

Što zapravo znači geološko skladištenje CO₂?

Odgovorna uporaba
fosilnih goriva

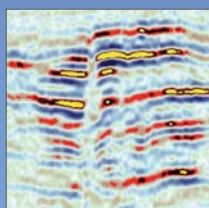
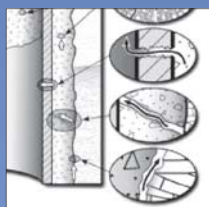
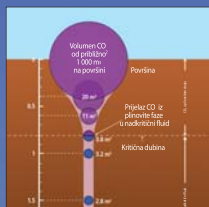
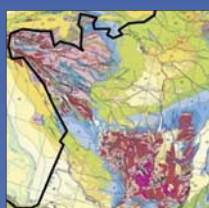
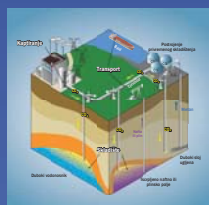
Uklanjanje glavnog izvora
stakleničkih plinova

Vraćanje ugljika u tlo

Vrijeme koje nam je potrebno
da bismo razvili izvore energije
koji ne uništavaju okoliš



Europska mreža izvrsnosti CO₂GeoNet



Klimatske promjene i potreba za geološkim skladištenjem CO₂	4
1. Gdje i koliko CO₂ možemo uskladištiti u podzemlju?	6
2. Kako možemo transportirati i utiskivati velike količine CO₂?	8
3. Što se događa s CO₂ nakon uskladištenja u podzemlju?	10
4. Može li doći do propuštanja CO₂ iz podzemnog skladišta i, ako može, kakve bi mogle biti posljedice?	12
5. Kako možemo pratiti funkcioniranje podzemnog skladišta u podzemlju i na površini?	14
6. Koje kriterije sigurnosti treba zadati i poštovati?	16
Pojmovnik	18
Što je CO₂GeoNet?	19

Za izdavanje ove brošure zaslužni su:

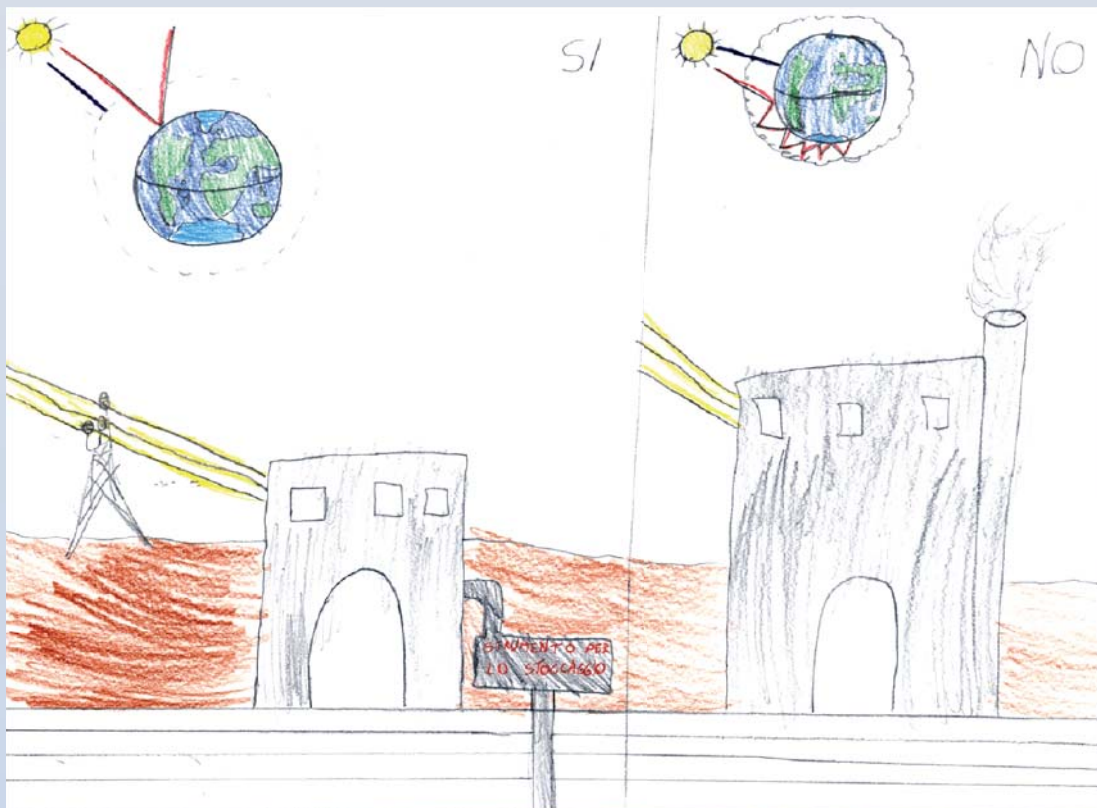
Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

Hrvatsku verziju prevela je Željka Kurelec, lektorirala Alisa Kichl, uredio Bruno Saftić.

Vizija budućnosti



**Nema više zadimljenih dimnjaka.
Cjevovodom se transportira CO₂ i utiskuje u podzemlje.
To je dobro za Zemlju.**



Massimo, 10 godina, Rim - Italija

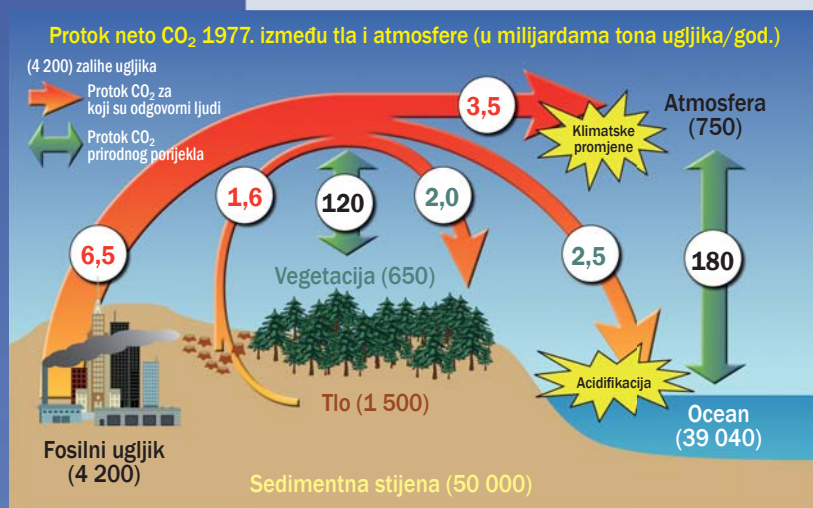
**Za našu djecu
geološko skladištenje CO₂ ima smisla.**

Klimatske promjene i potreba za geološkim skladištenjem CO₂

Slika 1
Globalna emisija CO₂ za koju su odgovorni ljudi iznosi do 30 milijardi tona (Gt) godišnje, što odgovara 8,1 Gt ugljika: 6,5 Gt od izgaranja fosilnih goriva i 1,6 Gt od sječe šuma i poljoprivredne djelatnosti.

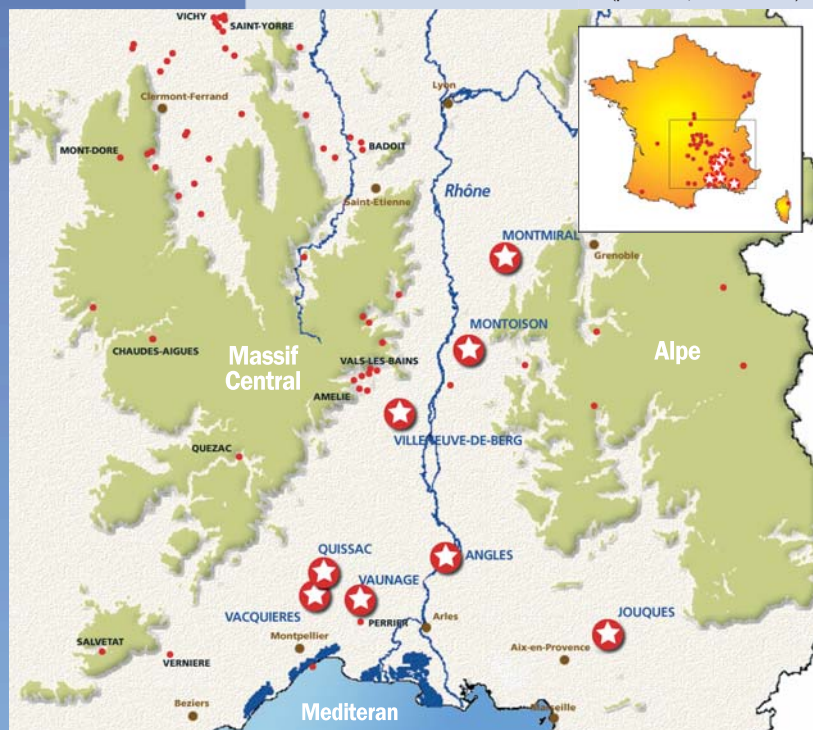
Ljudi otpuštaju previše CO₂ u atmosferu

Danas je prihvaćena činjenica da ljudske aktivnosti ometaju ciklus kruženja ugljika na našem planetu. Prije industrijske revolucije, kao i u još davnijoj prošlosti – prije otprilike 10 000 godina, ovo precizno uravnoteženo kruženje, koje uključuje prirodnu izmjenu ugljika između geosfere, biosfere, oceana i atmosfere, kao rezultat je



© BRGM/im@gé

Slika 2
Francuska, područja s podzemnim ležištima CO₂.



© BRGM/im@gé

imalo nisku koncentraciju CO₂ u atmosferi (oko 280 ppm, odnosno 0,028%). Međutim, u proteklih 250 godina izgaranje sve većih količina fosilnih goriva (ugljen, nafta, plin) za proizvodnju energije, grijanje, industriju i transport neprekidno povećava količinu CO₂ koja se ispušta u atmosferu (**Slika 1**). Otprilike polovicu ovog viška CO₂, za koji su odgovorni ljudi, ponovo apsorbira vegetacija ili se razgrađuje u oceanima, što uzrokuje acidifikaciju i povezuje se s potencijalno negativnim učincima na morske biljke i životinje. Ostatak se akumulira u atmosferi, i tako pridonosi klimatskim promjenama jer je CO₂ staklenički plin koji zadržava dio Sunčeve topline uzrokujući zagrijavanje Zemljine površine. Potreban je izravan radikalni zahvat kako bi se spriječilo da sadašnja atmosferska koncentracija CO₂ od 387 ppm (rast od 38% u usporedbi s predindustrijskom razinom) naraste iznad kritične razine od 450 ppm u nadolazećim desetljećima. Svjetski se stručnjaci slažu da iznad te razine možda više neće biti moguće spriječiti najdrastičnije posljedice.

Vraćanje ugljika u podzemlje

Naš svijet umnogome ovisi o fosilnim gorivima još od početka industrijskog doba 1750-ih godina, tako da ne iznenađuje što će pretvorba našeg društva u društvo koje će se temeljiti na izvorima energije koji ne štete klimi zahtijevati i vrijeme i novac. Ono što nam treba jest prijelazno rješenje koje će nam pomoći smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima, a prvi bi korak trebao biti korištenje ovih sirovina tako da ne zagađujemo okoliš. Na taj ćemo način osigurati vrijeme koje nam je potrebno za razvoj tehnologije i infrastrukture za obnovljive izvore energije. Jedna je od takvih opcija i kreiranje zatvorenoga kruga u sustavu proizvodnje energije s pomoću kojeg bi se ugljik koji je izvorno izvađen iz podzemlja u obliku plina, nafte i ugljena ponovo tamo vratio u obliku CO₂. Zanimljivo je da podzemno skladištenje CO₂ nije ljudski izum, nego u potpunosti prirodna, raširena pojava koja se očituje u ležištima CO₂ koja postoje tisućama i milijunima godina. Jedan je takav primjer niz od osam prirodnih ležišta CO₂ u jugoistočnoj Francuskoj koja su otkrivena tijekom naftnih istraživanja 1960-ih godina (**Slika 2**). Slična otkrića diljem svijeta dokazuju da geološke formacije mogu skladištiti CO₂ učinkovito i sigurno tijekom izuzetno dugih vremenskih razdoblja.

