ublažile klimatske promene i acidifikacija okeana,

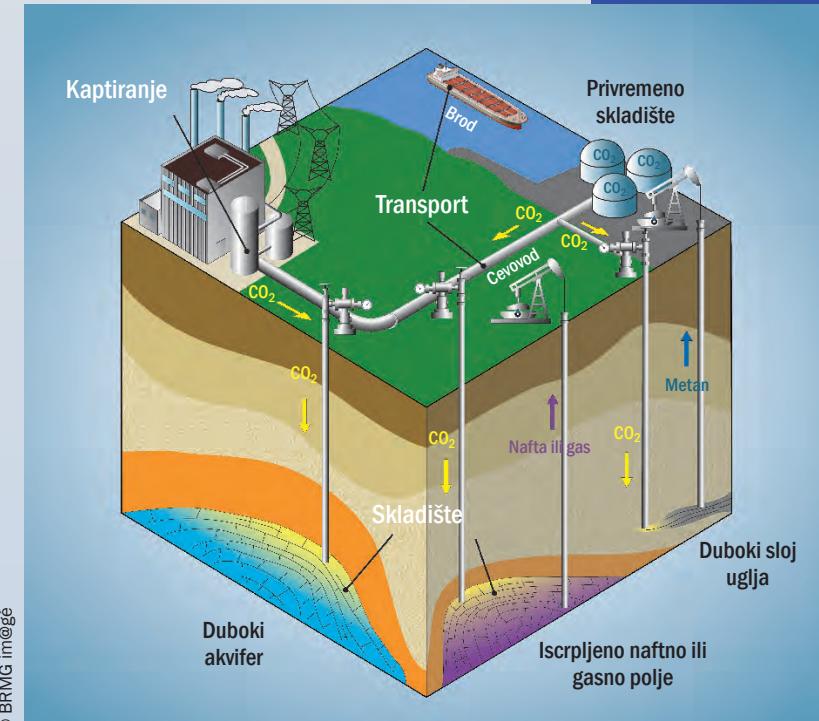
kaptiranje i skladištenje ugljenika (KSU*) mogu odigrati odlučujuću ulogu, jer bi mogli doprineti smanjenju ispuštanju CO₂ od 33%, a što je potrebno sprovesti do 2050. godine. KSU uključuje kaptiranje CO₂ u elektranama koje za pogonsko gorivo koriste ugalj ili gas i u industrijskim postrojenjima (čeličane, cementare, rafinerije, itd.), zatim transport cevovodom ili brodom do podzemnog skladišta, i na kraju - upumpavanje kroz buštinu* u odgovarajuću geološku formaciju pogodnu za dugoročno skladištenje (**Slika 3**). S obzirom na rastuću svetsku populaciju i povećanu potrebu za energijom u zemljama u razvoju, kao i na nedostatak alternativnih »čistih« energetskih izvora, kratkoročno nije moguće izbeći kontinuiranu upotrebu fosilnih goriva. Međutim, uz KSU čovečanstvo bi moglo napredovati tako da ne ugrožava životnu sredinu, dok bi istovremeno gradilo most prema svetskoj ekonomiji koja se zasniva na održivoj proizvodnji energije.

Nagli razvoj tehnologije KSU u svetu

Veliki istraživački programi KSU sprovode se u Evropi, Sjedinjenim Američkim Državama, Kanadi, Australiji i Japanu od 1990-ih godina. Mnogo znanja steceno je na prvim opsežnim demonstracionim projektima u kojima je CO₂ upumpavan duboko pod zemlju tokom nekoliko godina: Sleipner u Norveškoj (oko 1 Mt godišnje od 1996.), (**Slika 4**), Weyburn u Kanadi (oko 1,8 Mt godišnje od 2000.) i In Salah u Alžиру (oko 1 Mt godišnje od 2004.). Međunarodna saradnja u istraživanju skladištenja CO₂ na tim i na drugim lokacijama, koju predvode IEAGHG* i CSLF*, izuzetno je važna radi sticanja novih znanja i stvaranja svetske naučne zajednice koja se bavi tom problematikom. Odličan je primer Poseban izveštaj o kaptiranju i skladištenju ugljenika (2005) IPCC*, koji opisuje trenutno stanje znanja i prepreke koje treba savladati kako bi se omogućila široka primena ove tehnologije. Velika tehnička stručnost već postoji, i svet sada samouvereno prelazi u fazu demonstracije. Uz tehnički razvoj, definije se nacrt zakonodavnog, regulatornog, ekonomskog i političkog okvira i ocenjuje se društvena percepcija i podrška. U Evropi je cilj da se pokrene i vodi čak 12 opsežnih demonstracionih projekata do 2015. godine, kako bi se omogućio sveobuhvatni komercijalni razvoj do 2020. godine. U tu svrhu je u januaru 2008. godine Evropska komisija izdala Klimatsko-energetski paket, kojim se predlaže Direktiva o geološkom skladištenju CO₂ i druge mere koje bi promovisale razvoj i sigurnu upotrebu KSU.

Ključna pitanja o geološkom skladištenju CO₂

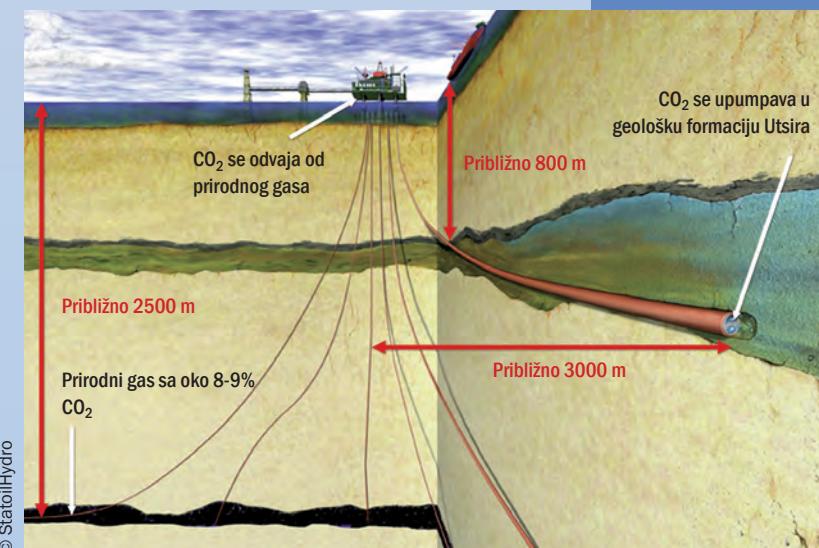
Mreža izvrsnosti CO₂GeoNet osnovana je pod pokroviteljstvom Evropske komisije kao grupa istraživačkih institucija koja je sposobna da održi Evropu u prvim redovima obimnog međunarodnog istraživanja. Jedan od ciljeva CO₂GeoNeta je prenošenje jasnih naučnih in-



formacija o tehničkim aspektima geološkog skladištenja CO₂. Kako bi pokrenuli razgovor o ključnim aspektima ove tehnologije od životnog značaja, naučnici CO2GeoNet su pripremili osnovne odgovore na nekoliko često postavljanih pitanja. Na sledećim stranicama pronaći ćete objašnjenja o tome kako se može sprovesti geološko skladištenje CO₂, u kakvim je uslovima ono moguće i koji su kriterijumi za njegovu sigurnu i efikasnu primenu.

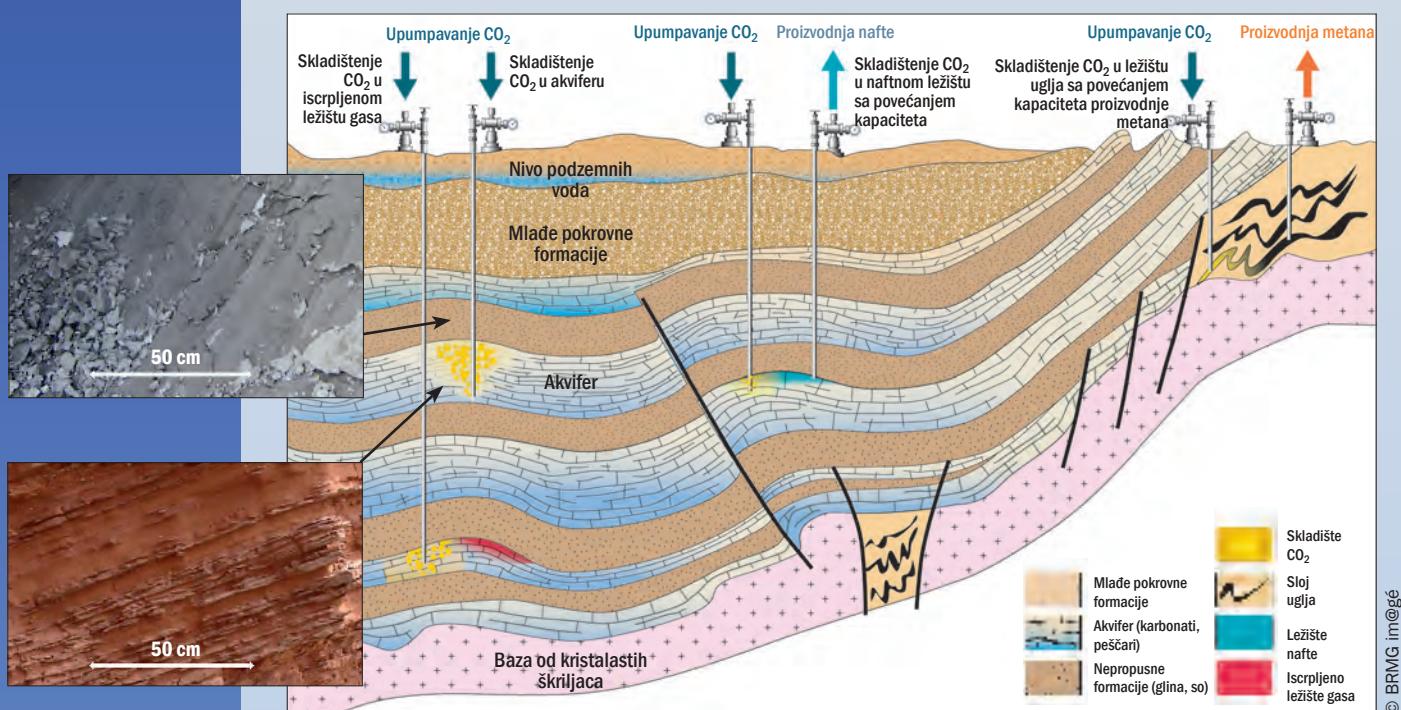
Slika 3
U elektranama se CO₂ zahvata odvajanjem od ostalih gасova.
Tada se komprimuje i transportuje kroz cevovod ili brodom do lokacije u kojoj se skladišti: duboke slane akvifere, iscrpljena naftna ili gasna polja, ili duboke slojeve ugleja.

Slika 4
Poprečni presek lokacije Sleipner u Norveškoj. Prirodni gas, koji se eksplorativiše sa dubine od 2500 m, sadrži određen procenat CO₂ koji treba ukloniti da bi gas bio u skladu sa komercijalnim standardima. Umesto da se ispusti u atmosferu, CO₂ se posle zahvatanja upumpava na dubinu od oko 1000 m u peščani akvifer* Utsira.



Gde i koliko CO₂ možemo uskladištiti pod zemljom?

