

MOŽNOST ZMANJŠANJA UČINKA TOPLE GREDE Z GEOLOŠKIM SKLADIŠČENJEM CO₂ GLOBOKO POD ZEMLJINIM POVRŠJEM

Reduction of Greenhouse Effect by Geological Storage of CO₂ Deep under the Earth's Surface

Andrej Gosar * UDK 504.3:661.975

Povzetek
Zmanjševanje emisij toplogrednih plinov zaradi uporabe fosilnih goriv je ena ključnih nalog človeštva. Ena od možnosti, ki jo raziskovalci in tehnologi pospešeno preučujejo, je trajno geološko skladiščenje CO₂ globoko pod Zemljinim površjem. Pri tem razvijajo postopke za učinkovito ločevanje in zajetje CO₂ iz dimnih plinov ter gospodarno in varno skladiščenje v opuščeni naftni ali plinski polji, v slanah vodonosnikih, plasteh premoga ali v oceanih. Gospodarnost skladiščenja lahko izboljša povečana količina izkoriščene nafte ali plina iz nahajališča oz. pridobljen metan iz plasti premoga. Pri vseh načinih skladiščenja je treba dokazati, da CO₂ ne bo migriral iz nahajališča, in raziskati, kakšni kemični procesi potekajo med CO₂, fluidi in kamnino.

Abstract
Reduction of greenhouse gases emissions from burning fossil fuels is one of mankind's key tasks. One opportunity intensively studied by scientists and engineers is permanent geological storage of CO₂ deep under the Earth's surface. Appropriate methods are being developed for efficient CO₂ sequestration from smoke gases and for its economical and safe disposal in depleted oil or gas fields, in salt water reservoirs, in coal beds or in oceans. The cost of storage is partly compensated by enhanced oil or gas recovery from a field or by the production of methane from coal beds. In all storage types it must be proven that the CO₂ will not migrate from the storage layer, and the chemical reactions between CO₂, fluids and rocks must be explored.

Uvod

Kjotski sporazum o zmanjševanju emisij toplogrednih plinov, ki dokazano povzročajo globalno segrevanje ozračja in s tem škodljive podnebne spremembe, je bil sprejet po dolgih pogajanjih sicer že leta 1997, vendar je zaradi dolgotrajnih ratifikacij in odklonilnega odnosa nekaterih držav začel veljati šele 16. februarja 2005. Bistvo Kjotskega sporazuma, da bodo posamezne države zmanjšale svoje emisije toplogrednih plinov (predvsem CO₂) za dogovorjen delež in da bo vzpostavljen sistem trgovanja z emisijami, je tudi širši javnosti dobro znan. Manj pa je znano, da se raziskovalci in tehnologi že dlje časa pospešeno ukvarjajo z možnostjo, da bi lahko tudi s skladiščenjem CO₂ v geoloških plasteh globoko pod površjem pomembno zmanjšali emisije toplogrednih plinov v ozračje. Zlasti v okviru šestega raziskovalnega programa Evropske unije potekajo številni projekti, katerih cilj je razviti ustrezne tehnologije za varno, učinkovito in gospodarno geološko skladiščenje CO₂. Pri tem sta v ospredju dva glavna vidika: tehnologija ločevanja in

zajetja CO₂ iz dimnih plinov velikih energetskega objektov ali neposredno iz zemeljskega plina pri pridobivanju vodika kot energenta prihodnosti ter učinkovito, trajno in varno skladiščenje CO₂ v geoloških plasteh, v katerih je bila predtem lahko voda, lahko gre za delno izčrpana naftna in plinska polja ali za plasti premoga, ki so sposobne vsrkati večje količine plina. V tem prispevku bomo obravnavali predvsem drugi vidik, to je učinkovito geološko skladiščenje CO₂. Zamisel je sicer preprosta – vrniti ogljik iz fosilnih goriv, pridobljenih iz Zemljine skorje, katerih zgorevanje je glavni vir CO₂, nazaj v geološke plasti, namesto spuščanja v ozračje.