Kaptiranje i skladištenje CO₂: obećavajući put ublažavanja klimatskih promjena

Unutar spektra mjera koje hitno treba primijeniti kako bi se ublažile klimatske promjene i acidifikacija oceana, kaptiranje i skladištenje ugljika (KSU*) mogu odigrati

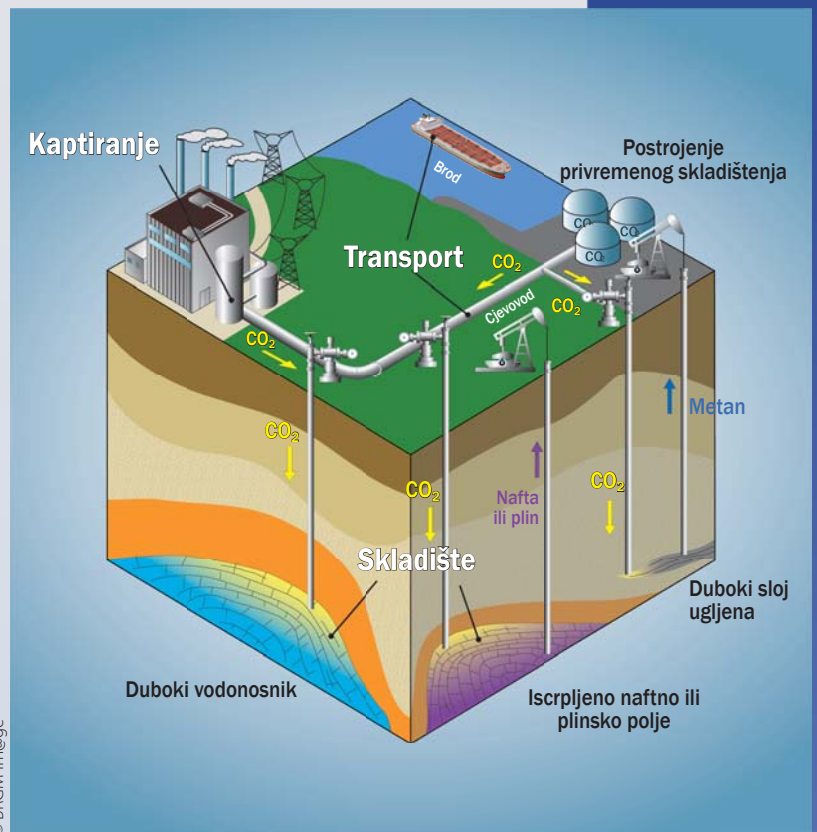
odlučujuću ulogu jer bi mogli pridonijeti smanjenju ispuštanja CO₂ od 33%, a koje je potrebno provesti do 2050. godine. KSU uključuje kaptiranje CO₂ u elektranama koje za pogonsko gorivo koriste ugljen ili plin i u industrijskim postrojenjima (čeličane, cementare, rafinerije itd.), zatim transport cjevovodom ili brodom do podzemnog skladišta, i na kraju utiskivanje kroz bušotinu* u odgovarajuću geološku formaciju pogodnu za dugoročno skladištenje (Slika 3). S obzirom na rastuću svjetsku populaciju i povećanu potrebu za energijom u zemljama u razvoju, kao i na nedostatak alternativnih »čistih« energetske izvora, kratkoročno nije moguće izbjeći kontinuiranu uporabu fosilnih goriva. Međutim, uz KSU čovječanstvo bi moglo napredovati tako da ne šteti okolišu, dok bi istovremeno gradilo most prema svjetskoj ekonomiji koja se temelji na održivoj proizvodnji energije.

Nagli razvoj tehnologije KSU-a u svijetu

Veliki istraživački programi KSU-a provode se u Europi, Sjedinjenim Američkim Državama, Kanadi, Australiji i Japanu od 1990-ih godina. Mnogo je znanja stečeno na prvim opsežnim demonstracijskim projektima u kojima je CO₂ utiskivano duboko u podzemlje tijekom 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 Alžiru (oko 1 Mt godišnje od 2004.). Međunarodna suradnja u istraživanju skladištenja CO₂ na tim i na drugim lokacijama, a koju potiču IEAGHG* i CSLF*, izuzetno je važna radi stjecanja novih znanja i stvaranja svjetske znanstvene zajednice koja se bavi tom problematikom. Odličan je primjer Poseban izvještaj o kaptiranju i skladištenju ugljika (2005.) IPCC-a*, koji opisuje trenutno stanje znanja i prepreke koje treba nadvladati kako bi se omogućila široka primjena ove tehnologije. Velika tehnička stručnost već postoji, i svijet sada samouvjereno prelazi u fazu demonstracije. Uz tehnički razvoj definira se nacrt zakonodavnog, regulatornog, ekonomskog i političkog okvira i ocjenjuje se društvena percepcija i podrška. U Europi je cilj pokrenuti i voditi čak 12 opsežnih demonstracijskih projekata do 2015. kako bi se omogućio sveobuhvatni komercijalni razvoj do 2020. godine. U tu je svrhu u siječnju 2008. Europska komisija izdala »Klimatsko-energetski paket« kojim se predlaže Direktiva o geološkom skladištenju CO₂ i druge mjere koje bi promicala razvoj i sigurnu uporabu KSU-a.

Ključna pitanja o geološkom skladištenju CO₂

Mreža izvrsnosti CO₂GeoNet osnovana je pod pokroviteljstvom Europske komisije kao grupa istraživačkih institucija koja je sposobna održati Europu u prvim redovima opsežnog međunarodnog istraživanja. Jedan je od ciljeva CO₂GeoNeta prenošenje jasnih znanstvenih informacija o tehničkim aspektima geološkog



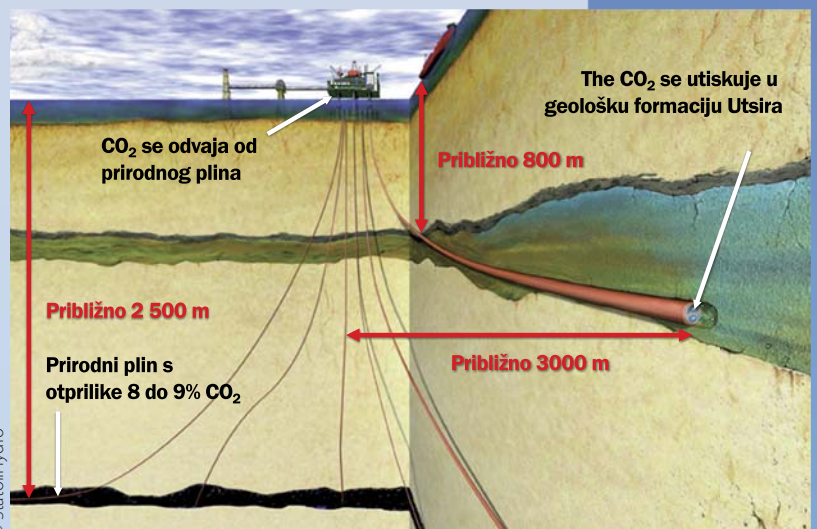
© BRGM im@ge

skladištenja CO₂. Kako bi potaknuli razgovor o ključnim aspektima ove životno značajne tehnologije, znanstvenici CO₂GeoNeta pripremili su osnovne odgovore na nekoliko često postavljanih pitanja. Na sljedećim ćete stranicama pronaći objašnjenja o tome kako se može provesti geološko skladištenje CO₂, u kojim je uvjetima ono moguće i koji su kriteriji za njegovu sigurnu i učinkovitu primjenu.

Slika 4

Vertikalni presjek lokacije Sleipner u Norveškoj. Prirodni plin, koji se crpe s dubine od 2 500 m, sadrži određen postotak CO₂ koji treba biti uklonjen da bi plin bio u skladu s komercijalnim standardima. Umjesto da ga se pušta u atmosferu, CO₂ se nakon kaptiranja utiskuje na dubinu od otprilike 1 000 m u pješčani vodonosnik* Utsira.

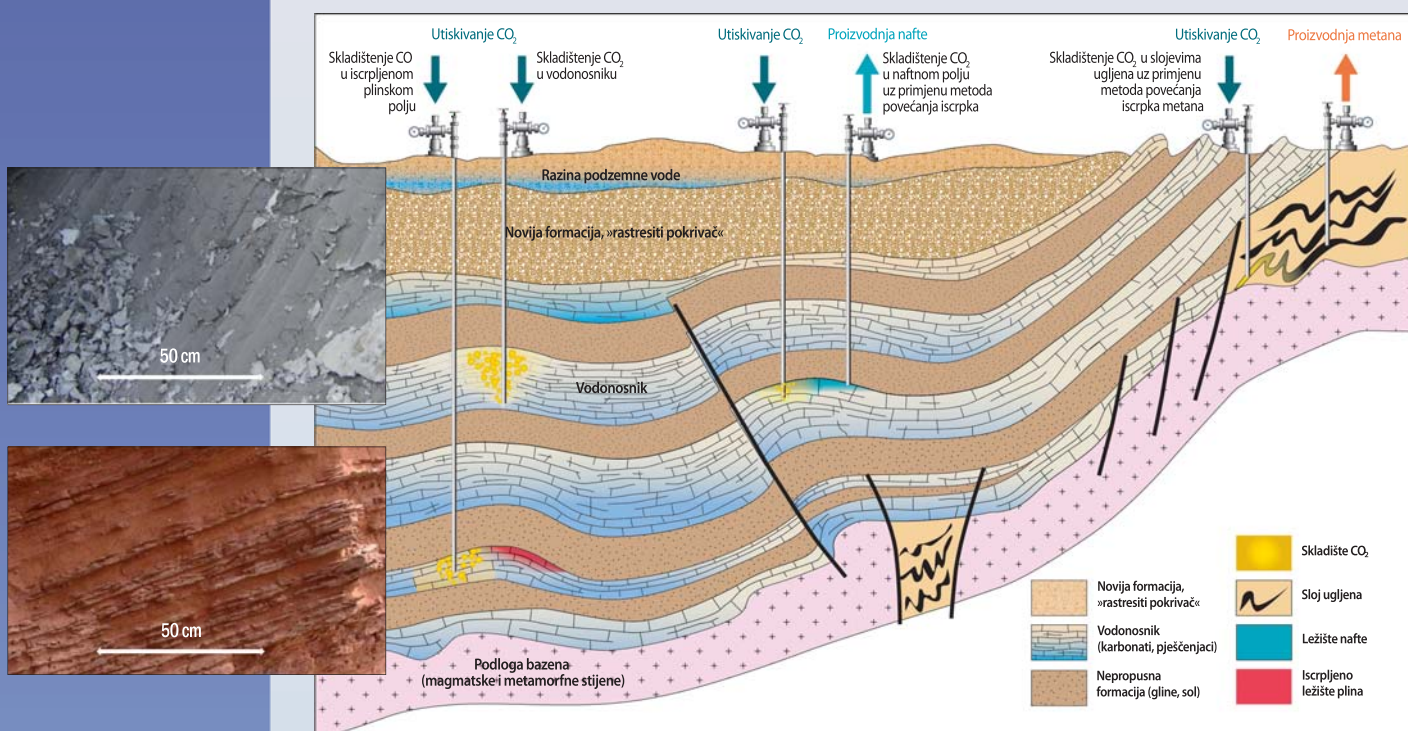
Slika 3
U elektranama se CO₂ kaptira odvajanjem od ostalih plinova. Tada se komprimira i transportira cjevovodom ili brodom do lokacije skladištenja: dubokih slanah vodonosnika, iscrpljenih naftnih ili plinskih polja, dubokih slojeva ugljena.



© StatoilHydro

Gdje i koliko CO₂ možemo uskladištiti u podzemlju?

CO₂ ne može biti utisnut baš bilo gdje u podzemlje, već se prvo moraju odrediti odgovarajuće stijene u kojima se mogu izgraditi podzemna skladišta. One postoje u cijelom svijetu i nude dovoljan kapacitet kako bi se dao značajan doprinos u ublažavanju klimatskih promjena koje je uzrokovao čovjek.



Slika 1
CO₂ se utiskuje u duboke geološke slojeve poroznih i propusnih stijena (vidi pješčenjak u donjoj umetnutoj slici) iznad kojih se nalaze nepropusne stijene (vidi glinovitu stijenu u gornjoj umetnutoj slici) koje sprječavaju da CO₂ izađe na površinu. Glavne su opcije skladištenja:
1. iscrpljena naftna/plinska polja, ako je to moguće i uz dodatno crpljenje;
2. slani vodonosnici, slojevi propusnih stijena ispunjeni slanom vodom koju ljudi ne mogu konzumirati;
3. duboki slojevi ugljena na kojima se lokalno primjenjuje metoda povećanja iscrpka metana.

Postoje tri glavne mogućnosti za skladištenje CO₂ (Slika 1):

1. Iscrpljena plinska i naftna polja – dobro poznata zahvaljujući istraživanju i iskorištavanju ležišta ugljikovodika, nude neposrednu mogućnost skladištenja CO₂;
2. Slani vodonosnici – imaju velik potencijal skladištenja, ali općenito nisu toliko dobro poznati;
3. Duboki slojevi ugljena – opcija za budućnost, nakon što se riješi problem utiskivanja velikog volumena CO₂ u ugljen niske propusnosti*.