CO₂ ne može biti upumpan baš bilo gde pod zemlju, već se prvo moraju odrediti odgovarajuće stene u kojima se mogu izgraditi podzemna skladišta. One postoje u celom svetu i nude dovoljan kapacitet kako bi se dao značajan doprinos u ublažavanju klimatskih promena koje je prouzrokovao čovek.



Slika 1
CO₂ se upumpava u duboke geološke slojeve poroznih i propusnih stena (videti peščar u donjoj ubaćenoj slici) iznad kojih se nalaze nepropusne stene (videti glinovitu stenu u gornjoj ubaćenoj slici) koje sprečavaju da CO₂ izade na površinu. Glavne mogućnosti skladištenja su:

1. Iscrpljena naftna/gasna polja, sa povećanjem kapaciteta ležišta ukoliko je to moguće;
2. slani akviferi, slojevi propusnih stena ispunjeni slanom vodom koja se ne može koristiti za plić;
3. duboki slojevi uglja na kojima se lokalno primenjuje povećanje eksploatacije metana.

Postoje tri glavna načina za skladištenje CO₂ (**Slika 1**):

1. Iscrpljena polja nafta i gasa - dobro poznata zahvaljujući istraživanju i eksploraciji ležišta ugljovodonika, nude neposrednu mogućnost skladištenja CO₂;
2. Slani akviferi - imaju veliki potencijal skladištenja, ali generalno nisu toliko dobro poznati;
3. Duboki slojevi uglja - opcija za budućnost, kad se reši problem upumpavanja velike zapremine CO₂ u ugalj niske propusnosti*.

Ležišta

Nakon upumpavanja pod zemlju u odgovarajuće rezervoar stene, CO₂ se akumulira u porama između zrna i u pukotinama, uklanjajući i pritom zamjenjujući bilo koji postojeći fluid (gas, vodu ili naftu). Odgovarajuće stene za geološko skladištenje CO₂ zato treba da imaju visoku poroznost* i propusnost. Takve geološke formacije, rezultat taloženja sedimenta u geološkoj prošlosti, obično se nalaze u takozvanim sedimentnim basenima. Mestimično se ove propusne formacije smenjuju sa nepropusnim stenama koje deluju kao povlatni izolator. U

sedimentnim basenima se često nalaze ležišta* ugljovodonika i prirodna ležišta CO₂ koja prirodno sadrže naftu, gas, čak i čisti CO₂, milionima godina, pa je očigledno da mogu zadržavati fluidne tokove dugih vremenskih razdoblja. U ilustracijama koje prikazuju mogućnosti skladištenja CO₂, Zemljina kora se često opisuje kao preterano pojednostavljena, homogena, slojevita struktura. U stvarnosti, ta slojevita struktura je razdeljena u nejednakoj meri lokalnim rasedima, pa je u pitanju složena heterogena struktura rezervoar stena i njihove povlakte. Nužno je detaljno poznavanje građe terena i iskustvo geologa, da bi se mogla oceniti pogodnost podzemnih struktura izabranih za dugoročno skladištenje CO₂. Potencijalna veštačka ležišta CO₂ moraju da ispunе mnoge kriterijume, od kojih su osnovni:

- dovoljna poroznost, propusnost i kapacitet uskladištenja;
- postojanje nepropusnih stena iznad ležišta - takozvanih povlatnih stena (npr. glina, glinovita stena, laporac, naslage soli) koje onemogućuju migraciju CO₂ ka površini;
- postojanje strukturnih zamki - drugim rečima, elemenata kao što su povlatne stene u obliku kupole koje

- mogu zadržati CO₂ unutar skladišne formacije;
- lokacije dublje od 800 m, gde su pritisak i temperatura dovoljno visoki, tako da je moguće uskladištiti CO₂ u komprimovanoj tekućoj fazi, čime se znatno povećava kapacitet;
 - odsustvo pitke vode: CO₂ se ne upumpava u slojeve sa podzemnom vodom koju bi čovek mogao konzumirati ili koristiti u druge svrhe.

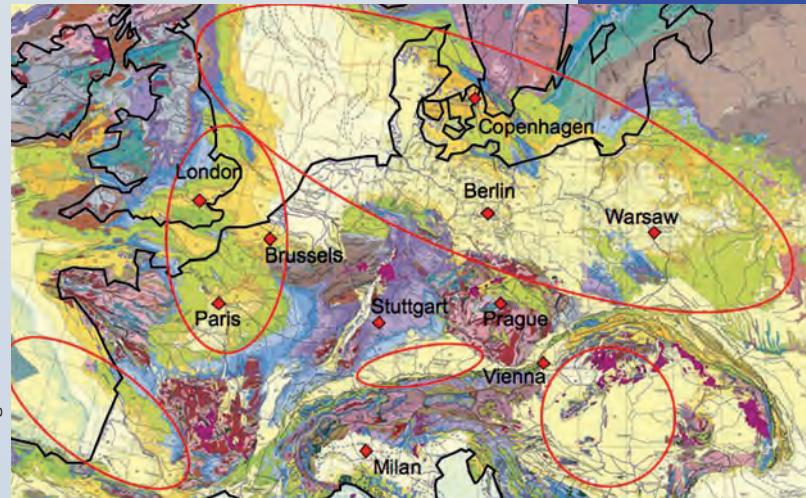
Lokacije skladišta u Evropi

Sedimentni baseni su česti u Evropi, na primer - u Severnom moru, ili na području koje okružuje alpske planinske vence (**Slika 2**). Mnoge formacije u evropskim basenima ispunjavanju kriterijume za geološko skladištenje i naučnici ih sada kartiraju i karakterišu. Druga područja u Evropi izgrađena su od stare konsolidovane kore, kao na primer, veliki deo Skandinavije, pa ne sadrže stene koje su pogodne za skladištenje CO₂. Primer područja u kome je moguće skladištiti CO₂ je južni permski basen, koji se proteže od Engleske do Poljske (na Slici 2 predstavljen je najvećom elipsom). Na sedimente su uticali procesi formiranja stena tokom kojih je porny prostor ispunjen slanom vodom, naftom ili prirodnim gasom. Slojevi gline, koji se nalaze između poroznih peščara, komprimovani su u slojeve niske propusnosti, koji sprečavaju uzdizanje fluida. Veliki deo peščara smešten je na dubini između jednog i četiri kilometra, gde je pritisak dovoljno visok za skladištenje CO₂ u gustoj, tečnoj fazi. Sadržaj soli u formacionoj vodi u tom dubinskom intervalu povećava se od oko 100 g/l do 400 g/l; drugim rečima, ta voda je većeg saliniteta od morske vode (35 g/l). Tektonski pokreti u basenu prouzrokovali su plastičnu deformaciju kamene soli, stvarajući stotine struktura u obliku kupola koje su predstavljale zamke za prirodnji gas. Upravo te zamke se proučavaju kao moguće lokacije za skladištenje i biraju se za pilot-projekte.

Kapacitet skladišta

Političarima, zakonodavcima i kompanijama koje će se time baviti potrebni su podaci o kapacitetu skladišta CO₂. Procena kapaciteta obično je vrlo aproksimativna i zasniva se na površini prostiranja potencijalno odgovarajuće formacije. Kapacitet može biti procenjen na osnovu različitih merila - od nivoa velikih država za grube procene, pa sve do nivoa pojedinog sedimentnog basena i ležišta za preciznije proračune koji uzimaju u obzir heterogenost i kompleksnost stvarne geološke građe terena.

Volumetrijski kapacitet: Objavljeni nacionalni kapaciteti skladišta uglavnom se zasnivaju na proračunima porne zapremine formacije. U teoriji, kapacitet skladišta zadate formacije može se izračunati množenjem površine sa debjinom, prosečnom poročnošću i prosečnom gustinom CO₂ u uslovima dubine



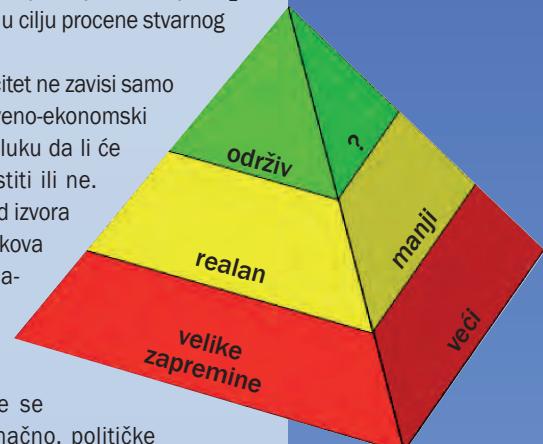
ležišta. Međutim, kako se u porenom prostoru već nalazi voda, samo se mali deo može koristiti za skladištenje - pretpostavlja se da iznosi otprilike 1-3%. Taj se koeficijent kapaciteta skladištenja primenjuje pri proceni volumetrijskog kapaciteta.

Stvarni kapacitet: Realniji kapacitet skladišta na pojedinoj lokaciji može se proceniti na osnovu detaljnih istraživanja. Debljina formacija nije konstantna i karakteristike ležišta mogu varirati na malim udaljenostima. Podaci o veličini, obliku i geološkim karakteristikama strukture omogućavaju nam da smanjimo nepreciznost u proračunu zapremine. Na osnovu tih informacija, može se koristiti kompjuterska simulacija, da bi se predvidelo upumpavanje i kretanje CO₂ unutar veštačkog ležišta, a u cilju procene stvarnog kapaciteta.

Efektivni kapacitet: Kapacitet ne zavisi samo od svojstava stena. Društveno-ekonomski faktori takođe utiču na odluku da li će se pogodna lokacija koristiti ili ne. Na primer, transport CO₂ od izvora do skladišta zavisi od troškova transporta. Kapacitet skladišta zavisi i od čistoće CO₂, jer prisustvo ostalih gasova umanjuje zapreminu ležišta u koje se CO₂ može upumpati. Konačno, političke odluke i javno mnjenje imaju završnu reč pri donošenju odluke o korišćenju raspoloživog kapaciteta skladišta.

Da zaključimo - poznato je da je kapacitet skladištenja CO₂ u Evropi veliki, iako postoje nejasnoće vezane za kompleksnost građe terena i društveno-ekonomske faktore. U projektu EU GESTCO* procenjeno je da kapacitet skladištenja CO₂ u naftnim i gasnim poljima na području Severnog mora iznosi 37 Gt, što bi omogućilo da velika postrojenja u toj regiji upumpavaju CO₂ u geološko skladište tokom nekoliko decenija. Ažuriranje podataka i dalje kartiranje kapaciteta geološkog skladištenja u Evropi izvedeno je, kako u pojedinim zemljama članicama, tako i na evropskom nivou, kroz projekat EU GeoCapacity*.

Slika 2
Geološka karta Evrope prikazuje lokacije glavnih sedimentnih basena (crvene elipse) u kojima se nalaze stene pogodne za skladištenje CO₂ (na osnovu Geološke karte Evrope u razmeri, 1 : 5 000 000).



Kako možemo transportovati i upumpavati velike količine CO₂?

Posle kaptiranja u industrijskom postrojenju, CO₂ se komprimuje i transportuje, pa se zatim upumpava u podzemno skladište kroz jednu/više bušotine. Ceo ovaj lanac mora biti optimizovan, da bi omogućilo uskladištenje nekoliko miliona tona CO₂ godišnje.