Ločevanje in zajetje CO₂

Seveda ni nobenih možnosti, da bi zajeli CO₂, ki nastane pri zgorevanju fosilnih goriv v individualnih kuriščih, manjših industrijskih obratih ali v prevoznih sredstvih. Vendar statistika virov CO₂ kaže, da ga kar 35 % nastane pri proizvodnji električne energije, kjer posamezna termoelektrarna izpusti letno v ozračje več milijonov ton CO₂. Drug tak zgoščen vir je proizvodnja vodika iz zemeljskega plina, pri kateri je največji "odpadni" proizvod prav tako CO₂. Da lahko v tem primeru govorimo o vodiku kot o

* Doc. dr., Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si

najčistejšem viru energije, saj nastane pri njegovem zgorevanju le voda, seveda ne smemo CO₂-ja, ki nastane pri njegovi proizvodnji, izpustiti v ozračje (US Department of Energy, 2005).

Danes preizkušajo različne tehnologije, ki ločujejo in zajemajo CO₂ pred zgorevanjem fosilnih goriv ali po zgorevanju. Več je zadnjih. V rafinerijah nafte je tako že dolgo znan postopek absorpcije topil, ki temelji na reverzibilnosti kemične reakcije med CO₂ in topilom. Uporablja se predvsem pri pridobivanju CO₂ za uporabo v živilski industriji in drugih panogah. Pri termoelektrarnah je problem večji, ker gre za ogromno količino dimnih plinov, ki zahtevajo zelo velike in učinkovite naprave za ločevanje in zajetje CO₂. Najobetavnejše so tehnologije, ki izboljšujejo površino stika med tekočino in plinom s pomočjo membran in z izboljševanjem lastnosti topil. Raziskujejo tudi zgorevanje v čistem kisiku, pri čemer nastaneta voda in CO₂, ki ga lahko zajamemo. Če so koncentracije CO₂ visoke, ga lahko ločimo tudi s kriogenim ohlajanjem dimnih plinov. Ocenjujejo, da bodo lahko tako iz dimnih plinov izločili do 80 % CO₂, ne da bi se pri tem proizvodnja električne energije nesprijemljivo podražila (Herzog in sod., 2000).

Postopki, ki se uporabljajo pred zgorevanjem, se imenujejo tudi dekarbonizacija fosilnih goriv. Velik del kemične industrije temelji na uporabi "sintetičnih plinov", ki so mešanica vodika in ogljikovega monoksida (CO), ki ga seveda ni težko pretvoriti v CO₂. To tehnologijo prilagajajo tudi za proizvodnjo električne energije, pri čemer bi CO₂ izločili iz mešanice še pred zgorevanjem. Najbolj razširjeno pa je uplinjevanje premoga, pri katerem izločijo del ogljika v obliki CO₂.