Ležišta

Nakon utiskivanja u podzemlje u odgovarajuće ležišne stijene, CO₂ se akumulira u porama između zrna i u pukotinama uklanjajući i zamjenjujući pritom bilo koji postojeći fluid (plin, vodu ili naftu). Odgovarajuće stijene za geološko skladištenje CO₂ trebaju stoga imati visoku poroznost* i propusnost. Takve stijenjske formacije, rezultat taloženja sedimenata u geološkoj prošlosti, obično se nalaze u takozvanim »sedimentnim bazenima«. Mjestimič-

no se ove propusne formacije izmjenjuju s nepropusnim stijenama koje djeluju kao pokrovni izolator. U sedimentnim se bazenima često nalaze ležišta* ugljikovodika i prirodna ležišta CO₂ koja prirodno uzamčuju naftu, plin, čak i čisti CO₂, milijunima godina te je očito da mogu zadržavati fluide tijekom dugih vremenskih razdoblja. U ilustracijama koje prikazuju mogućnosti skladištenja CO₂ podzemlje se često opisuje kao pretjerano pojednostavljena, homogena, slojevita struktura. U stvarnosti se, međutim, sastoji od nejednako razdijeljenih stijenjskih formacija s lokalnim rasjedima ležišnih i pokrovnih stijena*, stvarajući složenu heterogenu strukturu. Nužno je detaljno poznavanje građe podzemlja i geoznanstveno iskustvo da bi se mogla ocijeniti pogodnost podzemnih struktura izabranih za dugoročno skladištenje CO₂. Potencijalna umjetna ležišta CO₂ moraju ispuniti mnoge kriterije, od kojih su osnovni:

- dovoljna poroznost, propusnost i kapacitet uskladištenja;
- prisutnost nepropusnih stijena iznad ležišta – takozvanih »pokrovnih stijena« (npr. glina, glinovita stijena, lapor, naslage soli) koje onemogućuju migraciju CO₂ prema gore;

- prisutnost »strukturnih zamki« – drugim riječima, elemenata kao što su pokrovne stijene u obliku kupole koje mogu zadržati CO₂ unutar skladišne formacije;
- lokacije dublje od 800 m gdje su tlak i temperatura dovoljno visoki, tako da je moguće uskladištiti CO₂ u komprimiranoj tekućoj fazi, čime se znatno povećava kapacitet;
- odsutnost pitke vode: CO₂ se ne utiskuje u slojeve s podzemnom vodom koju bi čovjek mogao konzumirati ili koristiti u druge svrhe.

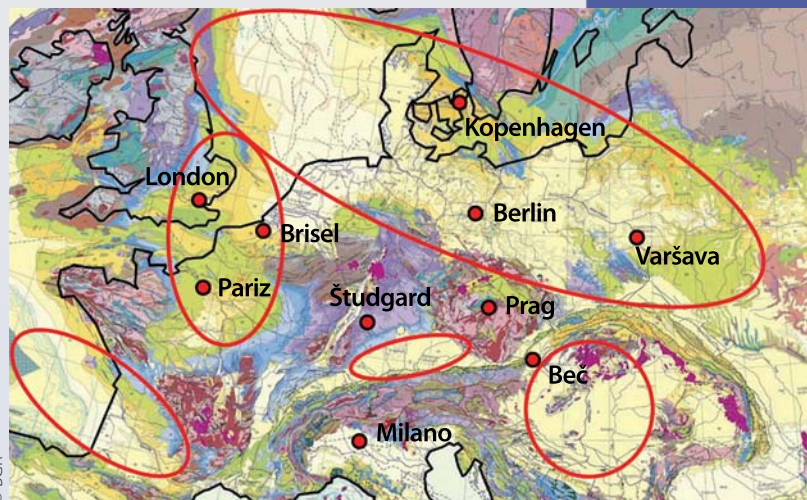
Lokacije skladišta u Europi

Sedimentni su bazeni česti u Europi, na primjer u podmorju Sjevernog mora ili na području koje okružuje alpske planinske lance (**Slika 2**). Mnoge formacije u europskim bazenima ispunjavanju kriterije za geološko skladištenje te ih znanstvenici sada kartiraju i karakteriziraju. Druga područja u Europi građena su od stare konsolidirane kore, kao npr. velik dio Skandinavije, stoga ne sadrže stijene koje su pogodne za skladištenje CO₂. Primjer područja u kojem je moguće skladištiti CO₂ jest južni permski bazen koji se proteže od Engleske do Poljske (predstavljen na Slici 2 najvećom elipsom). Na sedimente su utjecali procesi formiranja stijena tijekom kojih je porni prostor ispunjen slanom vodom, naftom ili prirodnim plinom. Slojevi gline koji se nalaze između poroznih pješčenjaka komprimirani su u slojeve niske propusnosti koji sprječavaju uzdizanje fluida. Velik dio pješčenjaka smješten je na dubini između jednog i četiri kilometra, gdje je pritisak dovoljno visok za skladištenje CO₂ u gustoj, tekućoj fazi. Sadržaj soli u formacijskoj vodi u tom se dubinskom intervalu povećava od otprilike 100 g/l do 400 g/l; drugim riječima, ta je voda mnogo slanija od morske vode (35 g/l). Tektonski pokreti u bazenu uzrokovali su plastičnu deformaciju kamene soli stvarajući stotine struktura u obliku kupola koje su uzamčile prirodni plin. Upravo se te zamke proučavaju kao moguće lokacije za skladištenje i odabiru se za pilot-projekte.

Kapacitet skladišta

Političarima, zakonodavcima i poduzećima koja će se time baviti potrebni su podaci o kapacitetu skladišta CO₂. Procjena kapaciteta obično je vrlo aproksimativna i temelji se na površini prostiranja potencijalno odgovarajuće formacije. Kapacitet može biti procijenjen na temelju različitih mjerila – od razine velikih država za grube procjene, pa sve do razine pojedinog sedimentnog bazena i ležišta za preciznije izračune koji uzimaju u obzir heterogenost i kompleksnost stvarne geološke građe podzemlja.

Volumetrijski kapacitet: Objavljeni nacionalni kapaciteti skladišta općenito se temelje na izračunima pornog volumena formacije. U teoriji, kapacitet skladišta zadane formacije može se izračunati množenjem površine s debljinom, prosječnom poroznošću



© BGR

i prosječnom gustoćom CO₂ u uvjetima dubine ležišta. Međutim, kako se u pornom prostoru već nalazi voda, samo se mali dio može koristiti za skladištenje – pretpostavlja se da iznosi otprilike 1–3%. Taj se koeficijent kapaciteta uskladištenja primjenjuje pri procjeni volumetrijskog kapaciteta.

Stvarni kapacitet: Realniji kapacitet skladišta na pojedinoj lokaciji može se procijeniti detaljnim istraživanjima. 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 izračunu volumena. Temeljem tih informacija može se koristiti kompjuterska simulacija da bi se predvidjelo utiskivanje i kretanje CO₂ unutar umjetnog ležišta s ciljem procjene stvarnog kapaciteta.

Efektivni kapacitet: Kapacitet ne ovisi samo o svojstvima stijena. Društveno-ekonomski čimbenici također utječu na odluku hoće li se pogodna lokacija koristiti ili ne. Na primjer, transport CO₂ od izvora do skladišta ovisi o troškovima transporta. Kapacitet skladišta ovisi i o čistoći CO₂, jer prisutnost ostalih plinova umanjuje volumen ležišta u koji se CO₂ može utisnuti. Naposljetku, političke odluke i javno mnijenje imaju zadnju riječ pri donošenju odluke o korištenju raspoloživog kapaciteta skladišta.



Zaključno, znamo da je kapacitet skladištenja CO₂ u Europi velik, iako postoje nejasnoće vezane uz kompleksnost građe podzemlja i društveno-ekonomske faktore. U projektu EU GESTCO* procijenjeno je da kapacitet skladištenja CO₂ u naftnim i plinskim poljima na području Sjevernog mora iznosi 37 Gt, što bi omogućilo da velika postrojenja u toj regiji utiskuju CO₂ u podzemlje tijekom nekoliko desetljeća. Ažuriranje podataka i daljnje kartiranje kapaciteta geološkog skladištenja u Europi izvedeno je, kako u pojedinim zemljama članicama, tako i na europskoj razini, kroz projekt EU Geocapacity*.

Slika 2
Geološka karta Europe koja prikazuje lokacije glavnih sedimentnih bazena (crvene elipse) u kojima se nalaze stijene pogodne za skladištenje CO₂ (na temelju Geološke karte Europe u mjerilu 1 : 5 000 000)

Kako možemo transportirati i utiskivati velike količine CO₂?

Nakon kaptiranja u industrijskom postrojenju, CO₂ se komprimira i transportira te se zatim utiskuje u podzemno skladište kroz jednu ili više bušotina. Cijeli ovaj lanac mora biti optimaliziran kako bi se omogućilo uskladištenje nekoliko milijuna tona CO₂ godišnje.

Kompresija

Ugljikov dioksid se komprimira u tekućinu koja zauzima značajno manje mjesta nego plin.

Nakon što se CO₂ u elektrani ili industrijskom postrojenju odvoji od dimnog plina, taj se visokokonzentrirani CO₂ dehidrira i komprimira da bi transport i skladištenje bili što učinkovitiji (**Slika 1**). Dehidracija je potrebna da bi se izbjegla korozija opreme i infrastrukture te, uslijed visokog tlaka, formiranje hidrata (čvrsti kristali, nalik ledu, koji mogu začepiti opremu i cijevi).

Kompresija se provodi zajedno s dehidracijom u procesu koji ima više etapa: ponavljani ciklusi kompresije, hlađenja i odvajanja vode. Tlak, temperaturu i količinu vode treba prilagoditi načinu transporta i uvjetima tlaka podzemnog skladišta. Ključni su čimbenici za projektiranje instalacije kompresora: brzina protoka plina, ulazni i izlazni tlak, toplinski kapacitet plina i učinkovitost kompresora. Tehnologija kompresije je dostupna i koristi se u mnogim industrijskim poljima.

Transport

Ugljikov dioksid može se transportirati ili brodom ili cjevovodom.

Trenutačno se brodovima transportiraju vrlo male količine CO₂ za industrijske potrebe (10 000–15 000 m³),

ali to bi u budućnosti mogla postati atraktivna opcija za projekte KSU-a u kojima je izvor CO₂ blizu obale, a jako je udaljen od mjesta utiskivanja. Brodovi koji se koriste za transport ukapljenog naftnog plina (UNP) pogodni su za transport CO₂. Osobito poluhladnjački sustavi koji su pod tlakom i imaju hlađenje, stoga CO₂ može biti transportiran u tekućoj fazi. Najnoviji brodovi za transport UNP-a imaju volumen do 200 000 m³ i mogu transportirati 230 000 t CO₂. Međutim, transport brodom ne osigurava logistiku za neprekidan protok te su potrebna posredna skladišta u luci kako bi se obavio preтовar CO₂.

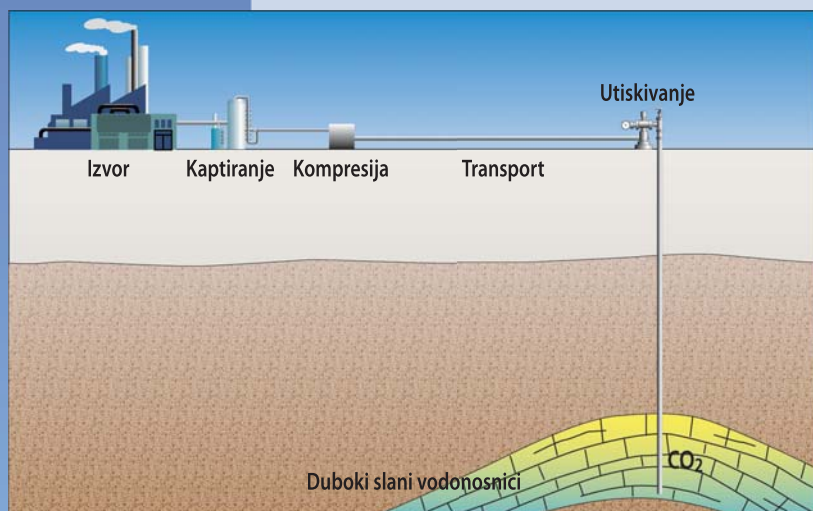
Naftne kompanije transportiraju velike količine CO₂ koje koriste za povećanje iscrpka nafte (približno 3 000 km cjevovoda u svijetu, većinom u Sjedinjenim Američkim Državama). Trošak je manji nego pri transportu brodom, a prednost je što se osigurava neprekidan protok od mjesta kaptiranja do skladišta. Svi postojeći cjevovodi pod visokim su tlakom u nadkritičnim uvjetima za CO₂, u kojima se on ponaša poput plina, ali ima gustoću tekućine. Tri važna čimbenika određuju količinu CO₂ koju cjevovod može transportirati: njegov promjer, promjene tlaka uzduž cjevovoda, a s tim povezano i debljina stijenske.