Kompresija

CO₂ se komprimuje u tečnost koja zauzima značajno manje mesta nego gas. Kada se CO₂ u elektrani ili industrijskom postrojenju odvoji od dimnog gasa, taj se visokokoncentrisani CO₂ dehidrira i komprimuje, da bi transport i uskladištenje bili što efikasniji (**Slika 1**). Dehidratacija je potrebna kako bi se izbegla korozija opreme i infrastrukture, kao formiranje hidrata zbog visokog pritiska (čvrsti kristali, nalik ledu, koji mogu začepiti opremu i cevi). Kompresija se sprovodi istovremeno sa dehidratacijom u procesu koji ima više etapa: ponavljani ciklusi kompresije, hlađenja i odvajanja vode. Pritisak, temperaturu i količinu vode treba prilagoditi načinu transporta i uslovima pritiska podzemnog skladišta. Ključni činioци za projektovanje instalacije kompresora su: brzina protoka gasa, ulazni i izlazni pritisak, toplotni kapacitet gasa i efikasnost kompresora. Tehnologija kompresije je dostupna i koristi se u многим industrijskim oblastima.

Slika 1
Faze geološkog
skladištenja CO₂. Da
bi se CO₂ dopremio
od tačke emitovanja
do bezbednog i
trajnog skladišta,
treba da prođe kroz
ceo niz operacija,
uključujući kaptiranje,
kompresiju, transport i
upumpavanje.

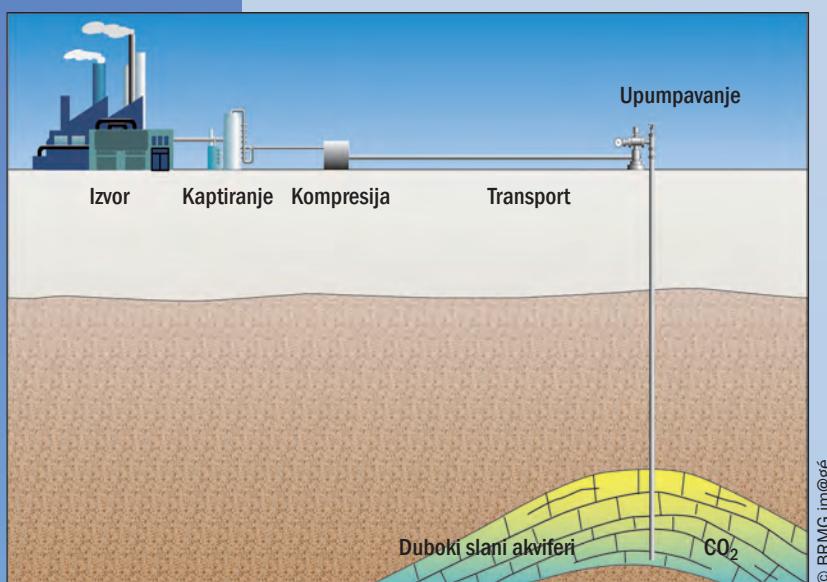
Transport

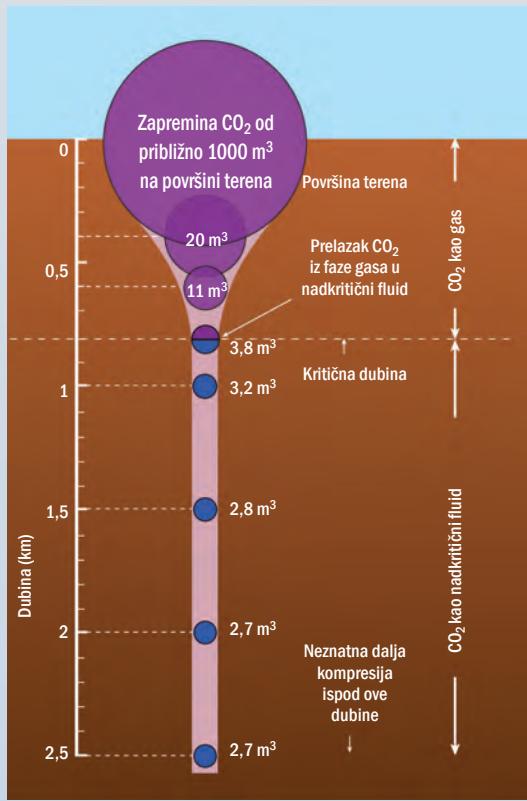
CO₂ se može transportovati brodom ili kroz cevovode. Trenutno se brodovima transportuju vrlo male količine CO₂ za industrijske potrebe (10 000-15 000 m³), ali to bi u budućnosti mogla postati atraktivna opcija za projekte

KSU u kojima je izvor CO₂ blizu obale, a kako je udaljen od mesta upumpavanja. Brodovi koji se koriste za transport tečnog naftnog gasa (TNG) pogodni su za transport CO₂. Naročito sistemi polu-hladnjaka koji su pod pritiskom i vrše hlađenje, zbog čega CO₂ može biti transportovan u tečnoj fazi. Najnoviji brodovi za transport TNG imaju zapreminu do 200 000 m³ i mogu transportovati 230 000 t CO₂. Međutim, transport brodom ne osigurava logistiku za neprekidan protok, pa su potrebna posredna skladišta u luci, kako bi se obavio pretovar CO₂. Naftne kompanije transportuju velike količine CO₂ koje koriste za povećanje proizvodnje nafte (približno 3 000 km cevovoda u svetu, većinom u Sjedinjenim Američkim Državama). Trošak je manji nego pri transportu brodom, a prednost je što se osigurava neprekidan protok od mesta kaptiranja do skladišta. Svi postojeći cevovodi su pod visokim pritiskom u nadkritičnim uslovima za CO₂, u kojima se on ponaša poput gasa, ali ima gustinu tečnosti. Tri važna faktora određuju količinu CO₂ koju cevovod može transportovati: njegov prečnik, promene pritiska duž cevovoda, a sa tim u vezi i debljina zidova.

Upumpavanje

Posle transportovanja do podzemnog skladišta, CO₂ se pod pritiskom upumpava u veštačko ležište (**Slika 2**). Pritisak upumpavanja mora biti dovoljno viši od pritiska u rezervoar stenama, kako bi se ležišni fluid potisnuo od tačke upumpavanja. Broj injekcionih bušotina zavisi od količine CO₂ koja se skladišti, od zapremine CO₂ koji se upumpava u jednom satu, od propusnosti i debljine rezervoar stene, od maksimalnog pritiska upumpavanja i od tipa bušotine. Pošto je glavni cilj dugotrajno geološko uskladištenje CO₂, formacija mora biti hidraulički postojana. Velika brzina upumpavanja može izazvati rast pritiska u tački upumpavanja, naročito u slabopropusnim formacijama. Pritisak upumpavanja ne bi trebalo da bude viši od pritiska loma stene, jer bi to moglo da ošteti ležište ili izolator iznad ležišta. Za određivanje maksimalnog pritiska upumpavanja koji neće prouzrokovati pukotine u formaciji koriste se geomehaničke analize i modeli.





Slika 2
Kada se upumpa pod zemlju, CO_2 postaje gust, nadkritičan* fluid na dubini od oko 0,8 km. Njegova zapremina se dramatično smanjuje od 1000 m^3 na površini, do $2,7 \text{ m}^3$ na dubini od 2 km. To je jedan od faktora zbog kojih je geološko skladištenje velikih količina CO_2 toliko privlačno.

Hemijski procesi mogu delovati na brzinu upumpavanja. Zavisno od vrste rezervoar stene, sastava fluida i uslova u dubini (kao što su temperatura, pritisak, zapremina, koncentracija, itd.), može doći do rastvaranja i taloženja minerala u blizini bušotine. Ovi procesi mogu znatno uticati na povećanje ili smanjenje brzine upumpavanja. Kada se CO_2 upumpa, jedan deo se rastvara u slanoj vodi ležišta, a pH* se neznatno smanjuje pod uticajem rastvaranja karbonatnih minerala rezervoar stene. Karbonati su minerali koji prvi stupaju u reakciju, jer rastvaranje počinje čim započne upumpavanje. Taj proces može lokalno povećati poroznost stene i injektivnost*. Međutim, nakon rastvaranja, karbonatni minerali se mogu ponovo kristalizirati i cementirati formaciju oko bušotine. Velike brzine upumpavanja mogu se koristiti za ograničavanje smanjenja propusnosti u blizini bušotine, odnosno od nje udaljiti područje geochemijske ravnoteže u kojem se odvija kristalizacija.

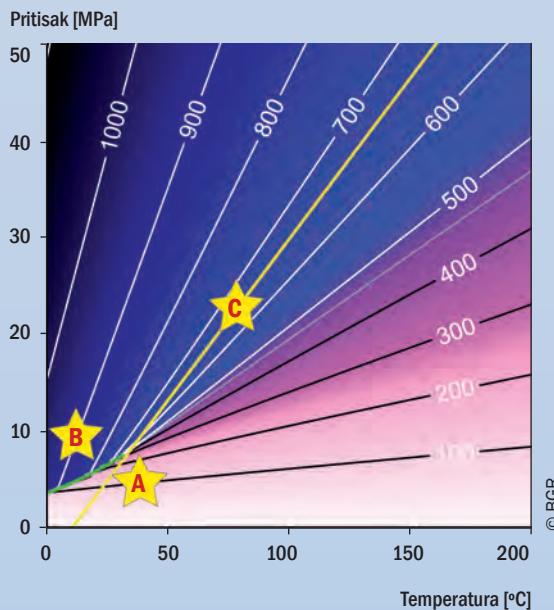
Isušivanje je još jedna pojava koju uzrokuje upumpavanje. Posle faze acidifikacije, voda koja je preostala oko injekcione bušotine isparava u upumpanom suvom gasu, pa dolazi do povećanja koncentracije minerala u slanoj vodi*. Minerali (kao što su soli) talože se kad je rastvor dovoljno koncentrisan, smanjujući tako pro-

pusnost u području oko bušotine. Ova pitanja vezana za injektivnost zavise od složenih međusobno povezanih procesa koji se odvijaju lokalno oko injekcione bušotine, ali su jako zavisni od vremena i udaljenosti od injekcione bušotine. Za procenu takvih efekata koriste se numeričke simulacije. U praksi, to znači da brzinu upumpavanja treba pažljivo definisati, kako bi se kontrolisali procesi koji mogu ograničiti upumpavanje željene količine CO_2 .

Sastav CO_2

Sastav i čistoća CO_2 , koji je rezultat procesa kaptiranja, imaju značajan uticaj na sve naredne aspekte projekta skladištenja CO_2 . Postojanje određenog procenta drugih materija, kao što su voda, vodonik-sulfid (H_2S), sumporni i azotni oksidi (SO_x, NO_x), azot (N_2) i kiseonik (O_2), delovaće na fizička i hemijska svojstva CO_2 i u vezi s tim na odvijanje pojedinih procesa i njihov efekat. Zato postojanje tih materija treba uzeti u obzir pri projektovanju faza kompresije, transporta i upumpavanja, kao i pri usklađivanju radnih uslova, tj. postupaka i opreme.

Konačno, transport i upumpavanje velikih količina CO_2 već su izvodljivi. Međutim, ako se želi široka primena geološkog skladištenja CO_2 , sve faze koje ono uključuje treba da budu osmišljene, naročito za svaki projekat skladištenja. Ključni parametri su: termodinamičke karakteristike CO_2 (Slika 3), brzina protoka i uslovi u postrojenju za upumpavanje i ležištu.



Slika 3
Gustina čistog CO_2 (kg/m^3) kao funkcija temperature i pritiska. Žuta linija odgovara tipičnom gradijentu pritiska i temperature u sedimentnom basenu. Na dubinama većim od 800 m (~8 MPa), uslovi u ležištu omogućuju visoku gustinu (osjenčeno plavo). Zelena kriva predstavlja graničnu fazu između gasovitog i tečnog CO_2 . Tipični uslovi pritiska i temperature za kaptiranje, transport i skladištenje redom su označeni slovima A, B i C.