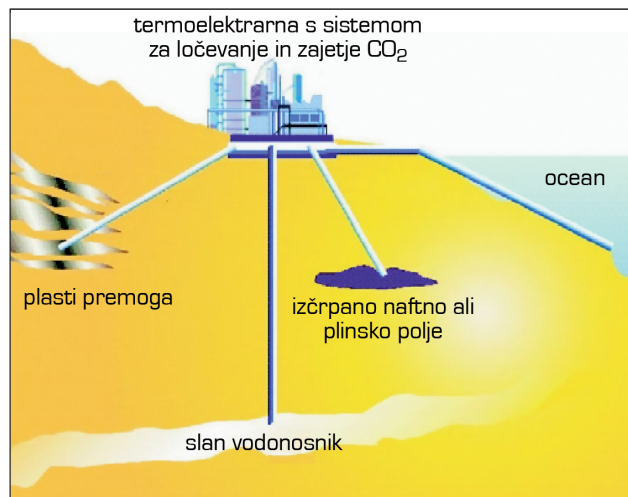
Geološko skladiščenje CO₂

Splošno

Skladiščenje tako ločenega in zajetega CO₂ v geoloških plasteh ni preprosto, ker moramo zagotoviti, da bo tam ostal več sto ali tisoč let. Torej mora biti zagotovljena popolna tesnost krovnih plasti. Drugi pogoj pa je ekonomski – strošek skladiščenja na tona CO₂ bo moral doseči ceno, ki bo primerljiva s cenami, s katerimi se bo trgovalo v okviru že omenjene sheme trgovanja z emisijami. Kot bomo videli, lahko h gospodarnosti precej pripomore, če z vtiskanjem CO₂ v geološko plast povečamo izdatnost naftnega ali plinskega polja oz. če tako pridobimo metan iz premogove plasti (Davidson in sod., 2001).

Raziskujejo pet različnih možnosti geološkega skladiščenja CO₂ (slika 1):

- skladiščenje v izčrpanih naftnih in plinskih poljih,
- skladiščenje v slanah vodonosnikih,
- skladiščenje v plasteh premoga,
- skladiščenje v oceanih.



Slika 1. Možni načini geološkega skladiščenja CO₂
Figure 1. Options for geological storage of CO₂

	Gt CO ₂	Delež emisij 2000-2050
opuščena naftna in plinska polja	920	45 %
plasti premoga	>15	>1 %
slani vodonosniki	400-10.000	20-500 %

Preglednica 1. Globalni potencial za skladiščenje CO₂ v gigatonah oz. v deležu vseh predvidenih svetovnih emisij v obdobju 2000-2050 (vir: Davidson in sod., 2001)
Figure 1. Global potential for storage of CO₂ in gigatons and as a share of all envisaged world emissions 2000-2050 (Source: Davidson et al., 2001)

Mednarodna agencija za energijo (IEA) je v okviru Greenhouse Gas R&D Programme ocenila globalni potencial za skladiščenje CO₂, ki znaša v gigatonah (1 gigatona = 1 Gt = 10⁹ t) oz. v deležu vseh predvidenih svetovnih emisij v obdobju 2000-2050 (Davidson in sod., 2001), kar prikazuje preglednica 1.

Možnost skladiščenja v oceanih, kjer pravzaprav ne moremo govoriti o geološkem skladiščenju, še ni dovolj preučena, da bi omogočala podobno oceno.

Vsem načinom geološkega skladiščenja je skupno, da mora v primerni globini obstajati geološka plast z dovolj visoko poroznostjo in prepustnostjo, da je sposobna sprejeti večjo količino CO₂ v plinasti ali tekoči obliki in da morajo nad to "skladiščno" plastjo obstajati neprepustne zaporne plasti, ki bodo zelo dolgo preprečevale migracijo CO₂ iz nje proti površju. Kemizem kamnin in fluidov mora biti tak, da tudi kemične reakcije uskladiščenega CO₂ z njimi ne bodo imele takih posledic, da bi zaradi njih prišlo do njegovega uhajanja. Toda tudi če skladiščna plast ni popolnoma zatesnjena, lahko podrobne raziskave pokažejo, da je difuzija zelo počasna in lahko traja stoletja ali tisočletja (Stevens in Gale, 2000).

Skladiščenje v izčrpanih naftnih in plinskih poljih

Ta možnost skladiščenja je posebno privlačna, ker za opuščena polja vemo, da so zadrževala naravni plin in nafto milijone let in tudi njihova geološka zgradba je že dobro znana iz časov črpanja. Dodatno lahko z vtiskanjem CO₂ v produktivno plast pridobimo znatne dodatne količine nafte in plina, ki bi sicer ostale neizkoriščene, kar se uporablja pri poljih, ki so že precej izčrpana in bi jih v kratkem zaprli. Ko v naftonosno plast vtiskamo CO₂ (slika 2), ta izriva nafto proti črpalni vrtini, delno pa se tudi pomeša z nafto in zmanjša njeno viskoznost, kar dodatno pripomore k povečanju pritiska v plasti. Kombinacija teh procesov torej povečuje izdatnost naftnega ležišča. Do polovice injiciranega CO₂ ostane v plasti, kjer je bila prej nafta, preostalega pa zajamejo na ustju črpalne vrtine in ponovno vtisnejo v produktivno plast.