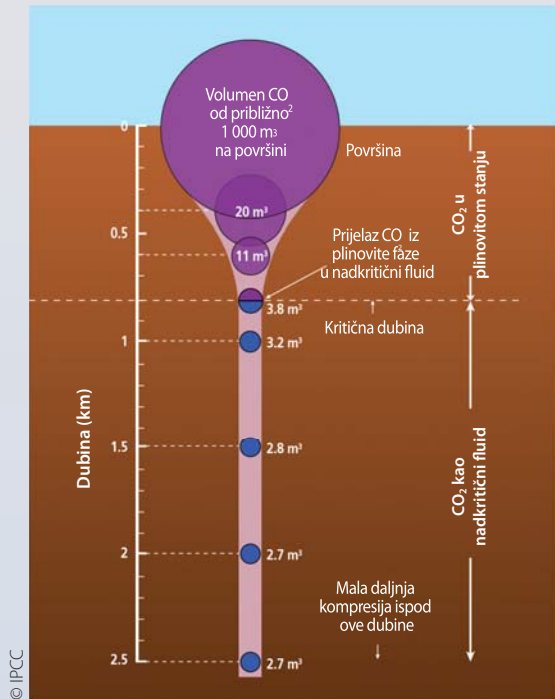
Utiskivanje

Nakon transportiranja do podzemnog skladišta CO₂ se pod pritiskom utiskuje u umjetno ležište (**Slika 2**).

Utisni tlak mora biti dovoljno viši od tlaka u ležišnim stijenama kako bi se ležišni fluid potisnuo od utisne točke. Broj utisnih bušotina ovisi o količini CO₂ koja se skladišti, o volumenu CO₂ koji se utiskuje u jednom satu, o propusnosti i debljini ležišta, o maksimalnom utisnom tlaku i o tipu bušotine. Budući da je glavni cilj dugotrajno geološko uskladištenje CO₂, formacija mora biti hidraulički postojana. Velika brzina utiskivanja može izazvati rast tlaka u utisnoj točki, posebno u niskopropusnim formacijama. Utisni tlak ne bi trebao biti viši od tlaka loma stijene jer bi to moglo oštetiti ležište ili izolator iznad ležišta. Za određivanje maksimalnog utisnog tlaka koji neće uzrokovati pukotine u formaciji koriste se geomehaničke analize i modeli.

Slika 1
Faze geološkog skladištenja CO₂. Da bi se CO₂ doveo od točke emisije do sigurnog i trajnog skladišta, CO₂ mora proći kroz cijeli niz postupaka, uključujući kaptiranje, kompresiju, transport i utiskivanje.





Slika 2
 Nakon što se utisne u podzemlje, CO₂ postaje gust, nadkritičan* fluid na dubini od otprilike 0,8 km. Njegov se volumen dramatično smanjuje od 1 000 m³ na površini do 2,7 m³ na dubini od 2 km. To je jedan od čimbenika zbog kojih je geološko skladištenje velikih količina CO₂ toliko privlačno.

Kemijski procesi mogu djelovati na brzinu utiskivanja. Ovisno o vrsti ležišne stijene, sastavu fluida i uvjetima u podzemlju (kao što su temperatura, tlak, volumen, koncentracija itd.), može doći do otapanja i taloženja minerala u blizini bušotine. Ovi procesi mogu znatno utjecati na povećanje ili smanjenje brzine utiskivanja. Nakon što se CO₂ utisne, jedan se dio otapa u slanoj vodi ležišta, a pH* se neznatno smanjuje pod utjecajem otapanja karbonatnih minerala ležišne stijene. Karbonati su minerali koji prvi stupaju u reakciju, jer otapanje počinje čim započne utiskivanje. Taj proces može lokalno povećati poroznost stijene i injektivnost*. Međutim, nakon otapanja se karbonatni minerali mogu ponovo kristalizirati i cementirati formaciju oko bušotine. Velike brzine utiskivanja mogu se koristiti za ograničavanje smanjenja propusnosti u blizini bušotine, odnosno od nje udaljiti područje geokemijske ravnoteže u kojem se odvija kristalizacija.

Isušivanje je još jedna pojava koju uzrokuje utiskivanje. Nakon faze acidifikacije voda koja je preostala oko utisne bušotine hlapi u utisnutom suhom plinu, te dolazi do povećanja koncentracije minerala u sla-

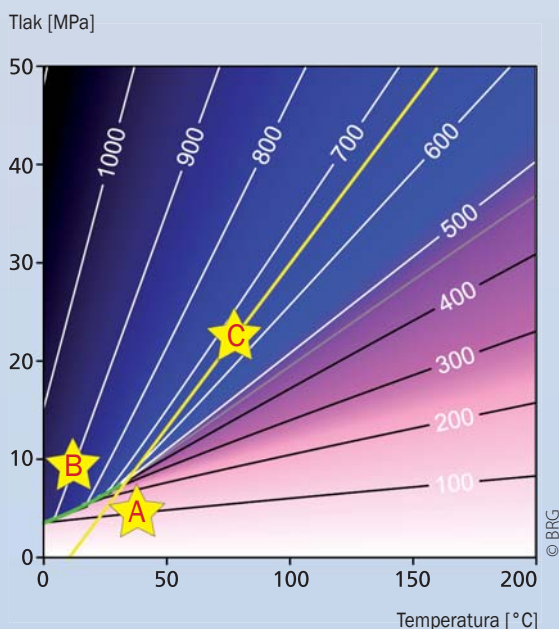
noj vodi*. Minerali (kao što su soli) talože se kad je otopina dovoljno koncentrirana, smanjujući tako propusnost u području oko bušotine.

Ova pitanja vezana uz injektivnost ovise o složenim međusobno povezanim procesima koji se odvijaju lokalno oko utisne bušotine, ali su jako ovisni o vremenu i udaljenosti od utisne bušotine. Za procjenu takvih učinaka koriste se numeričke simulacije. U praksi to znači da brzinu utiskivanja treba pažljivo definirati kako bi se kontrolirali procesi koji mogu ograničiti utiskivanje željene količine CO₂.

Sastav CO₂

Sastav i čistoća CO₂, koji je rezultat procesa kaptiranja, imaju značajan utjecaj na sve naredne aspekte projekta skladištenja CO₂. Prisutnost određenog postotka drugih tvari, kao što su voda, sumporovodik (H₂S), sumporni i dušični oksidi (SO_x, NO_x), dušik (N₂) i kisik (O₂), djelovat će na fizikalna i kemijska svojstva CO₂ i u vezi s tim na odvijanje pojedinih procesa i njihov učinak. Stoga prisutnost tih tvari treba uzeti u obzir pri projektiranju faza kompresije, transporta i utiskivanja, kao i pri usklađivanju radnih uvjeta, tj. postupaka i opreme.

Zaključno, transport i utiskivanje velikih količina CO₂ već su izvedivi. Međutim, ako se geološko skladištenje CO₂ želi početi široko primjenjivati, sve faze koje ono uključuje trebaju biti osmišljene posebno za svaki projekt uskladištenja. Ključni su parametri: termodinamičke značajke CO₂ (**Slika 3**), brzina protoka i uvjeti u utisnom postrojenju i ležištu.



Slika 3
 Gustoća čistog CO₂ (u kg/m³) kao funkcija temperature i tlaka. Žuta linija odgovara tipičnom gradijentu tlaka i temperature u sedimentnom bazenu. Na dubinama većim od 800 m (~8MPa) uvjeti u ležištu omogućuju visoku gustoću (plavo osjenčano). Zelena krivulja predstavlja graničnu fazu između plinovitog i tekućeg CO₂. Tipični uvjeti tlaka i temperature za kaptiranje, transport i skladištenje redom su označeni slovima A, B i C.

Što se događa s CO₂ nakon uskladištenja u podzemlju?

Nakon što se utisne u ležišne stijene, CO₂ se uzdiže prema površini ispunjavajući porni prostor ispod pokrovne stijene. Tijekom vremena dio će se CO₂ otopiti i naposljetku pretvoriti u minerale. Ovi se procesi odvijaju u raznim vremenskim razdobljima i pridonose trajnom uzamčivanju.

Mehanizmi uzamčivanja

Nakon što se utisne u ležišnu stijenu, CO₂ ispunjava njezin porni prostor koji je u većini slučajeva već ispunjen slojnom vodom, tj. slanom vodom. Kada se CO₂ utisne, započinju djelovati sljedeći mehanizmi. Prvi smatramo najvažnijim jer sprječava uzdizanje CO₂ na površinu. Ostala tri s vremenom povećavaju učinkovitost i sigurnost skladišta.

1. Akumulacija ispod pokrovne stijene (Strukturalno uzamčivanje)

Budući da je gusti CO₂ »lakši« od vode, počinje se uzdizati. To se kretanje prekida kada CO₂ stigne do sloja stijene koji je nepropustan, tzv. »pokrovne stijene«. Obično sastavljena od gline ili soli, ta pokrovna stijena djeluje kao izolator sprječavajući daljnje uzdizanje CO₂ koji se akumulira izravno ispod stijene, u povoljnim uvjetima – »zatkama«. **Slika 1** ilustrira uzdizanje CO₂ kroz porni prostor stijene (plavo) do pokrovne stijene.

2. Imobilizacija u malim porama (Rezidualno uzamčivanje)

Rezidualno se uzamčivanje pojavljuje kada je porni prostor u ležišnoj stijeni tako uzak da se CO₂ ne može dalje kretati prema gore unatoč razlici u gustoći u odnosu na okolnu vodu. Ovaj se proces uglavnom odvija tijekom migracije CO₂ i obično može imobilizirati nekoliko postotaka utisnutog CO₂, ovisno o svojstvima ležišne stijene.

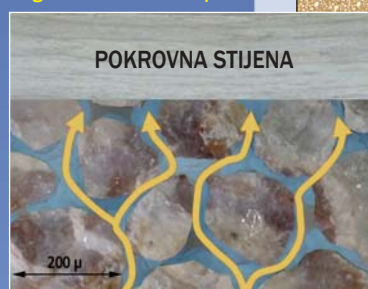
3. Otapanje (Uzamčivanje otapanjem)

U slanoj vodi, koja ispunjava porni prostor ležišta, otapa se mali udio utisnutog CO₂. Posljedica je otapanja spuštanje prema dnu ležišta vode u kojoj je otopljen CO₂, a koja je teža od vode bez CO₂. Brzina otapanja ovisi o kontaktu između CO₂ i slane vode. Količina CO₂ koja se može otopiti ograničena je maksimalnom koncentracijom. Međutim, zbog uzdizanja utisnutog CO₂ i spuštanja vode s otopljenim CO₂ stalno se obnavlja kontakt između slane vode i CO₂ povećavajući na taj način količinu koja se može otopiti. Ovi su procesi relativno spori jer se odvijaju unutar uskih pornih prostora. Grube procjene na projektu Sleipner pokazuju da se otprilike 15% CO₂ otopi 10 godina nakon utiskivanja.

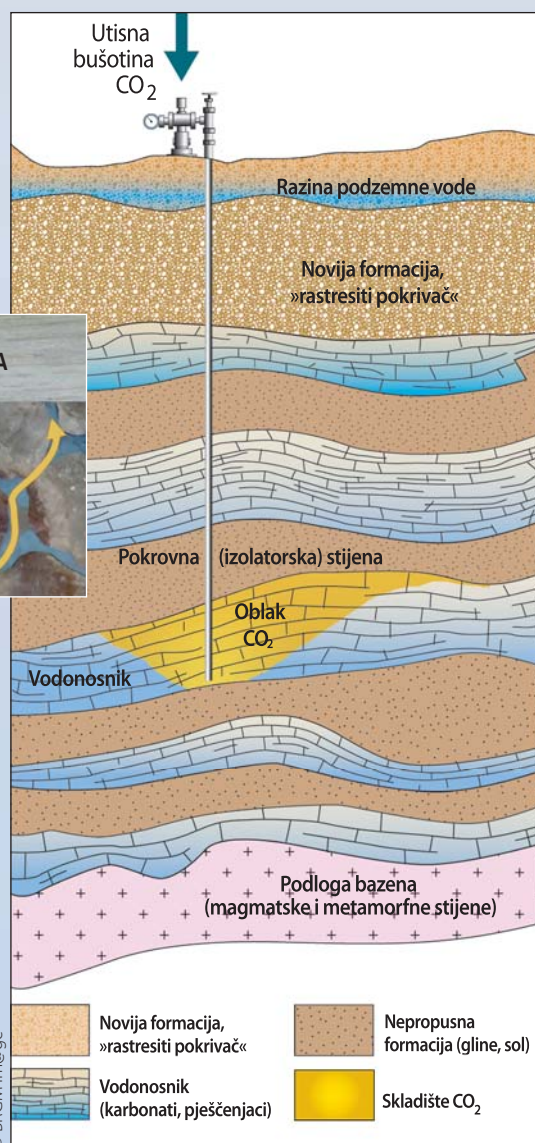
4. Mineralizacija (Mineralno uzamčivanje)

Ugljikov dioksid, posebno u kombinaciji sa slanom slojnom vodom, može reagirati s mineralima od kojih se sastoji ležišna stijena. Određeni se minerali mogu otopiti, dok se drugi talože, ovisno o pH i mineralnom sastavu (**Slika 2**). Procjene u Sleipneru pokazuju da će samo mali udio biti

Pogled kroz mikroskop



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





Slika 2
Gusti CO₂ migrira prema gore (svijetloplavi mjehurići), otapa se i reagira sa zrnima stijene dovodeći do taloženja karbonatnih minerala na granicama zrna (bijelo).

imobiliziran mineralizacijom nakon vrlo dugog vremenskog razdoblja. Nakon 10 000 godina samo bi se 5% utisnutog CO₂ trebalo mineralizirati, dok će 95% biti otopljeno te neće preostati CO₂ u fizički odvojenoj gustoj fazi.