Šta se dešava sa CO₂ kad se nađe u podzemnom skladištu?

Kada se upumpa u rezervoar stene CO₂ se uzdiže prema površini ispunjavajući porni prostor ispod neposredne povlate. Tokom vremena, deo CO₂ će se rastvoriti i na kraju pretvoriti u minerale. Ovi procesi se odvijaju u raznim vremenskim razdobljima i doprinose trajnom akumulirajućem zamkama.

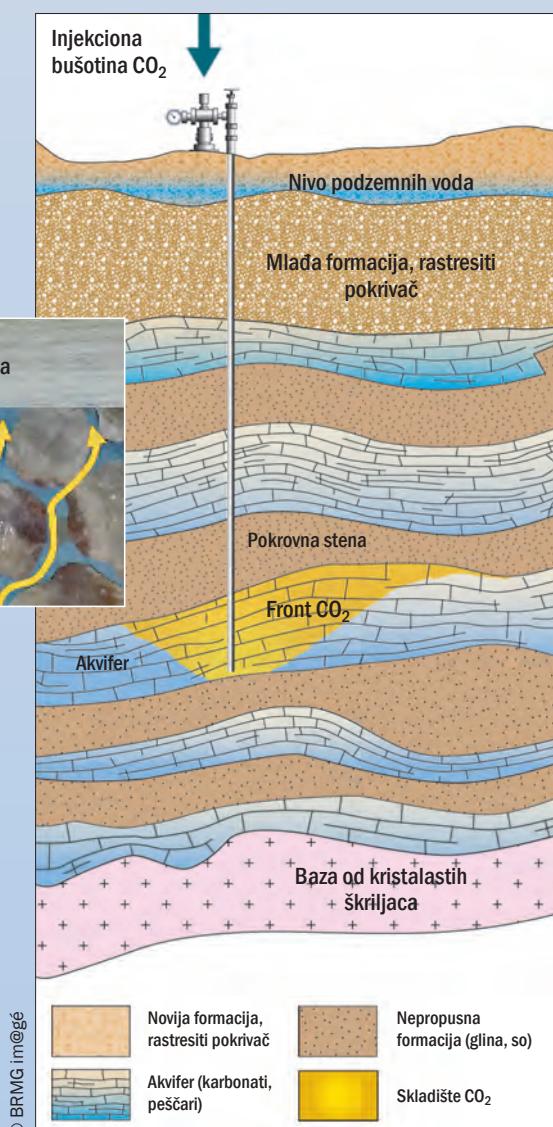
Mehanizmi akumuliranja u zamkama

Kada se upumpa u rezervoar stenu, CO₂ ispunjava njen porni prostor koji je u većini slučajeva već ispunjen slojnom vodom, tj. slanom vodom. Kada se CO₂ upumpa, započinju da deluju sledeći mehanizmi. Prvi smatramo najvažnijim, jer sprečava uzdizanje CO₂ na površinu. Ostala tri sa vremenom povećavaju efikasnost i sigurnost skladišta.

Mikroskopski snimak.



Slika 1
Upumpani CO₂, koji je lakši od vode, uzdiže se, a zaustavlja ga pokrovna stena.



© BRGM im@gé

1. Akumulacija ispod povlata (Strukturno akumuliranje u zamkama)

Pošto je gusti CO₂ »lakši« od vode, počinje se uzdizati. To kretanje se prekida kada CO₂ stigne do sloja stene koji je nepropustan, tzv. povlata. Obično sastavljena od gline ili soli, ta povlata* deluje kao izolator, sprečavajući dalje uzdizanje CO₂ koji se akumulira neposredno ispod stene, u povoljnim uslovima - zamkama. **Slika 1** ilustruje uzdizanje CO₂ kroz porni prostor stene (plavo) do povlata.

2. Imobilizacija u malim porama (Rezidualno akumuliranje u zamkama)

Akumuliranje u zamkama se pojavljuje kada je porni prostor u rezervoar steni tako uzan da se CO₂ ne može dalje kretati na gore, uprkos razlici u gustini u odnosu na okolnu vodu. Ovaj proces uglavnom se odvija tokom migracije CO₂ i obično može imobilisati nekoliko procenata upumpanog CO₂, zavisno od svojstava rezervoar stene.

3. Rastvaranje (Akumuliranje u zamkama rastvaranjem)

U slanoj vodi, koja ispunjava porni prostor ležišta, rastvara se mali deo upumpanog CO₂. Posledica rastvaranja je spuštanje prema dnu ležišta vode u kojoj je rastvoren CO₂, a koja je teža od vode bez CO₂. Brzina rastvaranja zavisi od kontakta između CO₂ i slane vode. Količina CO₂ koja se može rastvoriti ograničena je maksimalnom koncentracijom. Međutim, zbog uzdizanja upumpanog CO₂ i spuštanja vode sa rastvorenim CO₂, stalno se obnavlja kontakt između slane vode i CO₂, povećavajući na taj način količinu koja se može rastvoriti. Ovi procesi su relativno spori, jer se odvijaju unutar uskih pornih prostora. Grube procene na projektu Sleipner pokazuju da se oko 15% CO₂ rastvori 10 godina posle upumpavanja.

4. Mineralizacija (Mineralno akumuliranje u zamkama)

Ugljen dioksid, posebno u kombinaciji sa slanom slojnom vodom, može reagovati sa mineralima od kojih se sastoji rezervoar stena. Određeni minerali se mogu rastvoriti, dok se drugi talože, zavisno od pH i mineralnog sastava (**Slika 2**). Procene u Sleipneru pokazuju da će samo mali deo biti imobilisan mineralizacijom posle vrlo dugog vremenskog razdoblja. Posle 10 000



Slika 2

Gusti CO₂ migrira ka površini (svetloplavi mehurići), rastvara se i reaguje sa zrnima stene, dovodeći do taloženja karbonatnih minerala na granicama zrna (belo).

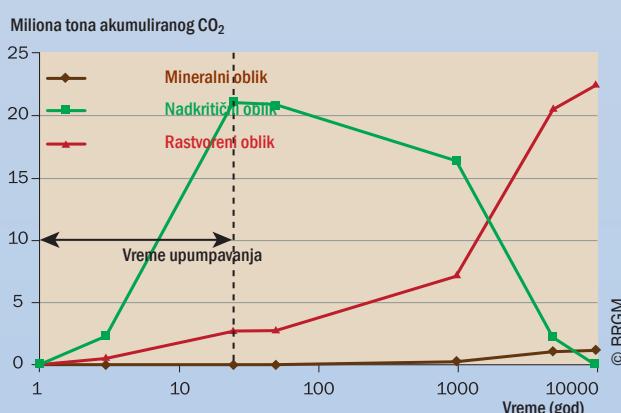
godina, samo bi se 5% upumpanog CO₂ trebalo mineralizovati, dok će 95% biti rastvoren i neće preostati CO₂ u fizički odvojenoj gustoj fazi.

Uticaj različitih mehanizama akumuliranja u zamkama zavisi od lokacije, tj. od karakteristika svake pojedine lokacije. Na primer, u ležištima u obliku kupole, CO₂ bi trebalo da ostane uglavnom u gustoj fazi tokom dugog vremenskog razdoblja, dok će u horizontalnim ležištima, kao što je Sleipner, većina upumpanog CO₂ biti rastvoren ili mineralizovana. Kretanje dela CO₂ vezanog raznim mehanizmima akumuliranja u zamkama u projektu Sleipner prikazano je na **Slici 3**.

Kako sve to znamo?

Sve što znamo o tim procesima proizlazi iz četiri glavna izvora informacija:

- **Laboratorijska merenja:** mikroskopski eksperi-



Slika 3
Promene stanja CO₂ u ležištu Sleipner prema simulacijama toka. CO₂ je akumuliran u zamci u nadkritičnom obliku mehanizmima 1 i 2, u rastvorenom obliku mehanizmom 3, a u mineralnom obliku mehanizmom 4.

menti mineralizacije, podzemne cirkulacije i rastvaranja mogu se sprovesti na uzorcima stena, dajući uvid u kratkotrajne procese u malom obimu.

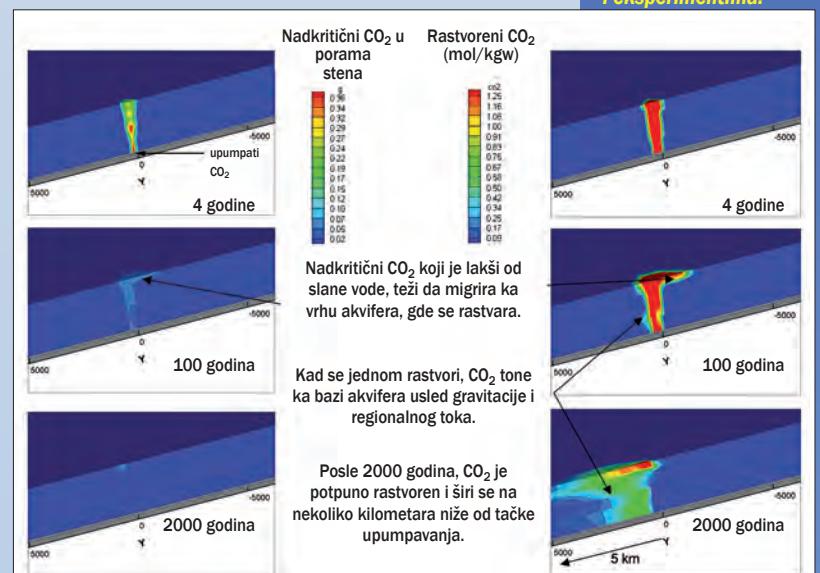
- **Numeričke simulacije:** razvijeni su modeli koji se mogu koristiti za predviđanje ponašanja CO₂ tokom mnogo dužih vremenskih razdoblja (**Slika 4**). Laboratorijski eksperimenti koriste se da bi se kalibrirale numeričke simulacije.

- **Studije o prirodnim ležištima**, gde je CO₂ (uglavnom vulkanskog porekla) akumuliran u zamkama u dubini tokom dugog vremenskog razdoblja, često milionima godina. Takva ležišta nazivamo prirodnim analozima*, jer se na tim mestima sprovode istraživanja o ponašanju gasa i dugoročnim posledicama zadržavanja CO₂ u dubini.

- **Práćenje postojećih demonstracionih projekata geološkog skladištenja CO₂, kao što su:** Sleipner (norveško podmorje), Weyburn (Kanada), In Salah (Alžir) i K12-B (holandsko podmorje). Rezultati simulacija u kratkom vremenskom periodu upoređuju se sa stvarnim terenskim podacima i pomažu pri usklađivanju modela.

Samo stalnim upoređivanjem i proveravanjem ova četiri izvora informacija, može se steći pouzdano znanje o svim procesima koji se događaju otprilike 1000 m ispod naših nogu.

Slika 4
Trodimenzionalno modeliranje migracije CO₂ u akvifera posle upumpavanja
150 000 tona u toku četiri godine (dogerski akviferi u Francuskoj).
Prikazan je nadkritični CO₂ (levo) i CO₂ rastvoren u slanoj vodi (desno) posle četiri godine, 100 godina i 2000 godina od početka upumpavanja.
Simulacija se zasniva na terenskim podacima i eksperimentima.