Gospodarnost skladiščenja CO₂ s sočasnim povečanjem izdatnosti naftnih ležišč je že dokazana. V ZDA ga že uporabljajo na 74 naftnih poljih, v katera injicirajo okoli 33 milijonov ton CO₂ letno. Za zdaj prihaja večina CO₂, ki se pri tem uporablja, iz naravnih virov, okoli 3 milijone ton pa že zajemajo pri čiščenju zemeljskega plina, pri proizvodnji amoniaka in v drugi industriji. Največji tovrstni projekt na svetu je polje Weyburn v Kanadi, kjer uskladiščijo letno 1,8 milijona ton CO₂, ki nastaja pri proizvodnji plina iz premoga v tovarni na drugi strani meje v ZDA. Pričakujejo, da bodo z vtiskanjem CO₂ povečali črpanje nafte v naslednjih 20–25 letih in v tem času uskladiščili 19 milijonov ton CO₂ [Davidson in sod., 2001].

Pri opuščnem plinskem polju bo CO₂ zavzel del prostora v porah kamnine, kjer je bil prej zemeljski plin. Nekatera opuščena plinska polja ali vodonosniki se sicer uporabljajo tudi za skladiščenje zemeljskega plina, ki je potrebno zaradi neenakomerne porabe v različnih letnih časih. Ocenjujejo, da bi lahko v izpraznjenih plinskih poljih skladiščili bistveno več CO₂ kot v opuščeni naftnih poljih. Tudi

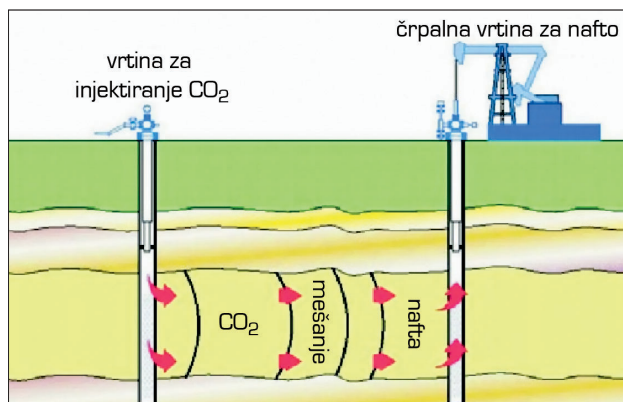
v tem primeru lahko z vtiskanjem CO₂ pridobijo dodatne količine zemeljskega plina, ne da bi pri tem prišlo do njegovega onesnaženja.

Skladiščenje v slanah vodonosnikih

Ocenjujejo, da so vodonosniki s slano vodo največji potencial za geološko skladiščenje CO₂ na svetu. Če v porozno in prepustno plast, v katerih je slana voda, injiciramo CO₂, se bo del tega raztopil v slani vodi in razširil v vodonosniku, del pa bo reagiral s kamnino in ostal tam trajno vezan. Najprimernejši so vodonosniki v globini, večji kot 800 m, ker je pri pritisku v teh globinah CO₂ utekočinjen in lahko tako uskladiščimo večjo količino.