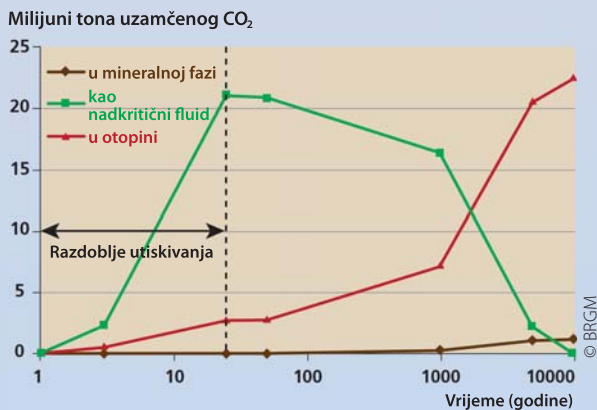
Utjecaj različitih mehanizama uzamčivanja ovisi o lokaciji, tj. o značajkama svake pojedine lokacije. Na primjer, u ležištima u obliku kupole CO₂ bi trebao ostati uglavnom u gustoj fazi tijekom dugog vremenskog razdoblja, dok će u ravnim ležištima, kao što je Sleipner, većina utisnutog CO₂ biti otopljena ili mineralizirana.

Kretanje udjela CO₂ vezanog raznim mehanizmima uzamčivanja 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 mjerenja:** mikroskopski eksperimenti mineralizacije, podzemne cirkulacije i otapanja



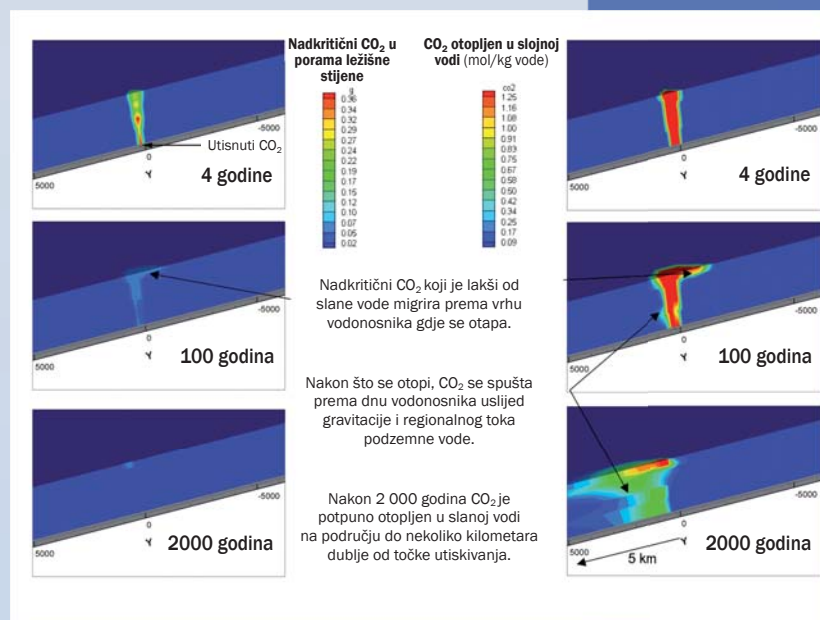
Slika 3
Promjene stanja CO₂ u ležištu Sleipner prema simulacijama toka. CO₂ je uzamčen u nadkritičnom obliku mehanizmima 1 i 2, u otopljenom obliku mehanizmom 3, a u mineralnom obliku mehanizmom 4.

panja mogu se provesti na uzorcima stijena dajući uvid u kratkotrajne procese u malom mjerilu.

- **Numeričke simulacije:** razvijeni su računalni modeli koji se mogu koristiti za predviđanje ponašanja CO₂ tijekom puno dužih vremenskih razdoblja (**Slika 4**). Laboratorijski eksperimenti koriste se da bi se kalibrirale numeričke simulacije.
- **Studije o prirodnim ležištima** gdje je CO₂ (uglavnom vulkanskog porijekla) uzamčen u podzemlju tijekom dugog vremenskog razdoblja, često milijunima godina. Takva ležišta nazivamo »prirodnim analogima«* jer se na tim mjestima provode istraživanja o ponašanju plina i dugoročnim posljedicama zadržavanja CO₂ u podzemlju.
- **Praćenje postojećih demonstracijskih projekata geološkog skladištenja CO₂** kao što su Sleipner (norveško podmorje), Weyburn (Kanada), In Salah (Alžir) i K12-B (nizozemsko podmorje). Rezultati simulacija u kratkom vremenskom razdoblju uspoređuju se sa stvarnim terenskim podacima te pomažu pri usklađivanju modela.

Samo stalnim uspoređivanjem i provjeravanjem ovih četiriju izvora informacija može se steći pouzdano znanje o svim procesima koji se događaju otprilike 1 000 m ispod naših nogu.

Slika 4
Trodimenzionalno modeliranje migracije CO₂ u vodonosniku nakon utiskivanja 150 000 tona tijekom 4 godine (dogerski vodonosnik u Francuskoj). Prikazan je nadkritični CO₂ (lijevo) i CO₂ otopljen u slanoj vodi (desno) nakon 4 god., 100 god. i 2 000 god. od početka utiskivanja. Simulacija se temelji na terenskim podacima i eksperimentima.



Zaključno, znamo da se sigurnost skladišta CO₂ povećava s vremenom. Kritično je pitanje pronaći ležište s pogodnom pokrovnom stijenom koja može zadržati CO₂ (strukturno uzamčivanje). Svi procesi koji su vezani uz uzamčivanje otapanjem te mineralno i rezidualno uzamčivanje dodatno sprječavaju migraciju CO₂ prema površini.

Može li doći do propuštanja CO₂ iz podzemnog skladišta i, ako može, kakve bi mogle biti posljedice?

Na temelju proučavanja prirodnih sustava ne očekuje se da pažljivo odabrane lokacije značajno propuštaju CO₂. Prirodna ležišta plina pomažu nam da shvatimo uvjete pod kojima se plin u podzemlju uzamčuje ili otpušta. Uz to, lokacije koje propuštaju CO₂ pomažu nam da shvatimo koji bi mogli biti učinci propuštanja.

Putovi propuštanja

Općenito uzevši, mogući putovi propuštanja su ili tehnički (npr. duboke bušotine) ili prirodni (npr. sustavi pukotina i rasjedi).

I aktivne i napuštene bušotine mogu predstavljati putove migracije jer, kao prvo, tvore izravnu vezu između površine i ležišta, a kao drugo, izgrađene su od materijala koji može korodirati tijekom vremena (**Slika 1**). Dodatna je komplikacija što sve bušotine nisu napravljene istom tehnikom, stoga su novije bušotine uglavnom sigurnije od starih. U svakom se slučaju smatra da je rizik propuštanja kroz bušotinu nizak jer se i nove i stare bušotine mogu učinkovito pratiti korištenjem preciznih geokemijskih i geofizičkih metoda, i zato što u naftnoj industriji već postoji tehnologija popravni radnji koje bi mogle biti potrebne.

Migracija CO₂ uzduž prirodnih rasjeda i pukotina koje postoje u pokrovnoj stijeni ili njenoj krovini* složenija je jer se radi o nepravilnim, plošnim obilježjima s prostorno varijabilnom propusnošću. Znanstveno i tehničko razumijevanje prirodnih sustava koji propuštaju i onih koji ne propuštaju omogućuje nam da projektiramo objekte

geološkog skladištenja koji imaju iste značajke kao i prirodna ležišta koja uzamčuju CO₂ i metan tisućama i milijunima godina.

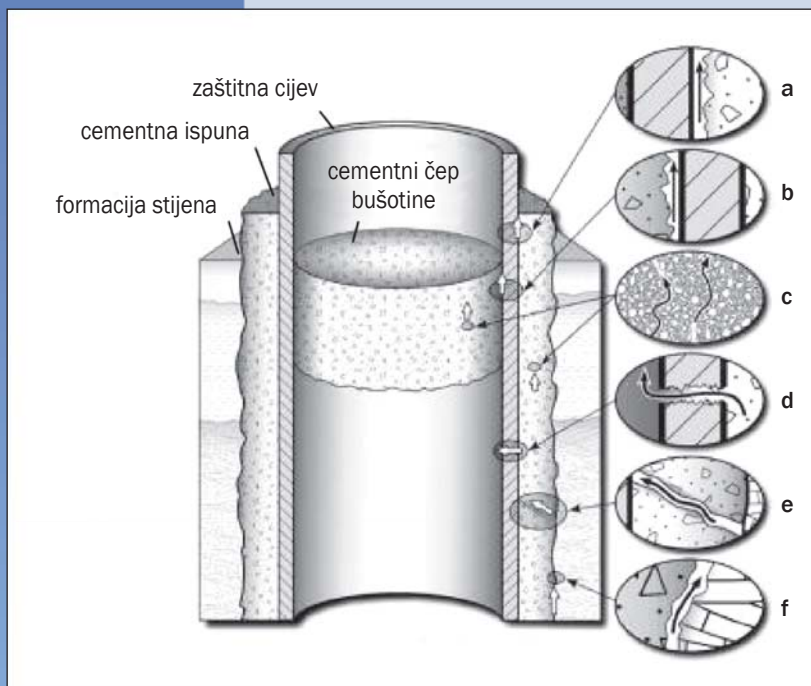
Što smo naučili iz prirodnih analoga?

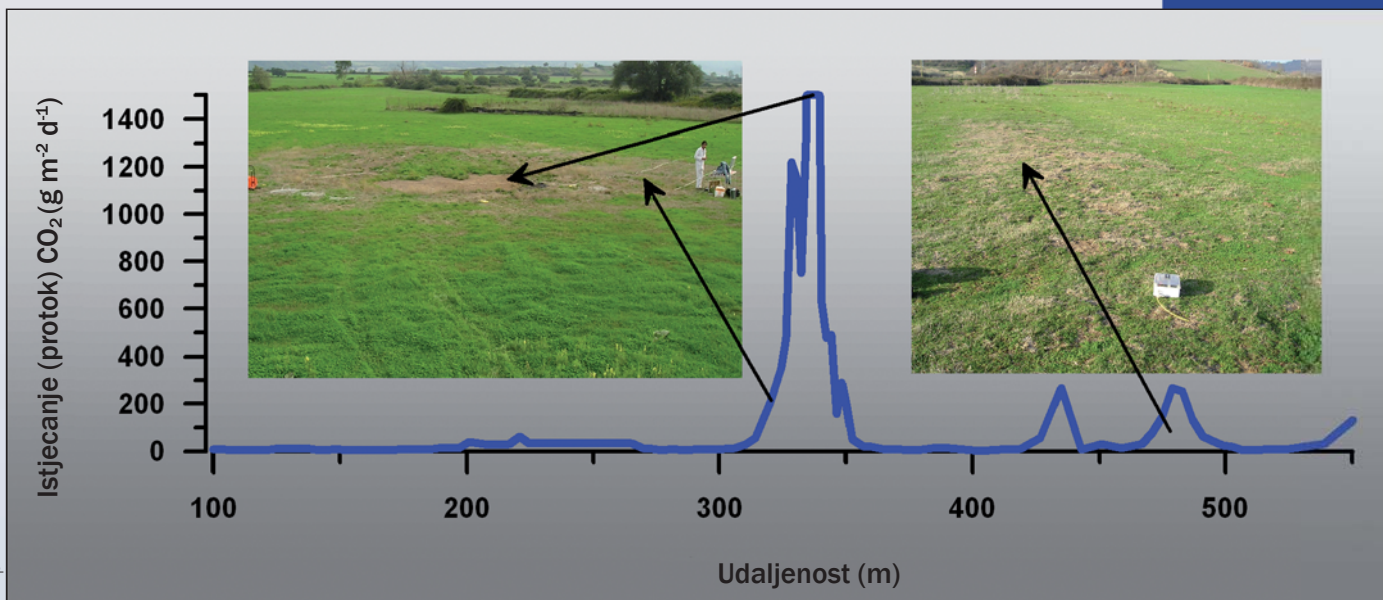
Prirodni sustavi (tzv. prirodni analozi) neprocjenjivi su izvori informacija za bolje razumijevanje dubokih migracija plina i prirodne izmjene plinova između Zemlje i atmosfere. Najvažnija otkrića koja proizlaze iz istraživanja brojnih ležišta prirodnog plina (od kojih neka propuštaju, a neka ne):