© BRGM im/gé

Konačno, znamo da se sigurnost skladišta CO₂ povećava sa vremenom. Kritično pitanje je pronaći ležište sa pogodnom povlatom koja može da zadrži CO₂ (struktorno akumuliranje). Svi procesi koji su vezani uz akumuliranje u zamkama rastvaranjem, kao i mineralizacijom i rezidualnim akumuliranjem u zamkama, dodatno sprečavaju migraciju CO₂ prema površini.

Da li CO₂ može da ističe iz podzemnog skladišta i koje su posledice ako može?

Na osnovu proučavanja prirodnih sistema, ne očekuje se da pažljivo odabrane lokacije mogu značajno propustiti CO₂. Prirodna ležišta gasa pomažu nam da shvatimo uslove pod kojima se gas u dubini akumulira u zamkama ili gubi. Uz to, te prirodne lokacije iz kojih migrira CO₂ pomažu nam da shvatimo koji se efekti tog procesa mogu očekivati.

Putanje migracije

Uopšteno uvezši, mogući putevi propuštanja su ili tehnički (na primer, duboke bušotine), ili prirodni (na primer, sistemi pukotina i rasedi).

I aktivne i napuštene bušotine mogu predstavljati puteve migracije jer, kao prvo, stvaraju direktnu vezu između površine i ležišta, a kao drugo, izgrađene su od materijala koji može korodirati tokom vremena (**Slika 1**). Dodatna komplikacija je što sve bušotine nisu napravljene istom tehnikom, zato su novije bušotine uglavnom sigurnije od starih. U svakom slučaju, smatra se da je rizik gubitaka kroz buštinu nizak, jer se i nove i stare bušotine mogu efikasno pratiti korišćenjem preciznih geochemijskih i geofizičkih metoda, i zato što u naftnoj industriji već postoji tehnologija remedijacije koja bi se mogla primeniti.

Migracija CO₂ duž prirodnih raseda i pukotina koje postoje u povlati ili njenoj krovini* složenja je, jer se radi o nepravilnim, planarnim obeležjima sa prostorno promenljivom propusnošću. Naučno i tehničko razumevanje prirodnih sistema koji propuštaju i onih koji ne propuštaju omogućava nam

da projektujemo objekte geološkog skladištenja koji imaju iste karakteristike kao i prirodna ležišta koja akumuliraju CO₂ i metan u zamkama hiljadama i milionima godina.

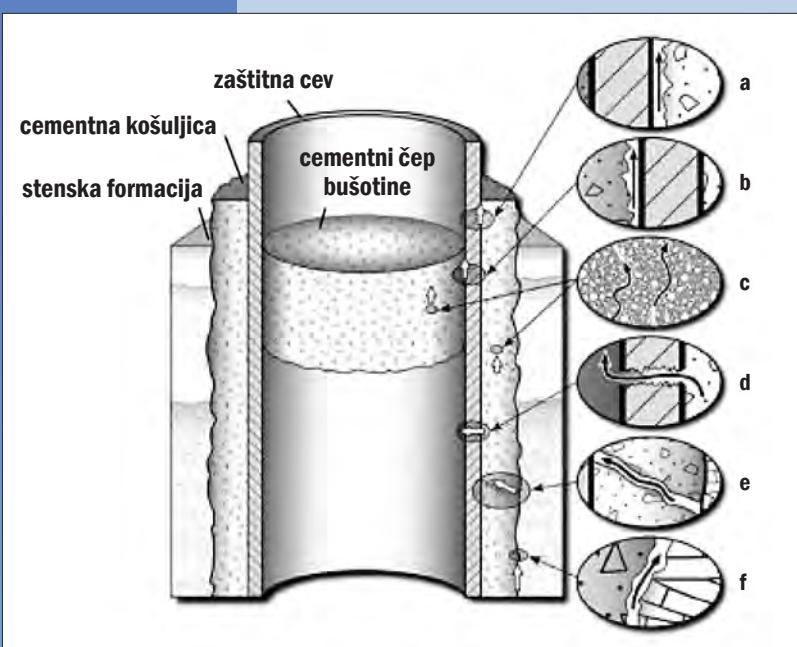
Šta smo naučili iz prirodnih analoga?

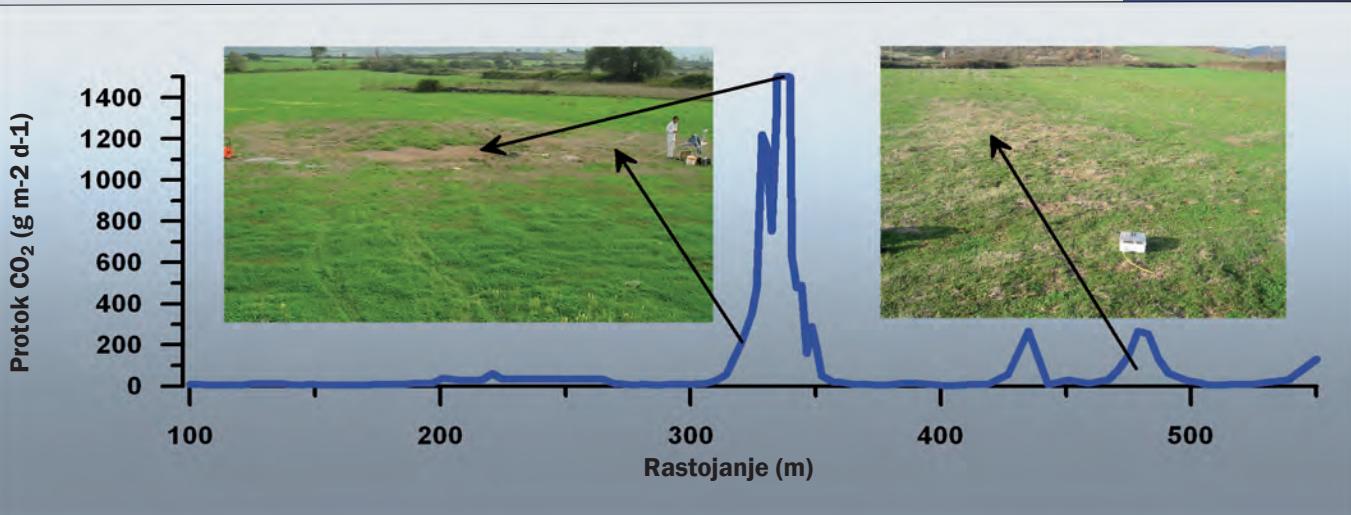
Prirodni sistemi (tzv. prirodni analozi) neprocenjivi su izvori informacija za bolje razumevanje dubokih migracija gasa i prirodne razmene gasova između Zemlje i atmosfere. Najvažnija otkrića koja proizilaze iz istraživanja brojnih ležišta prirodnog gasa (od kojih neka propuštaju, a neka ne) su:

- U povoljnim geološkim uslovima u dubini, prirodni gas može biti akumuliran u zamkama stotinama hiljada ili milionima godina.
- Izolovana ležišta gasa postoje čak i u najne-povoljnijim geološkim okruženjima (vulkanska područja).
- Migracija bilo kakve značajne količine gase uslovljena je advekcijom (tj. protokom iz područja višeg u područje nižeg pritiska), jer je difuzija vrlo spor proces.
- Kako bi došlo do advekcije, pritisak pod kojim se fluid nalazi u ležištu treba da bude sličan litostatičkom pritisku*, da bi rasedi i pukotine ostali otvoreni, ili da bi se mehanički kreirali novi putevi migracije.
- Područja koja propuštaju prirodno proizveden gas na površinu smeštena su gotovo isključivo u vulkanskim i seizmički aktivnim regijama sa prirodnim izvorima gasa duž aktivnih ili nedavno aktiviranih raseda.
- Retko dolazi do značajnog gubljenja gasa, obično samo u vulkanskom i geotermalnom području sa mnogo raseda, gde se CO₂ neprestano generiše prirodnim procesima.
- Povećane koncentracije gasa na površini obično su prisutne u lokalizovanim tačkama i imaju ograničen prostorni uticaj na životnu sredinu.

Iz navedenog proizilazi da je potrebna kombinacija određenog broja posebnih uslova kako bi došlo do gubitaka. Malo je verovatno da bi dobro

Slika 1
Moguće putanje
kretanja CO₂ u
bušotini. Migracija kroz
izmenjeni materijal (c,
d, e) ili duž granica dve
sredine (a, b, f).





izabrano i pažljivo projektovano skladište CO₂ propušтало. Iako је могућност propuštanja mala, morамо у потпуности razумeti sve procese i moguće efekte vezane za skladištenje CO₂ kako bi se izabralо, пројектовало i vodilo најsigurnije moguće складиšte.

Uticaj na čoveka

Neprekidno udišemo CO₂. On je opasan za ljudsko zdravlje samo u vrlo visokim koncentracijama. Vrednosti do 50000 ppm (5%) izazivaju glavobolju, vrtoglavicu i mučninu. Vrednosti iznad tog nivoa, ako je izloženost preduga, mogu izazvati smrt, pogotovo gušenjem, ukoliko koncentracija kiseonika u vazduhu padне ispod 16%, što je potreban nivo da bi se čovek održao u životu. Međutim, u slučaju ispuštanja CO₂ na otvorenom ili ravnom području, on se brzo raspršuje u vazduhu, čak i uz slab vjetar. Mogući rizik za čoveka predstavljaju zatvoreni prostori ili topografske depresije, где se koncentracije migriranih gasova mogu povećati, jer je CO₂ gušći od vazduha i obično se akumulira blizu tla. Poznavanje karakteristika područjâ u kojima dolazi do prirodne migracije gasa iz dubine korisno je za prevenciju i upravljanje rizikom. Zapravo, mnogo ljudi živi u područjima koje karakteriše svakodnevna migracija gasa iz zemlje. Na primer, u Ciampinu blizu Rima, u Italiji, kuće su smeštene samo 30 metara od izvora gasa, где koncentracija CO₂ u zemljištu iznosi 90%, a oko sedam tona CO₂ se dnevno gubi u atmosferu. Lokalno stanovništvo izbegava bilo kakvu opasnost, sprovodeći jednostavne mere opreza, kao što su da se ne spava u podrumu i da se kuće dobro provetrvaju.

Uticaj na životnu sredinu

Potencijalni uticaj na ekosisteme varira u zavisnosti od toga da li je geološko складиšte na kopnu ili pod morem. U morskim ekosistemima, главни

uticaj migriranja CO₂ je lokalno snižavanje pH i za to vezane posledice, prvenstveno na životinje koje žive na morskom dnu i ne mogu da se premeste. Međutim, posledice su prostorno ograničene i ekosistem pokazuje znake oporavka čim se propuštanje smanji. U kopnenim ekosistemima, uticaj može generalno biti sledeći:

- **Vegetacija** – Iako, zapravo, koncentracija do oko 20-30% CO₂ u gasovima u zemljištu može koristiti oplođenju biljaka i povećati brzinu rasta za određene vrste, vrednosti iznad tog praga za neke biljke mogu biti smrtonosne. Te posledice su lokalizovane samo oko otvora kroz koje gas migrira, pa već nekoliko metara dalje vegetacija ostaje čvrsta i zdrava (**Slika 2**).
- **Kvalitet podzemne vode** – Hemijski sastav podzemne vode može biti promenjen dodavanjem CO₂, jer voda postaje kiselija i dolazi do otpuštanja elemenata iz akvifera. Čak i kada bi CO₂ uspeo da prodre u akvifer pitke vode, posledice bi bile lokalizovane, a naučnici trenutno istražuju kvantifikaciju efekta. Zanimljivo je da su mnogi akviferi širom Evrope obogaćeni prirodnim CO₂, a ta voda se flašira i prodaje kao »gazirana mineralna voda«.
- **Integritet stena** – Acidifikacija podzemne vode može izazvati rastvaranje stena, smanjivanje njihovih mehaničkih svojstava i formiranje šupljina (ponora) u terenu. Međutim, taj uticaj se javlja samo u vrlo specifičnim geološkim i hidrogeološkim uslovima (tektonski aktivni karstni akviferi sa velikom brzinom toka podzemne vode, bogati karbonatima), ispod kojih ne bi trebalo graditi podzemna складиšta ugljika.