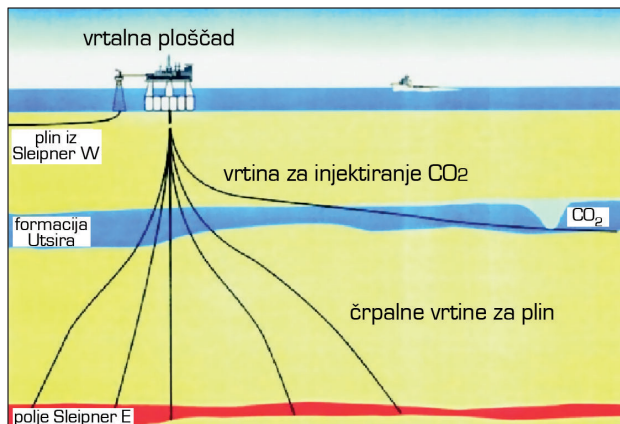
Že od leta 1994 skladiščijo kisle pline (CO₂ in H₂S), ki izhajajo pri predelavi zemeljskega plina v slanah vodonosnikih v globini med 1400 in 2900 m v Alberti (Kanada). V Evropi pa poteka od leta 1996 največji komercialni projekt v norveškem delu Severnega morja v plinskem polju Sleipner (slika 3). Zemeljski plin, ki ga črpajo tu, vsebuje kar 9 % CO₂. Ta delež morajo zmanjšati na 2,5 %, preden se plin lahko uporabi. Ločevanje plina poteka na samem sistemu vrtnih ploščadi (slika 4), CO₂ pa injicirajo v vodonosno plast geološke formacije Utsira, ki je 800 m pod dnom morja (Statoil, 2005). Gre za prelomen projekt, ker skladiščenje še nikoli prej ni potekalo v takem obsegu in dokazuje zmožnost tehnologije za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov. Prvič tudi poteka celoten proces na odprtem morju na samih vrtnih ploščadih.

Zelo pomemben del vsakega geološkega skladiščenja CO₂ je opazovanje njegovega širjenja v vodonosniku. Pri tem uporabljajo refleksijsko seizmično profiliranje, ki je tudi sicer najpomembnejša geofizikalna metoda za iskanje nahajališč nafte in plina. S ponovitvijo meritev po injiciranju dveh milijonov ton CO₂ na polju Sleipner so lepo videli, do kam se je razširil vtisnjen CO₂ (slika 5). Ker nad



Slika 2. Shematski prikaz vtiskanja CO₂ v naftonosno plast ob sočasnem povečanju količine izkoriščene nafte

Figure 2. Schematic diagram of CO₂ injection in oil bearing layer with simultaneous enhanced oil recovery.

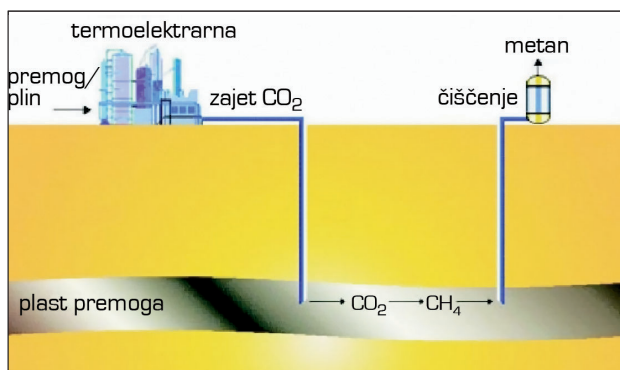


Slika 3. Vtiskanje CO₂ v slan vodonosnik na plinskem polju Sleipner v Severnem morju

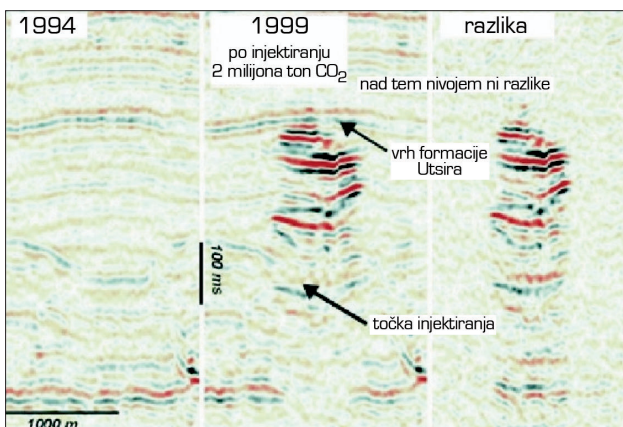
Figure 3. CO₂ injection into salt-water aquifer at Sleipner gas field.