- u povoljnim geološkim uvjetima u podzemlju akumulirani prirodni plin može biti uzamčen stotinama tisuća ili milijunima godina;
- izolirana ležišta plina postoje čak i u najnepovoljnijim geološkim okruženjima (vulkanska područja);
- migracija bilo kakve značajne količine plina uvjetovana je advekcijom (tj. protokom iz područja višeg u područje nižeg tlaka) jer je difuzija vrlo spor proces;
- kako bi došlo do advekcije, tlak pod kojim se fluid nalazi u ležištu treba biti sličan litostatskom tlaku* da bi rasjedi i pukotine ostali otvoreni ili da bi se mehanički kreirali novi putovi migracije;
- područja koja propuštaju prirodno proizveden plin na površinu smještene su gotovo isključivo u vulkanskim i seizmički aktivnim regijama, s prirodnim izvorima kroz koje plin izlazi iz podzemlja smještenim duž aktivnih ili nedavno aktiviranih rasjeda;
- rijetko dolazi do značajnog propuštanja plina, obično samo u vulkanskom i geotermalnom području s mnogo rasjeda gdje se CO₂ neprestano generira prirodnim procesima;
- povećane koncentracije plina na površini obično su prisutne u lokaliziranim točkama i imaju ograničen prostorni učinak na okoliš blizu površine.

Iz navedenog proizlazi da je potrebna kombinacija određenog broja posebnih uvjeta kako bi došlo do propuštanja. Malo je vjerojatno da bi dobro izabrano i pažljivo projektirano skladište CO₂ propuštalo. Iako je mogućnost propuštanja mala, moramo u potpunosti razumjeti sve procese i moguće učinke vezane uz skladištenje CO₂ kako bi se izabralo, projektiralo i vodilo najsigurnije moguće skladište.

Slika 1
Moгуći putovi CO₂ kroz bušotinu. Prolaz kroz izmijenjen materijal (c,d,e) ili duž točkaka dodira (a,b,f).





Učinak na čovjeka

Cijelo vrijeme udišemo CO₂. On je opasan za ljudsko zdravlje samo u vrlo visokim koncentracijama. Vrijednosti do 50 000 ppm (5%) uzrokuju glavobolju, vrtoglavicu i mučninu. Vrijednosti iznad te razine, ako je izloženost preduga, mogu uzrokovati smrt, pogotovo gušenjem ako koncentracija kisika u zraku padne ispod 16%, što je potrebna razina da bi se čovjek održao na životu. Međutim, u slučaju ispuštanja CO₂ na otvorenom ili ravnom području, on se brzo raspršuje u zraku, čak i uz slab vjetar. Mogući rizik za čovjeka predstavlja propuštanje u zatvorenim prostorima ili topografskim depresijama gdje se koncentracije mogu povećati jer je CO₂ gušći od zraka i obično se akumulira blizu tla. Poznavanje značajki područja gdje dolazi do prirodne migracije plina iz podzemlja korisno je za prevenciju i upravljanje rizikom. Zapravo, mnogo ljudi živi u područjima koja karakterizira svakodnevno izbijanje plina. Na primjer u Ciampinu blizu Rima, u Italiji, kuće su smještene samo 30 metara od plinskih izvora gdje koncentracija CO₂ u tlu iznosi 90%, a otprilike sedam tona CO₂ izlazi dnevno u atmosferu. Lokalno stanovništvo izbjegava bilo kakvu opasnost provodeći jednostavne mjere opreza kao što su ne spavati u podrumu i dobro prozračivati kuće.

Učinak na okoliš

Mogući učinci na ekosustave variraju ovisno o tome je li skladište smješteno na kopnu ili u podmorju.

U morskim je ekosustavima glavni učinak propuštanja CO₂ lokalno snižavanje pH i uz to vezane posljedice, primarno na životinje koje žive na morskom dnu i ne mogu se odseliti. Međutim, posljedice su prostorno ograničene i ekosustav pokazuje znakove oporavka ubrzo nakon što se propuštanje smanji.

U kopnenim ekosustavima učinak može općenito biti sljedeći:

- **Vegetacija** – Iako koncentracija do otprilike 20–30% CO₂ u plinovima u tlu može zapravo koristiti oplodnji biljaka i povećati brzinu rasta za određene vrste, vrijednosti iznad tog praga mogu biti smrtonosne za neke biljke. Te su posljedice lokalizirane samo oko otvora gdje plin izlazi, pa već nekoliko metara dalje vegetacija ostaje čvrsta i zdrava (**Slika 2**).
- **Kvaliteta podzemne vode** – Kemijski sastav podzemne vode može biti promijenjen dodavanjem CO₂ jer voda postaje kiseliya i dolazi do otpuštanja elemenata iz stijena vodonosnika. Čak i kada bi CO₂ ušao u vodonosnik pitke vode, posljedice bi bile lokalizirane, a znanstvenici trenutačno istražuju kvantifikaciju učinka. Zanimljivo je da su mnogi vodonosnici diljem Europe obogaćeni prirodnim CO₂, a ta se voda zapravo stavlja u boce i prodaje kao »gazirana mineralna voda«.
- **Integritet stijena** – Acidifikacija podzemne vode može uzrokovati otapanje stijena, smanjivanje njihovih mehaničkih svojstava i formiranje ponora. Međutim, taj se učinak javlja samo u vrlo specifičnim geološkim i hidrogeološkim uvjetima (tektonski aktivni vodonosnici s velikom brzinom toka podzemne vode, bogati karbonatima) ispod kojih se ne bi trebala graditi podzemna skladišta ugljika.

Zaključno, učinci bilo kakvog hipotetskog propuštanja CO₂ ovisit će o određenoj lokaciji, a detaljno poznavanje geološkog sastava i građe omogućit će nam da odredimo sve potencijalne putove migracije, odaberemo lokacije s najnižom mogućnošću propuštanja CO₂, predvidimo ponašanje plina i tako ocijenimo i spriječimo bilo kakav bitan učinak na ljude i ekosustav.

Slika 2
Učinak propuštanja CO₂ na vegetaciju kod jakog (lijevo) i smanjenog (desno) istjecanja. Učinak je ograničen na područje gdje CO₂ izlazi na površinu.



Kako možemo pratiti funkcioniranje podzemnog skladišta u podzemlju i na površini?

Sva skladišta CO₂ treba nadzirati radi operativnih, sigurnosnih, društvenih i ekonomskih razloga te onih vezanih uz zaštitu okoliša. Treba izraditi strategiju da bi se odredilo što će se točno pratiti i kako.

Zašto je potrebno pratiti što se u skladištu događa?

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

- **Operativne:** da bi se kontrolirao i optimalizirao proces utiskivanja.
- **Sigurnosne i vezane uz zaštitu okoliša:** da bi se minimalizirao ili spriječio učinak na čovjeka, život u divljini i ekosustave u blizini skladišta, i kako bi se osiguralo ublažavanje globalnih klimatskih promjena.
- **Društvene:** da bi se javnosti osigurala informacije vezane uz sigurnost skladišta i kako bi se zadobilo povjerenje javnosti.
- **Financijske:** da bi se osiguralo povjerenje tržišta u tehnologiju KSU-a i potvrdilo da se uskladištene količine CO₂ na taj način smatraju »izbjegnutim emisijama« u budućim fazama Sheme trgovanja emisijama EU-a.

Utvrđivanje inicijalnog stanja okoliša (tzv. osnovno stanje) i sljedećih faza propisano je Direktivom Europske komisije o KSU-u objavljenom 23. travnja 2009. godine. Poduzeća koja će se baviti skladištenjem trebaju pokazati da skladište djeluje u skladu s propisima i da će dugoročno nastaviti tako raditi. Nadziranje je značajna komponenta koja će smanjiti nejasnoće u djelovanju skladišta, i stoga treba biti usko vezana uz djelatnosti upravljanja sigurnošću.

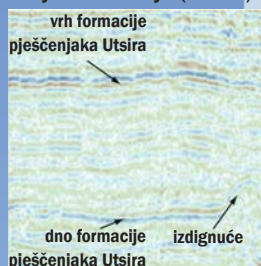
Koji su ciljevi nadzora?

Praćenje može biti usmjereno na razne ciljeve i procese u različitim dijelovima skladišta, kao što su:

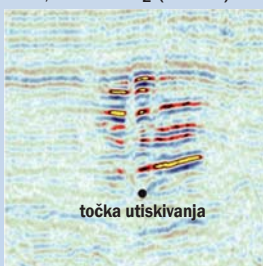
- Prikaz oblaka CO₂ – praćenje CO₂ dok migrira od točke utiskivanja. Osigurava ključne podatke za kalibriranje modela koji predviđaju buduću distribuciju CO₂ u skladištu. Postoje mnoge razrađene metode, posebno ponavljana seizmička istraživanja koja se uspješno primjenjuju u nekoliko demonstracijskih i pilot-projekata (**Slika 1**).
- Integritet pokrovne stijene – nužno da bi se procijenilo je li CO₂ izoliran unutar ležišta i da bi se omogućilo rano upozoravanje u slučaju neočekivane migracije CO₂ prema površini. To može biti posebno važno tijekom faze utiskivanja, kada su tlakovi u ležištu značajno, ali privremeno, povećani.
- Integritet bušotine. To je važno pitanje jer duboke bušotine mogu osigurati izravan put za migraciju CO₂ prema površini. Bušotine za utiskivanje CO₂ kao i opažačke bušotine ili već postojeće napuštene bušotine moraju se pažljivo pratiti tijekom faze utiskivanja i nakon toga da bi se spriječilo iznenađeno izlaženje CO₂. Praćenjem se potvrđuje da su sve bušotine učinkovito izolirane nakon što više nisu potrebne. Postojeći geofizički i geokemijski sustavi praćenja, koji su standardna praksa u naftnoj i plinskoj industriji, mogu biti instalirani u bušotinama ili iznad njih da bi omogućili rano upozoravanje i osigurali sigurnost.
- Migracije u krovinskim naslagama. U skladištima gdje pliče stijenske jedinice imaju svojstva slična svojstvima pokrovne stijene, krovina može biti ključna komponenta u smanjenju rizika prolaska CO₂ u more ili atmosferu. Ako praćenje u ležištu ili oko pokrovne stijene ukazuje na neočekivanu migraciju kroz pokrovnu stijenu, opažanje krovinskih naslaga postaje nužno. Mnoge metode korištene za prikaz oblaka CO₂ ili praćenje integriteta pokrovne stijene mogu se koristiti i unutar mlađih krovinskih naslaga.
- Površinsko propuštanje, atmosferska detekcija i mjerenje. Za sprječavanje migriranja utisnutog CO₂ na površinu koristi se niz geokemijskih i biokemijskih metoda, a daljinska istraživanja koriste se da bi se lociralo propuštanje te da bi se procijenila i pratila distribucija CO₂ u tlu i njegovo širenje u atmosferi ili u morskom okolišu (**Slika 2**).
- Mjerenje količina uskladištenog CO₂ u zakonodavne i fiskalne svrhe. Iako se količina utisnutog CO₂ može jednostavno izmjeriti na ušću bušotine, kvantifikaci-

Slika 1
Seizmički prikaz praćenja oblaka CO₂* na pilot-projektu Sleipner prije utiskivanja (koje je započelo 1996.) i nakon utiskivanja (odnosno tri godine i pet godina nakon toga).

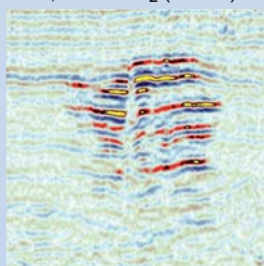
Prije utiskivanja (1994.)



2,35 Mt CO₂ (1999.)



4,36 Mt CO₂ (2001.)



© StatoilHydro

ja u ležištu tehnički je vrlo zahtjevna. Ako dođe do propuštanja blizu površine, tada će ispuštene količine morati biti kvantificirane i zabilježene unutar nacionalnih inventara stakleničkih plinova i budućih shema trgovanja emisijama.

- Pomicanje tla i mikroseizmičnost*. Povećani tlak u ležištu koji nastaje zbog utiskivanja CO₂ može u specifičnim slučajevima povećati potencijal mikroseizmičnosti i malih pomicanja tla. Dostupne su metode praćenja mikroseizmičnosti i daljinske metode (iz zrakoplova ili satelita) kojima se može izmjeriti i najmanja deformacija površine tla.