Konačno, uticaji bilo kakvog hipotetičkog pražnjenja CO₂ zavisiće od određene lokacije, a detaljno poznavanje geološkog sastava i građe omogućiće nam da odredimo sve potencijalne puteve migracije, odaberemo lokacije sa najnižom mogućnošću migracije CO₂, predvidimo ponašanje gase i tako ocenimo i sprečimo bilo kakav bitan uticaj na ljude i ekosistem.

Slika 2
Uticaj propuštanja CO₂ na vegetaciju kod jakog (levo) i smanjenog (desno) isticanja. Uticaj je ograničen na područje gde CO₂ izlazi na površinu.

Kako možemo da vršimo monitoring skladišta u dubini i na površini terena?

Treba vršiti monitoring svih skladišta CO₂ iz operativnih, sigurnosnih, društvenih i ekonomskih razloga, kao i onih vezanih za zaštitu životne sredine. Treba izraditi strategiju, da bi se odredilo šta će se tačno osmatrati i kako.

Zašto nam je potreban monitoring?

Nadziranje skladišta ključno je za osiguravanje postizanja glavnog cilja geološkog skladištenja CO₂, odnosno za dugoročnu izolaciju antropogenog CO₂ od atmosfere. Razlozi za osmatranje skladišta su brojni, a uključuju:

- **Operativne:** da bi se kontrolisao i optimizovao proces upumpavanja.
- **Sigurnosne i vezane za zaštitu životne sredine:** da bi se minimizirao ili sprečio uticaj na čoveka, život u divljini i ekosisteme u blizini skladišta, i kako bi se osiguralo ublažavanje globalnih klimatskih promena.
- **Društvene:** da bi se javnosti osigurale informacije vezane za sigurnost skladišta, kao i da bi se zadobilo njeno poverenje.
- **Finansijske:** da bi se osiguralo poverenje tržišta u tehnologiju KSU i potvrdilo da se usklađene količine CO₂ na taj način smatraju izbegnutim emisijama u budućim fazama EU Sheme Trgovine Emisijama (STE).

Utvrđivanje inicijalnog stanja životne sredine (tzv. početno stanje) i sledećih faza propisano je Direktivom Evropske komisije o KSU, objavljenom 23. januara 2009. godine. Kompanije koje će se baviti skladištenjem treba da pokažu da skladište deluje u skladu sa propisima i da će dugoročno nastaviti tako da radi. Monitoring je značajna komponenta koja će smanjiti nejasnoće u delovanju skladišta, i zato treba da bude usko vezan za delatnosti upravljanja sigurnošću.

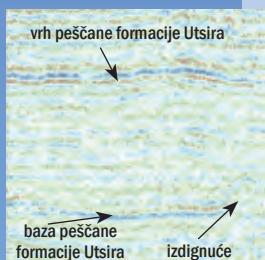
Koji su ciljevi monitoringa?

Osmatranje može biti usmereno na razne ciljeve i procese u različitim delovima skladišta, kao što su:

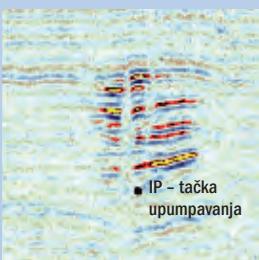
- Definisanje fronta CO₂ i praćenje dok migrira od tačke upumpavanja. Osigurava ključne podatke za kalibriranje modela koji predviđaju buduću distribuciju CO₂ u skladištu. Postoje mnoge razrađene metode, posebno ponavljana seizmička istraživanja koja se uspešno primenjuju u nekoliko demonstracionih i pilot-projekata (**Slika 1**).
- Integritet povlate ležišta - potrebno da bi se procenilo da li je CO₂ izolovan unutar ležišta i da bi se omogućilo rano upozoravanje u slučaju neočekivane migracije CO₂ prema površini. To može biti posebno važno tokom faze upumpavanja, kada su pritisci u ležištu značajno, ali privremeno, povećani.
- Integritet bušotine. To je važno pitanje, jer duroke bušotine mogu omogućiti direktni put za migraciju CO₂ prema površini. Injekcione bušotine, kao i osmatračke bušotine ili već postojeće napuštene bušotine, moraju se pažljivo pratiti tokom faze upumpavanja i posle toga, da bi se sprečilo iznenadno pražnjenje CO₂. Praćenjem se potvrđuje da su sve bušotine, kada više nisu potrebne, efikasno izolovane. Postojeći geofizički i geohemski sistemi praćenja, koji su standardna praksa u naftnoj i gasnoj industriji, mogu biti instalirani u buštinama ili iznad njih, da bi omogućili rano upozoravanje i osigurali sigurnost.
- Migracija gasa kroz krovinu. U skladištima gde plići litološke jedinice imaju svojstva slična svojstvima povlate, krovina može biti ključna komponenta u smanjenju rizika gubljenja CO₂ u more ili atmosferu. Ako praćenje u ležištu ili oko povlate ukazuje na neočekivanu migraciju kroz nju, monitoring krovine postaje obavezan. Mnoge metode korištene za prikaz fronta CO₂ ili praćenje povlatnog horizonta mogu se koristiti i u slučaju krovine.
- Površinski gubici, atmosferska detekcija i merenje. Za sprečavanje migriranja upumpanog CO₂ na površinu koristi se niz geochemijskih i

Slika 1
Seizmičko praćenje
fronta CO₂* na test-
lokaciji Sleipner pre
(započetog 1996.
godine) i posle
upumpavanja (tri,
odnosno pet godina
kasnije).

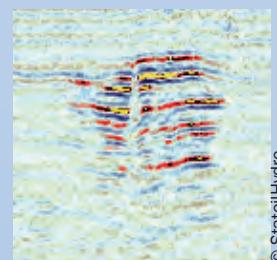
Pre upumpavanja (1994)



2,35 Mt CO₂ (1999)



4,36 Mt CO₂ (2001)



© StatoilHydro

biohemijskih metoda, a daljinska istraživanja koriste se da bi se locirala mesta migracije na površini, kao i da bi se procenila i pratila distribucija CO₂ u zemljisu i njegovo širenje u atmosferi ili u morskoj sredini (**Slika 2**).

- Merenje količina uskladištenog CO₂ u zakonodavne i fiskalne svrhe. Iako se količina upumpanog CO₂ može jednostavno izmeriti na ortu bušotine, kvantifikacija u ležištu tehnički je vrlo zahtevna. Ako dođe do migracije blizu površine, dospele količine moraju da budu kvantifikovane i zabeležene unutar nacionalnih inventara štetnih gasova i budućih (STE) shema.
- Pomeranje tla i mikroseizmičnost*. Povećani pritisak u ležištu koji nastaje zbog upumpavanja CO₂ može u specifičnim slučajevima povećati potencijal mikroseizmičnosti i malih pomeranja tla. Dostupne su metode praćenja mikroseizmičnosti i daljinske metode (iz aviona ili satelita), kojima se može izmeriti i najmanja deformacija površine tla.

Kako se sprovodi monitoring?

Već se primjenjuje širok raspon metoda praćenja u demonstracionim i istraživačkim projektima. Postoje metode kojima se direktno prati CO₂ i one kojima se posredno osmatra njegov uticaj na stene, fluide i životnu sredinu. Direktna merenja uključuju analize fluida iz dubokih bušotina ili merenja koncentracije gasa u zemljisu ili atmosferi. Indirektne metode uključuju geofizička istraživanja i praćenje promene pritiska u bušotinama ili promene pH u podzemnim vodama.

Potrebno je pratiti funkcionalisanje skladišta i pod morem i pod zemljom. Izbor prikladnih metoda zavisiće od tehničkih i geoloških karakteristika skladišta i ciljeva monitoringa. Dostupan je širok raspon metoda (**Slika 3**), od kojih su mnoge dobro razrađene u naftnoj i gasnoj industriji, pa

se sada prilagođavaju monitoringu CO₂. Već se istražuje optimizacija postojećih metoda i razvoj inovativnih postupaka, radi povećanja pouzdanosti, smanjivanja troškova, automatizacije postupaka i demonstracione efikasnosti.

Strategija monitoringa

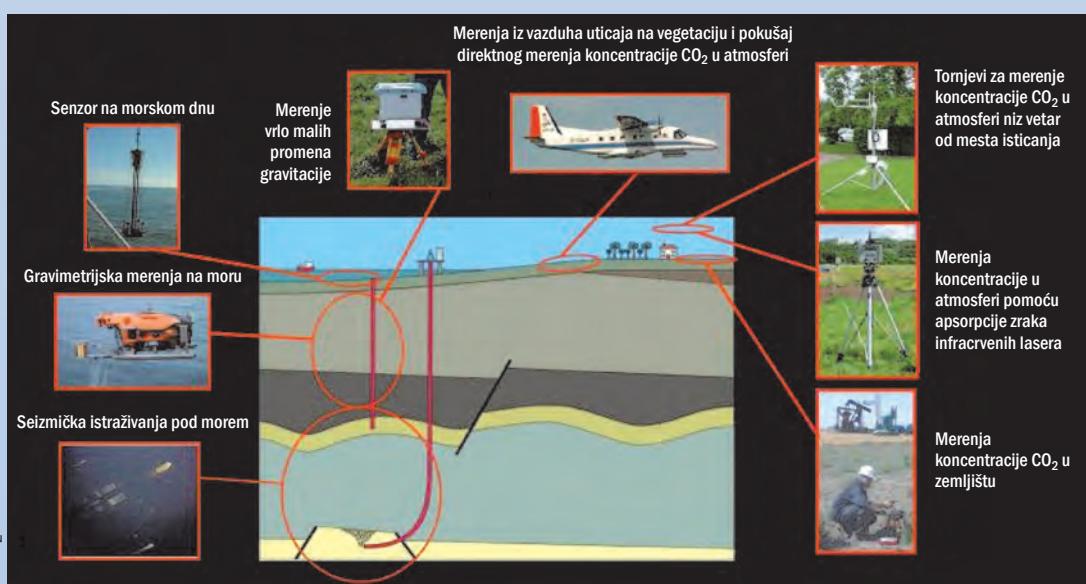
Kad se planira strategija osmatranja, odluke koje se moraju doneti zavise od geoloških i inženjerskih uslova specifičnih za svako pojedino skladište, a to su: oblik i dubina ležišta, očekivano širenje fronta CO₂, potencijalni putevi migracije, geološki sastav krovine, vreme upumpavanja, brzina toka i površinske karakteristike kao što su topografija, gustina naseljenosti, infrastruktura i ekosistemi. Kada se doneše odluka o najprikladnijim postupcima merenja i lokacijama, moraju se sprovesti detaljna istraživanja pre nego što započne upumpavanje, kako bi poslužila kao referenca za sva buduća merenja. Takođe, svaki program osmatranja mora biti fleksibilan, kako bi se razvijao zajedno sa projektom skladištenja. Strategija osmatranja, koja može integrisati sva ova pitanja, dok u isto vreme smanjuje troškove, predstavljaće ključnu komponentu u analizi rizika i verifikaciji sigurnosti i efikasnosti skladišta.