Kako se provodi praćenje funkcioniranja skladišta?

Već se primjenjuje širok raspon metoda praćenja u demonstracijskim i istraživačkim projektima. Postoje metode kojima se izravno prati CO₂ i one kojima se posredno opaža njegov utjecaj na stijene, fluide i okoliš. Izravna mjerenja uključuju analize fluida iz dubokih bušotina ili mjerenja koncentracije plina u tlu ili atmosferi. Neizravne metode uključuju geofizička istraživanja i praćenje promjene tlaka u bušotinama ili promjene pH u podzemnim vodama.

Potrebno je pratiti funkcioniranje skladišta i u podmorju i u podzemlju. Odabir prikladnih metoda ovisit će o tehničkim i geološkim značajkama skladišta i ciljevima praćenja. Dostupan je širok raspon metoda (**Slika 3**), od kojih su mnoge dobro razrađene u naftnoj i plinskoj industriji pa se sada prilagođavaju opažanju CO₂. Već se istražuje optimalizacija postojećih metoda i razvoj inovativnih postupaka s ciljem povećanja pouzdanosti, smanjivanja troškova, automatizacije postupaka i demonstracijske učinkovitosti.

Strategija praćenja

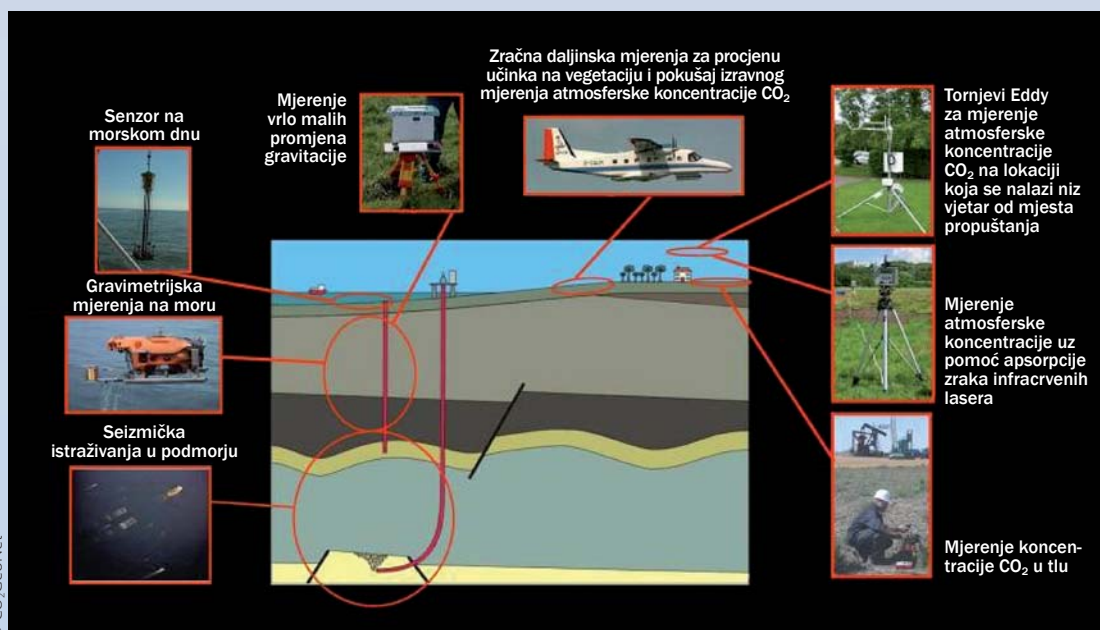
Kad se planira strategija praćenja, odluke koje se moraju donijeti ovise o geološkim i inženjerskim uvjetima specifičnim za svako pojedino skladište, a to su: oblik i dubina ležišta, očekivano širenje oblaka CO₂, potencijalni putovi propuštanja, geološki sastav krovine, vrijeme utiskivanja, brzina toka i površinske značajke kao što su topografija, gustoća naseljenosti, infrastruktura i ekosustavi. Nakon što se donese odluka o najprikladnijim postupcima mjerenja i lokacijama, moraju se provesti temeljna istraživanja prije no što započne utiskivanje kako bi poslužila kao referenca za sva buduća mjerenja. Naposljetku, svaki program praćenja mora biti fleksibilan kako bi se razvijao zajedno s projektom skladištenja. Strategija praćenja, koja može integrirati sva ova pitanja, dok u isto vrijeme smanjuje troškove, predstavljat će ključnu komponentu u analizi rizika i verifikaciji sigurnosti i učinkovitosti skladišta.

Zaključno, znamo da je moguće pratiti funkcioniranje podzemnog skladišta CO₂ mnogim metodama koje su prisutne na tržištu ili se tek razvijaju. Istraživanje je trenutno u tijeku, ne samo za razvijanje nove opreme (osobito za korištenje na morskom dnu), nego i za optimaliziranje praćenja i smanjivanja troškova.



© CO₂GeoNet

Slika 2
Plutača za praćenje sa solarnim pločama za opskrbu energijom, plovcu i naprava koja skuplja uzorke plina s morskog dna.



Slika 3
Izbor koji prikazuje raspon dostupnih metoda za praćenje raznih komponenti sustava skladištenja CO₂.

Koje kriterije sigurnosti treba nametnuti i poštovati?

Da bi se osigurala sigurnost i učinkovitost, zakonodavne vlasti moraju nametnuti uvjete za planiranje i provođenje projekta koje poduzeća koja se bave skladištenjem moraju poštovati.

Iako je geološko skladištenje CO₂ sada prihvaćeno u svijetu kao jedna od vjerodostojnih mogućnosti za ublažavanje klimatskih promjena, preostaje još utvrditi kriterije sigurnosti koji se odnose na ljudsko zdravlje i lokalni okoliš prije no što se započne razvoj na industrijskoj razini. Ti su kriteriji zahtjevi koje zakonodavne vlasti postavljaju poduzećima kako bi se osiguralo da su učinci na lokalni okoliš (uključujući podzemne resurse), sigurnost i zdravlje kratkoročno, srednjoročno i dugoročno zanemarivi.

Ključna je pretpostavka da geološko skladištenje treba biti trajno, i stoga se ne očekuje da skladišta propuštaju. Međutim, scenarij »što ako« znači da rizik mora biti procijenjen i da se od poduzeća mora zahtijevati da poštuju mjere koje sprječavaju bilo kakvo propuštanje ili anomalije u funkcioniranju skladišta. Prema IPCC-u, utisnuti CO₂ treba ostati u podzemlju najmanje 1 000 godina, što bi omogućilo da se atmosferske koncentracije CO₂ stabiliziraju ili padnu prirodnom izmjenom s oceanskim vodom, minimalizirajući time rast temperature na Zemlji uslijed globalnog zatopljenja. Međutim, lokalni učinci trebaju biti procijenjeni za periode od nekoliko dana do više tisuća godina.

Mogu se odrediti glavni koraci tijekom trajanja projekta skladištenja CO₂ (**Slika 1**). Sigurnost se osigurava na sljedeće načine:

- pažljivim odabirom i karakterizacijom lokacije;
- procjenom sigurnosti;

- uzeti u obzir sastav CO₂, posvećujući posebnu pažnju primjesama koje nisu uklonjene tijekom kaptiranja. To je važno zbog izbjegavanja bilo kakve nepovoljne interakcije s bušotinom, ležištem, pokrovnom stijenom i, u slučaju propuštanja, s podzemnom vodom iznad ležišta.

Kriteriji sigurnosti pri planiranju projekta

Prije početka utiskivanja mora se demonstrirati sigurnost projekta.

S obzirom na izbor lokacije, glavne komponente koje treba ispitati uključuju:

- ležišnu i pokrovnost stijenu;
- ostale naslage u krovini, posebno nepropusne slojeve koji mogu djelovati kao sekundarni izolator;
- prisutnost propusnih rasjeda ili bušotina koje predstavljaju moguće putove migracije prema površini;
- vodonosnike pitke vode;
- populaciju i ograničenja okoliša na površini.

Metode istraživanja ležišta nafte i plina koriste se kako bi se procijenili geološki sastav i građa te oblik podzemnog skladišta. Tok fluida, kemijsko i geomehaničko modeliranje CO₂ unutar ležišta omogućuju predviđanje ponašanja CO₂, dugoročni rezultat skladištenja i definiranje parametara za učinkovito utiskivanje. Kao rezultat, temeljita karakterizacija lokacije omogućila bi definiranje scenarija »normalnog« ponašanja skladišta, koji odgovara lokaciji prikladnoj za uskladištenje, a gdje smo sigurni da će CO₂ ostati u ležištu.

Procjena rizika tada treba uzeti u obzir manje vjerojatne scenarije za buduće stanje skladišta, uključujući i neočekivane događaje. Posebno je važno predvidjeti putove propuštanja, izloženost i posljedice (**Slika 2**). Svaki scenarij propuštanja trebaju analizirati stručnjaci i, gdje je moguće, primijeniti numeričko modeliranje da bi se procijenila vjerojatnost događaja i ozbiljnost situacije. Na primjer, širenje oblaka CO₂ treba biti pažljivo kartirano kako bi se otkrila bilo kakva veza sa zonom rasjeda. U procjeni rizika pažljivo treba ocijeniti varijacije u ulaznim parametrima i neizvjesnosti. Potencijalne posljedice djelovanja CO₂ na ljude i okoliš procjenjuju se kroz studije utjecaja na okoliš, što je uobičajena praksa u bilo kojem procesu licenciranja

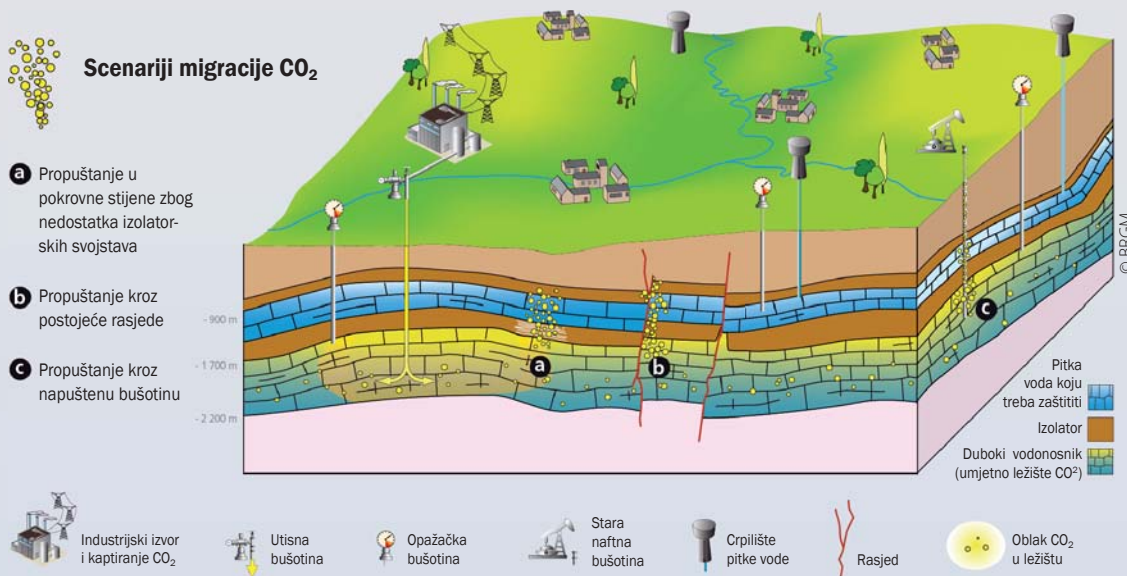
Slika 1
Faze projekta
skladištenja



- ispravnim vođenjem;
- odgovarajućim planom praćenja;
- adekvatnim planom remedijacije, tj. planiranjem popravni mjera.

Uz to, vezani ključni ciljevi su:

- osigurati da CO₂ ostane u ležištu;
- sačuvati integritet bušotine;
- sačuvati fizikalne značajke ležišta (uključujući poroznost, propusnost i injektivnost) i nepropusnost pokrovne stijene;



Slika 2
Potencijalni scenariji
propuštanja

industrijskog postrojenja. Stoga će se istražiti i normalni scenarij i scenarij u slučaju propuštanja kako bi se procijenio potencijalni rizik vezan uz postrojenje. Program praćenja, od kratkoročnog do dugoročnog, treba uspostaviti u skladu s analizom procjene rizika, a program bi trebao kontrolirati kritične parametre definirane u raznim scenarijima. Njegovi su glavni ciljevi: prikazati migraciju oblaka CO₂, provjeriti integritet bušotine i pokrovne stijene, otkriti bilo kakvo propuštanje CO₂, ocijeniti kvalitetu podzemne vode i osigurati da CO₂ ne proдре na površinu. Plan popravnih mjera i ublažavanja mogućih posljedica posljednja je komponenta procjene sigurnosti s ciljem detaljnog popisa korektivnih radnji koje treba poduzeti u slučaju propuštanja ili anomalija u funkcioniranju skladišta. Obuhvaća propuštanje integriteta pokrovne stijene i bušotine tijekom i nakon utiskivanja, te uzima u obzir ekstremna rješenja za remedijaciju, kao što je pražnjenje skladišta. Postojeće znanje obuhvaća standardne postupke u naftnoj i plinskoj industriji, kao što su održavanje bušotina, smanjenje tlaka pri utiskivanju, djelomično ili potpuno povlačenje plina, crpljenje vode radi smanjenja tlaka, crpljenje plina iz plitkih slojeva itd.