Konačno, znamo da je moguće pratiti funkcionalisanje podzemnog skladišta CO₂ mnogim metodama koje su prisutne na tržištu ili se tek razvijaju. Istraživanje je trenutno u toku, ne samo za razvoj nove opreme (naročito za korišćenje na morskom dnu), nego i za optimiziranje praćenja i smanjivanja troškova.



© CO₂GeoNet

Slika 2
Bava za praćenje sa solarnim pločama za snabdevanje energijom, plovci i sprava koja sakuplja uzorke gasa sa morskog dna.



Slika 3
Prikaz dostupnih metoda za praćenje različitih komponenti sistema skladištenja CO₂.

Koji se sigurnosni kriterijumi moraju primeniti i poštovati?

Da bi se osigurala sigurnost i efikasnost, zakonodavne vlasti moraju nametnuti uslove za planiranje i sprovođenje projekta koje moraju poštovati kompanije koje se bave skladištenjem.

Iako je geološko skladištenje CO₂ sada prihvaćeno u svetu kao jedna od verodostojnih mogućnosti za ublažavanje klimatskih promena, preostaje još da se utvrde kriterijumi sigurnosti koji se odnose na ljudsko zdravlje i lokalnu sredinu, pre nego što se započne razvoj na industrijskom nivou. Ti kriterijumi su zahtevi koje zakonodavne vlasti postavljaju kompanijama, kako bi se osiguralo da su uticaji na lokalnu sredinu (uključujući podzemne resurse), sigurnost i zdravlje kratkoročno, srednjoročno i dugoročno zanemarivi.

Ključna pretpostavka je da geološko skladištenje treba da bude trajno, i zato se ne očekuje da skladišta budu sa gubicima. Međutim, scenario »šta ako« znači da rizik mora biti procenjen i da se od kompanija mora zahtevati da poštuju mere koje sprečavaju bilo kakvo gubljenje ili anomalije u funkcionisanju skladišta. Prema IPCC, upumpani CO₂ treba da ostane pod zemljom najmanje 1000 godina, što bi omogućilo da se atmosferske koncentracije CO₂ stabilizuju ili padnu prirodnom razmenom sa okeanskom vodom, minimizirajući time rast temperature na Zemlji zbog globalnog zagrevanja. Međutim, lokalni uticaji treba da budu procenjeni za periode od nekoliko dana do više hiljada godina. Glavni koraci tokom trajanja projekta skladištenja CO₂ (**Slika 1**).

Sigurnost se osigurava na sledeće načine:

- pažljivim izborom i karakterizacijom lokacije;
- procenom sigurnosti;
- ispravnim vođenjem;
- odgovarajućim planom monitoringa;
- adekvatnim planom remedijacije.

Uz to, vezani ključni ciljevi su:

- osigurati da CO₂ ostane u ležištu;
- sačuvati integritet bušotine;
- sačuvati fizičke karakteristike ležišta (uključujući poroznost, propusnost i injektivnost) i ne-propusnost povlate;
- uzeti u obzir sastav CO₂, posebujući posebnu pažnju primesama koje nisu uklonjene tokom kaptiranja. To je važno

zbog izbegavanja bilo kakve nepovoljne interakcije sa bušotinom, ležištem, pokrovnom stenom i u slučaju propuštanja, sa podzemnom vodom iznad ležišta.

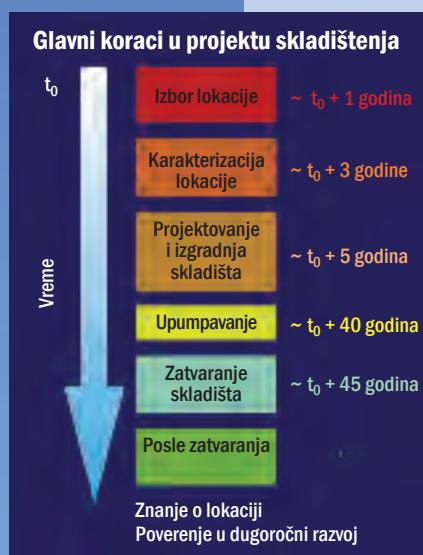
Kriterijumi sigurnosti pri planiranju projekta

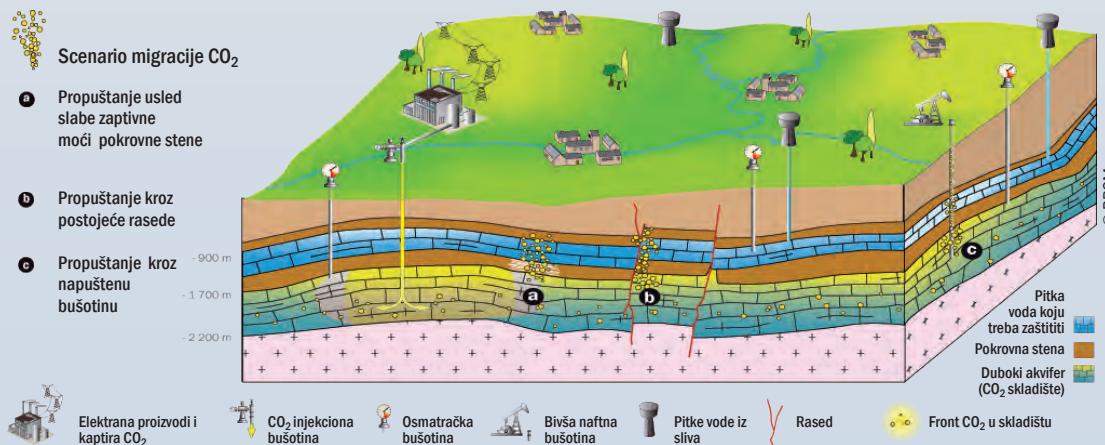
Pre početka upumpavanja, mora se demonstrirati sigurnost projekta. S obzirom na izbor lokacije, glavne komponente koje treba ispitati uključuju:

- rezervoar stenu i povlatu;
- ostale formacije u krovini, posebno nepropusne slojeve koji mogu delovati kao sekundarni izolator;
- postojanje propusnih raseda ili bušotina koje predstavljaju moguće puteve migracije prema površini;
- akvitifne pitke vode;
- populaciju i ograničenja životne sredine na površini.

Metode istraživanja ležišta nafte i gasa koriste se kako bi se procenili geološki sastav i građa, kao i oblik podzemnog skladišta. Tok fluida, hemijsko i geomehaničko modeliranje CO₂ unutar ležišta omogućavaju predviđanje ponašanja CO₂, dugoročni rezultat skladištenja i definisanje parametara za efikasno upumpavanje. Kao rezultat, detaljna karakterizacija lokacije omogućila bi definisanje scenario »normalnog« ponašanja skladišta, koji odgovara lokaciji prikladnoj za uskladištenje, a gde smo sigurni da će CO₂ ostati u ležištu. Procena rizika tada treba da uzme u obzir manje verovatne scenarije za buduće stanje skladišta, uključujući i neočekivane događaje. Posebno je važno predvideti puteve migracije, izloženost i posledice (**Slika 2**). Svaki scenario migracije treba da analiziraju stručnjaci i gde je moguće, primene numeričko modeliranje, da bi se procenila verovatnoća događaja i ozbiljnost situacije. Na primer, širenje fronta CO₂ treba pažljivo kartirati, kako bi se otkrila bilo kakva veza sa zonom raseda. U proceni rizika, pažljivo treba oceniti varijacije u ulaznim parametrima i neizvesnosti. Potencijalne posledice delovanja CO₂ na ljudi i životnu sredinu procenjuju se kroz studije uticaja na životnu sredinu, što je uobičajena praksa u bilo kom procesu licenciranja industrijskog postrojenja. Zato će se

Slika 1
Koraci u projektu
skladištenja.





Slika 2
Primer potencijalnog scenarija propuštanja.

istražiti i normalni scenario i scenario u slučaju ispuštanja, kako bi se procenio potencijalni rizik vezan za postrojenje. Program praćenja, od kratkoročnog do dugoročnog, treba uspostaviti u skladu sa analizom procene rizika, a program bi trebalo da kontroliše kritične parametre definisane u raznim scenarijima. Njegovi glavni ciljevi su: prikazati migraciju fronta CO₂, proveriti integritet bušotine i povlate, otkriti bilo kakve gubitke CO₂, oceniti kvalitet podzemne vode i osigurati da CO₂ ne dospe na površinu. Plan mera remedijacije i ublažavanja mogućih posledica poslednja je komponenta procene sigurnosti, sa ciljem detaljnog popisa korektivnih radnji koje treba preduzeti u slučaju gubitaka ili anomalija u funkcionisanju skladišta. Obuhvata popuštanje integrateta povlate i bušotine tokom i posle upumpavanja, pa uzima u obzir ekstremna rešenja za remedijaciju, kao što je pražnjenje skladišta. Postojeće znanje obuhvata standardne postupke u naftnoj i gasnoj industriji, kao što su održavanje bušotina, smanjenje pritiska pri upumpavanju, delimično ili potpuno povlačenje gasa, crpljenje vode radi smanjenja pritiska, crpljenje gasa iz plitkih slojeva, itd.

Sigurnosni kriterijumi tokom punjenja skladišta i posle zatvaranja

Glavno pitanje sigurnosti odnosi se na operativnu fazu: kad se upumpavanje završi, lokacija postaje sigurnija zbog pada pritiska.

Uverenje da je moguće upumpati i uskladištiti CO₂ na siguran način zasniva se na iskustvu industrijskih kompanija. CO₂ je prilično uobičajen proizvod koji se koristi u raznim granama industrije, tako da postupak sa tim spojem ne otvara nova pitanja. Projektovanje i kontrola operacija zasnivaju se uglavnom na iskustvu naftne i gasne industrije, posebno na sezonskom skladištenju prirodnog gasa ili metodama povećanja kapaciteta ležišta (EOR* - Enhanced Oil Recovery). Glavni parametri koje treba kontrolisati su:

- pritisak upumpavanja i protok - pritisak treba da zadrži vrednosti niže od pritiska pri kojem

nastaju pukotine, tj. pritiska iznad koga dolazi do pucanja u povlati;

- upumpana zapremina, kako bi se realizovala predviđanja definisana modeliranjem;
- sastav upumpanog CO₂;
- integritet injekcionih bušotina i bušotina smeštenih unutar ili u blizini širenja fronta CO₂;
- širenje fronta CO₂ i otkrivanje propuštanja;
- stabilnost tla.

Tokom upumpavanja, stvarno ponašanje CO₂ treba neprekidno upoređivati sa predviđenim ponašanjem. Na taj način doznajemo više o određenoj lokaciji. Ako se otkrije anomalija u ponašanju, program praćenja treba ažurirati i preduzeti korektivne radnje ukoliko je to potrebno. Ako se sumnja da skladište propušta, odgovarajuća oprema za praćenje se usmerava na specifično područje skladišta, od ležišta do površine. Tako se na vreme otkriva migracija CO₂ i mogući štetan uticaj na akvifere pitke vode, životnu sredinu, i na kraju - na ljudе. Kada je upumpavanje završeno, započinje faza zatvaranja. Bušotine treba pravilno zatvoriti i napustiti, ažurirati program modeliranja i praćenja i ako je potrebno, preduzeti mere kako bi se smanjio rizik. Kada se utvrdi da je nivo rizika dovoljno nizak, odgovornost za skladište prelazi na nacionalne vlasti i plan praćenja može biti obustavljen ili minimaliziran.

Predložena Evropska direktiva predstavlja zakonski okvir kojim se utvrđuje da je kaptiranje i skladištenje CO₂ moguća opcija, i da li može biti sprovedena sigurno i odgovorno.

Konačno, kriterijumi sigurnosti ključni su za uspešan industrijski razvoj geološkog skladištenja CO₂. Treba da budu prilagođeni svakoj pojedinoj lokaciji skladištenja. Ti kriterijumi su posebno važni zbog javnog mnjenja i ključni su u postupku licenciranja za koje zakonodavna tela moraju uspostaviti detalje koji se odnose na zahteve sigurnosti.



Rečnik

Akvifer: propusno stensko telo koje sadrži vodu. Akviferi koji su najbliže površini sadrže pitku vodu, koju ljudi koriste. Oni na većoj dubini ispunjeni su slanom vodom, koju ljudi ne mogu koristiti, i njih nazivamo slanim akviferima.

Bušotina: kružno udubljenje izrađeno bušenjem, nekoliko kilometara duboko i malog prečnika, kao što je naftna bušotina.

CSLF: Forum za vođenje sekvestracije ugljenika. Međunarodna klimatska inicijativa usmerena na razvoj poboljšanih, jeftinijih tehnologija za separaciju i kaptiranje ugljen dioksida i njegovo transportovanje i dugotrajno sigurno uskladištenje.

EU GeoCapacity: evropski istraživački projekat u okviru koga je napravljena procena ukupnog kapaciteta geološkog skladištenja koji postoji u Evropi za emisije CO₂ koje je uzrokovao čovek.

EU GESTCO: evropski istraživački projekat u kome je napravljena procena mogućnosti geološkog skladištenja CO₂ u osam zemalja (Norveška, Danska, Velika Britanija, Belgija, Holandija, Nemačka, Francuska i Grčka).

Front CO₂: prostorna distribucija nadkritičnog CO₂ unutar stena u dubini.

IEAGHG: Međunarodna agencija za energiju - istraživačko-razvojni program za gasove staklene bašte. Cilj ove međunarodne saradnje je da se ocene tehnologije za smanjenje emisije štetnih gasova, objavljaju rezultati tih studija, identifikuju ciljevi istraživanja, razvoja i demonstracije, kao i promoviše istraživački rad.

Injektivnost: označava lakoću kojom se fluid (kao CO₂) može upumpati u geološku formaciju. Definiše se kao brzina upumpavanja (protok), podeljena sa razlikom pritiska između tačke upumpavanja u bazi bušotine i formacije.

IPCC: Međuvladin panel o klimatskim promenama. Organizaciju su 1988. osnovali Svetska meteorološka organizacija (WMO) i Program Ujedinjenih nacija za zaštitu životne sredine (UNEP), kako bi procenili naučne, tehničke i društveno-ekonomske informacije relevantne za razumevanje klimatskih promena, njihov mogući uticaj i opcije za ublažavanje klimatskih promena. IPCC i Al Gore dobitnici su Nobelove nagrade za mir 2007. godine.

Dodatačna literatura:

Specijalni izveštaj o KSU Međuvladinog panela o klimatskim promenama (IPCC):
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Web-stranica Evropske komisije o KSU na kojoj se nalaze informacije o pravnom okviru i implementaciji Direktive o geološkom skladištenju ugljen dioksida:
http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs_en.htm

Web-stranica IEAGHG - oprema za monitoring:
http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html

Krovina: geološki slojevi koji se nalaze između povlate jednog ležišta i površine tla (ili morskog dna).

KSU (CCS): kaptiranje i skladištenje ugljenika.

Ležište: geološka formacija vezanih ili nevezanih stena koje su dovoljno porozne i propusne da se u njih može upumpati i uskladištitи CO₂. Najčešće su to slojevi peščara ili krečnjaka.

Litostatički pritisak: pritisak kojim na stenu pod zemljom deluje težina stena koje se nalaze iznad nje. Litostatički pritisak se povećava sa dubinom.

Mikroseizmičnost: lagano podrhtavanje ili vibracija u Zemljinoj kori koju ne uzrokuje zemljotres, nego drugi prirodni ili veštacički uzroci.

Nadkritično: stanje fluida pri pritisku i temperaturi iznad kritičnih vrednosti (31,03 °C i 7,38 MPa za CO₂). Svojstva takvih fluida su kontinuirano promenljiva, od pretežno gasovitih pri niskom pritisku, do pretežno tečnih pri visokom pritisku.

pH: mera kiselosti rastvora, gde pH 7 označava neutralni rastvor.

Poroznost: procena ukupne zapremine stene koju ne čine mineralna zrna. Te šupljine se nazivaju porama i mogu biti ispunjene raznim fluidima. U dubokim stenama taj fluid je obično slana voda, ali može biti i nafta, prirodni gas (metan) ili prirodno stvoreni CO₂.

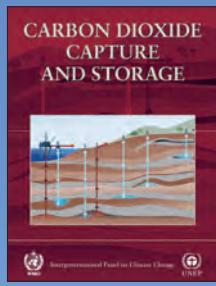
Povećanje kapaciteta ležišta (EOR): Dopunske (terciarne) metode povećanja proizvodnje nafte. Postupci kojima se povećava proizvodnja nafte ubrizgavanjem fluida (poput vodene pare ili CO₂) koji pomažu pokretanju nafte u ležištu.

Povlata: nepropusni sloj stena koji predstavlja prepreku kretanju tečnosti i gasova, i koji formira zamku kada se nalazi iznad ležišnih stena.

Prirodni analog: ležište CO₂ nastalo prirodnim putem. Postoje ležišta koja propuštaju i koja ne propuštaju, i njihovo proučavanje može poboljšati naše razumevanje dugoročnog skladištenja CO₂ u dubokim geološkim formacijama.

Propusnost: sposobnost porozne stene da propušta fluide; to je mera relativne lakoće protoka fluida pod gradijentom pritiska.

Slana voda (brine): vrlo mineralizovana voda, tj. ona koja sadrži visoku koncentraciju rastvorenih soli.





Šta je CO₂GeoNet?

CO₂GeoNet je evropsko udruženje naučnika kojim se možete obratiti za jasne i detaljne informacije o geološkom skladištenju CO₂, inovativnoj i životno važnoj tehnologiji za ublažavanje klimatskih promena. CO₂GeoNet osnovala je Evropska komisija kao Mrežu izvrsnosti u Šestom okvirnom programu (ugovor sa EK u trajanju od 2004. do 2009. godine). Okuplja 13 institucija iz sedam evropskih zemalja, a sve imaju istaknut međunarodni ugled i predstavljaju kritičnu masu u istraživanju geološkog skladištenja CO₂. Godine 2008., CO₂GeoNet je registrovan kao neprofitabilno udruženje prema francuskom zakonu, da bi mogao da nastavi svoje aktivnosti i po prestanku finansiranja od strane Evropske komisije. CO₂GeoNet ima bogato iskustvo u projektima koji se bave istraživanjima ležišnih i povlatnih stena, potencijalnih puteva migracije CO₂ prema površini, opreme za praćenje, mogućeg uticaja na ljudе i ekosisteme, kao i istraživanjem javnog mnjenja. CO₂GeoNet pruža raznovrsne usluge iz četiri glavna područja: 1) zajedničko istraživanje; 2) obuka i izgradnja kapaciteta; 3) naučno savetovanje; 4) informisanje i komunikacija. Značaj CO₂GeoNeta je porastao, i on je postao trajan naučni autoritet u Evropi, koji može osigurati potrebnu naučnu potporu za širok i siguran razvoj geološkog skladištenja CO₂. Trenutno se radi na proširenju udruženja na panevropskom nivou kroz projekat CGS Europe, koordinisanu akciju koja se finansira preko Sedmog okvirnog programa Evropske komisije (2010-2013). CGS Europe okuplja jezgro udruženja CO₂GeoNet i još 21 istraživačku instituciju, pokrivajući na taj način 28 zemalja (24 zemlje članice i četiri pridružene članice). Kao rezultat toga, nekoliko stotina naučnika se bavi multidisciplinarnim pristupom svim aspektima geološkog skladištenja CO₂. Naš cilj je da se zainteresovanim stranama i javnosti osiguraju nezavisne naučne informacije o geološkom skladištenju CO₂.



CO₂GeoNet: Evropska mreža izvrsnosti za geološko skladištenje CO₂

BGR (Nemačka); **BGS** (Velika Britanija); **BRGM** (Francuska); **GEUS** (Danska); **HWU** (Velika Britanija); **IFPEN** (Francuska); **IMPERIAL** (Velika Britanija); **NIVA** (Norveška); **OGS** (Italija); **IRIS** (Norveška); **SPR Sintef** (Norveška); **TNO** (Hollandija); **URS** (Italija).



www.co2geonet.eu

CGS Europe: Panevropska koordinisana akcija za geološko skladištenje CO₂

CO₂GeoNet (13 članova navedenih gore); **ČGS** (Češka); **GBA** (Austrija); **GEOECOMAR** (Rumunija); **GEO-INZ** (Slovenija); **G-IGME** (Grčka); **GSI** (Irska); **GTC** (Litvanija); **GTK** (Finska); **LEGMC** (Latvija); **ELGI** (Mađarska); **LNEG** (Portugal); **METU-PAL** (Turska); **PGI-NRI** (Poljska); **RBINS-GSB** (Belgija); **SGU** (Švedska); **SGUDS** (Slovačka); **S-IGME** (Španija); **SU** (Bugarska); **TTUGI** (Estonija); **UB** (Srbija); **UNIZG-RGNF** (Hrvatska).



www.cgseurope.net

CO₂GeoNet priznat je na evropskoj i međunarodnoj sceni

Forum za vođenje sekvestracije ugljenika - CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) priznalo je CO₂GeoNet.



CO₂GeoNet usko sarađuje sa istraživačko-razvojnim programom gasova staklene baštе Međunarodne agencije za energiju (IEA GHG).



O ovoj brošuri

Kako bi se podigla svest javnosti o geološkom skladištenju CO₂, CO₂GeoNet pozabavio se glavnim pitanjem »Šta zaista znači geološko skladištenje CO₂?«. Grupa istaknutih naučnika iz CO₂GeoNeta pripremila je najnovije odgovore na šest osnovnih pitanja koja se temelje na svetskim istraživanjima i iskustvu. Cilj je bio da se širokoj publici predstave jasne i nepristrasne naučne informacije i pokrene dijalog o osnovnim pitanjima koja se odnose na tehničke aspekte geološkog skladištenja CO₂. Taj posao, sažet u ovoj brošuri, predstavljen je tokom Radionice za obuku i dijalog, koja je održana u Parizu, 3. oktobra 2007. godine..

Brošura »Šta, zaista, znači geološko skladištenje CO₂?« prevedena je na mnoge jezike, a može se preuzeti na www.co2geonet.com/brochure.

CO₂GeoNet

Evropska mreža izvrsnosti za geološko skladištenje CO₂



www.co2geonet.eu

Sekretarijat: 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.

Srpsku verziju izdala je Asocijacija geofizičara i ekologa Srbije (AGES) u okviru projekta »CGS Europe: Panevropska koordinisana akcija za geološko skladištenje CO₂« (Sedmi okvirni program za istraživanje i razvoj EU).



ISBN 978-86-913953-4-6