Sigurnosni kriteriji tijekom punjenja skladišta i nakon zatvaranja

Glavno pitanje sigurnosti odnosi se na operativnu fazu: nakon što utiskivanje završi, lokacija postaje sigurnija zbog pada tlaka.

Uvjereno je da je moguće utisnuti i uskladištiti CO₂ na siguran način temelji se na iskustvu industrijskih kompanija. CO₂ je prilično uobičajen proizvod koji se koristi u raznim granama industrije, tako da postupak s tim spojem ne otvara nova pitanja. Projektiranje i kontrola operacija temelje se uglavnom na iskustvu naftne i plinske industrije, posebno na sezonskom skladištenju prirodnog plina ili metodama povećanja iscrpka nafte

(EOR – Enhanced Oil Recovery*). Glavni parametri koje treba kontrolirati su:

- utisni tlak i protok – tlak treba zadržati vrijednosti niže od tlaka pri kojem nastaju pukotine, tj. tlaka iznad kojeg dolazi do pucanja u pokrovnoj stijeni;
- utisnuti volumen, kako bi se realizirala predviđanja definirana modeliranjem;
- sastav utisnutog CO₂;
- integritet utisnih bušotina i bušotina smještenih unutar ili u blizini širenja oblaka CO₂;
- širenje oblaka CO₂ i otkrivanje propuštanja;
- stabilnost tla.

Tijekom utiskivanja stvarno ponašanje CO₂ treba neprekidno uspoređivati s predviđenim ponašanjem. Na taj način doznajemo više o određenoj lokaciji. Ako se otkrije anomalija u ponašanju, program praćenja treba ažurirati i poduzeti korektivne radnje ukoliko je potrebno. Ako se sumnja da skladište propušta, odgovarajuća se oprema za praćenje usmjerava na specifično područje skladišta, od ležišta do površine. Tako se na vrijeme otkriva uzdizanje CO₂ i mogući štetan učinak za vodonosnike pitke vode, okoliš, i na kraju na ljude. Kada je utiskivanje završeno, započinje faza zatvaranja. Bušotine treba pravilno zatvoriti i napustiti, ažurirati program modeliranja i praćenja i, ako je potrebno, poduzeti popravne radnje kako bi se smanjio rizik. Nakon što se utvrdi da je razina rizika dovoljno niska, odgovornost za skladište prelazi na nacionalne vlasti i plan praćenja može biti obustavljen ili minimaliziran.

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

Zaključno, kriteriji sigurnosti ključni su za uspješan industrijski razvoj geološkog skladištenja CO₂. Trebaju biti prilagođeni svakoj pojedinoj lokaciji skladištenja. Ti su kriteriji posebno važni zbog javnog mnijenja i ključni su u postupku licenciranja za koje zakonodavna tijela moraju uspostaviti detalje vezane uz zahtjeve sigurnosti.

Bušotina: kružna udubina izrađena bušenjem, nekoliko kilometara duboka i malog promjera, kao što je naftna bušotina.

CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum): Forum za vođenje sekvenciranja ugljika. Međunarodna klimatska inicijativa usmjerena na razvoj poboljšanih, jeftinijih tehnologija za separaciju i kaptiranje ugljikova dioksida i njegovo transportiranje i dugotrajno sigurno uskladištenje.

EOR (Enhanced Oil Recovery): Dopunske (tercijarne) metode povećanja iscrpka nafte. Postupci kojima se povećava crpljenje nafte ubrizgavanjem fluida (poput vodene pare ili CO₂) koji pomažu pokretanju nafte u ležištu.

EU GeoCapacity: europski istraživački projekt u sklopu kojeg je napravljena procjena ukupnog kapaciteta geološkog skladištenja koji postoji u Europi za emisije CO₂ koje je uzrokovao čovjek.

GESTCO: europski istraživački projekt u kojem je napravljena procjena mogućnosti geološkog skladištenja CO₂ u osam zemalja (Norveška, Danska, Ujedinjeno Kraljevstvo, Belgija, Nizozemska, Njemačka, Francuska i Grčka).

IEAGHG (International Energy Agency – Greenhouse Gas R&D Programme): Međunarodna agencija za energiju – istraživačko-razvojni program za stakleničke plinove. Međunarodna suradnja kojoj je cilj ocijeniti tehnologije za smanjenje emisije stakleničkih plinova, objavljivati rezultate tih studija, identificirati ciljeve istraživanja, razvoja i demonstracije, te promovirati odgovarajući istraživački rad.

Injektivnost: označava lakoću kojom se fluid (kao CO₂) može utisnuti u geološku formaciju. Definira se kao brzina utiskivanja (protok) podijeljena s razlikom pritiska između unutarnje utisne točke na dnu bušotine i formacije.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Međuvladin panel o klimatskim promjenama. Organizaciju su 1988. utemeljili Svjetska meteorološka organizacija (WMO) i Program Ujedinjenih naroda za zaštitu okoliša (UNEP) kako bi procijenili znanstvene, tehničke i društveno-ekonomske informacije relevantne za razumijevanje klimatskih promjena, njihov mogući učinak i opcije za ublažavanje klimatskih promjena. IPCC i Al Gore dobitnici su Nobelove nagrade za mir 2007. godine.

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

KSU: kaptiranje i skladištenje ugljika.

Dodatno:

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

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

IEAGHG – oprema za praćenje: http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html

Ležište: podzemna formacija vezanih ili nevezanih stijena koje su dovoljno porozne i propusne da se u njih može utisnuti i uskladištiti CO₂. Najčešće su to slojevi pješčenjaka ili vapnenca.

Litostatski tlak: pritisak kojim na stijenu u podzemlju djeluje težina stijena koje se nalaze iznad nje. Litostatski se tlak povećava s dubinom.

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

Nadkritično: stanje fluida pri tlaku i temperaturi iznad kritičnih vrijednosti (31,03 °C i 7,38 MPa za CO₂). Svojstva su takvih fluida kontinuirano varijabilna, od pretežno plinovitih pri niskom tlaku do pretežno tekućih pri visokom tlaku.

Oblak CO₂: prostorna distribucija nadkritičnog CO₂ unutar stijena u podzemlju.

pH: mjera kiselosti otopine, gdje pH 7 označava neutralnu otopinu.

Pokrovna stijena: nepropusni, izolatorski sloj stijena koji predstavlja zapreku kretanju tekućina i plinova, i koji formira zamku kada se nalazi iznad ležišnih stijena.

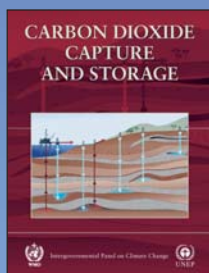
Poroznost: postotak ukupnog volumena stijene koji ne čine mineralna zrna. Te se šupljine nazivaju porama i mogu biti ispunjene raznim fluidima. U dubokim je stijenama taj fluid obično slana voda, ali može biti i nafta, prirodni plin (metan) ili prirodno stvoreni CO₂.

Prirodni analog: ležište CO₂ nastalo prirodnim putem. Postoje lokacije koje propuštaju i koje ne propuštaju, i njihovo proučavanje može unaprijediti naše razumijevanje dugoročnog skladištenja CO₂ u dubokim geološkim sustavima.

Propusnost: svojstvo ili sposobnost porozne stijene da propušta fluide; to je mjera relativne lakoće protoka fluida pod gradijentom tlaka.

Slana voda: vrlo mineralizirana voda, tj. ona koja sadrži visoku koncentraciju otopljenih soli.

Vodonosnik: propusno stijensko tijelo koji sadrži vodu, akvifer. Vodonosnici koji su najbliži površini sadrže pitku vodu, koju ljudi koriste. Oni na većoj dubini ispunjeni su slanom vodom, koju ljudi ne mogu koristiti, i njih nazivamo slanivim vodonosnicima.



Što je CO₂GeoNet?



CO₂GeoNet je europsko udruženje znanstvenika kojima se možete obratiti za jasne i iscrpne informacije o geološkom skladištenju CO₂, inovativnoj i životno važnoj tehnologiji za ublažavanje klimatskih promjena. CO₂GeoNet osnovala je Europska komisija kao Mrežu izvrsnosti u Šestom okvirnom programu (ugovor s Ekom u trajanju od 2004. do 2009.). Okuplja 13 institucija iz sedam europskih zemalja, a sve imaju istaknut međunarodni ugled i predstavljaju kritičnu masu u istraživanju geološkog skladištenja CO₂. Godine 2008. CO₂GeoNet je registriran kao neprofitabilno udruženje prema francuskom zakonu da bi mogao nastaviti svoje aktivnosti i nakon što ga Europska komisija prestane financirati.

CO₂GeoNet ima bogato iskustvo u projektima koji se bave istraživanjima ležišnih i pokrovnih stijena, potencijalnih putova migracije CO₂ prema površini, opreme za praćenje, mogućih učinaka na ljude i ekosustave te istraživanjem javnog mnijenja. CO₂GeoNet pruža raznolike usluge iz četiri glavna područja: 1) združeno istraživanje; 2) obuka i izgradnja kapaciteta; 3) znanstveno savjetovanje; 4) informiranje i komunikacija.

Porasla je važnost CO₂GeoNeta, i on je postao trajan znanstveni autoritet u Europi koji može osigurati potrebnu znanstvenu potporu za širok i siguran razvoj geološkog skladištenja CO₂. Trenutačno se radi na proširenju udruženja na paneuropskoj razini kroz projekt CGS Europe, akciju koordinacije koja se financira putem Sedmog okvirnog programa Europske komisije (2010.–2013.). CGS Europe združuje jezgru udruženja CO₂GeoNet i još 21 istraživačku instituciju, pokrivajući na taj način 28 zemalja (24 zemlje članice i četiri pridružene članice). Kao rezultat toga, nekoliko se stotina znanstvenika bavi multidisciplinarnim pristupom svim aspektima geološkog skladištenja CO₂. Naš je cilj zainteresiranim stranama i javnosti osigurati neovisne znanstvene informacije o geološkom skladištenju CO₂.



CO₂GeoNet: Europska mreža izvrsnosti za geološko skladištenje CO₂

BGR (Njemačka); **BGS** (Ujedinjeno Kraljevstvo); **BRGM** (Francuska); **GEUS** (Danska); **HWU** (Ujedinjeno Kraljevstvo); **IFPEN** (Francuska); **IMPERIAL** (Ujedinjeno Kraljevstvo); **NIVA** (Norveška); **OGS** (Italija); **IRIS** (Norveška); **SPR Sintef** (Norveška); **TNO** (Nizozemska); **URS** (Italija).



CGS Europe: Paneuropska koordinirana akcija za geološko skladištenje CO₂

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



CO₂GeoNet priznat je na europskoj i međunarodnoj sceni

Forum za vođenje sekvenciranja ugljika (CSLF) potvrdio je CO₂GeoNet.



CO₂GeoNet usko surađuje s Istraživačko-razvojnim programom stakleničkih plinova Međunarodne agencije za energiju (IEAGHG).



O ovoj brošuri

Kako bi se podigla svijest javnosti o geološkom skladištenju CO₂, CO₂GeoNet pozabavio se glavnim pitanjem »Što zapravo znači geološko skladištenje CO₂?«. Skupina istaknutih znanstvenika iz CO₂GeoNeta pripremila je najnovije odgovore na šest osnovnih pitanja koja se temelje na svjetskim istraživanjima i iskustvu. Cilj je bio predstaviti jasne i nepristrane znanstvene informacije širokoj publici i potaknuti dijalog o temeljnim pitanjima koja se odnose na tehničke aspekte geološkog skladištenja CO₂. Taj posao, sažet u ovoj brošuri, predstavljen je tijekom Radionice za obuku i dijalog koja je održana u Parizu 3. listopada 2007. godine.

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

CO₂GeoNet

Europska 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 Energie 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.



Hrvatsku verziju izdalo je Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet u okviru projekta »CGS Europe: Paneuropska koordinirana akcija za geološko skladištenje CO₂« Sedmog okvirnog programa za istraživanje i razvoj EU-a.

ISBN 978-953-6923-18-2