Slika 4. Sistem ploščadi na plinskem polju Sleipner
Figure 4. System of platforms at Sleipner gas field.



Slika 6. Shematski prikaz vtiskanja CO₂ v premogovo plast ob sočasnem pridobivanju metana
Figure 6. Schematic diagram of CO₂ injection in coal layer with simultaneous methane production.



Slika 5. Refleksijska seizmična profila, izmerjena pred injiciranjem CO₂ na polju Sleipner in po njem ter razlika med njima
Figure 5. Seismic reflection profiles recorded before and after CO₂ injection at Sleipner field and the difference between them.

formacijo Utsira ni vidnih nobenih razlik, te meritve tudi dokazujejo, da ni prišlo do večjega uhajanja plina iz skladiščne plasti. Tesnost krovnih plasti pa dokazujejo tudi s pomočjo opazovalnih vrtin.

Drug večji evropski projekt poteka na lokaciji Ketzin pri Berlinu, kjer so predtem 40 let skladiščili zemeljski plin v vodonosniku, ki je 500 m globoko, potem pa so iz ekonomskih razlogov skladiščenje opustili (GeoForschungsZentrum, 2005). Ker obstaja za to lokacijo veliko podatkov in vrtin in ker je bila tesnost krovinskih plasti dokazana med skladiščenjem plina, potekajo zdaj tam intenzivne raziskave za poskusno skladiščenje CO₂.

Skladiščenje v plasteh premoga

V naravi vsebujejo plasti premoga pline, kot je metan. Njihova količina je odvisna od starosti premoga, globine in njegove geološke zgodovine in lahko znaša do 25 m³ na tono premoga. Ker je metan iz premoga običajno

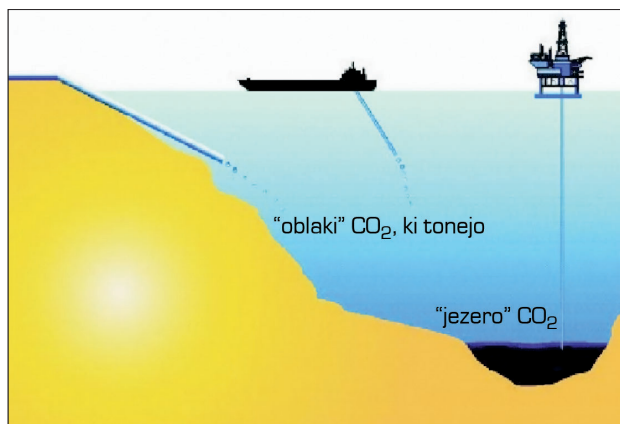
zelo čist (> 90 %), ga lahko neposredno uporabimo. Če v premogovo plast skozi injekcijsko vrtino vtiskajo CO₂, bo iztisnil iz nje metan, ki ga zajamejo s produkcijsko vrtino (slika 6). Seveda to naredijo le v plasteh premoga, ki jih ne nameravajo odkopavati. To pa so plasti, ki ležijo pregloboko ali pa so ocenjene zaloge premajhne. Laboratorijske raziskave so pokazale, da lahko z injiciranjem CO₂ v premogovo plast izkoristimo kar 90 % ali celo več metana iz nje. Količina CO₂, ki jo pri tem lahko uskladiščimo v premogovo plast, pa je vsaj dvakrat večja od količine pridobljenega metana (Davidson in sod., 2001).

V zadnjih dvajsetih letih so že razvili tehnologijo, ki omogoča pridobivanje metana iz premogovih plasti, ki ležijo pregloboko, da bi jih bilo mogoče gospodarno izkopati. V ZDA proizvedejo iz takih plasti že več kot 28 milijonov m³ metana letno, kar je 5 % vse proizvodnje plina.

Skladiščenje v oceanih

Zamisel skladiščenja CO₂ v oceanih še ni tako tehnološko razvita kot obravnavani geološki načini skladiščenja. Predlagajo pa štiri različne načine (slika 7):

- disperzijo CO₂ v zelo razredčeni obliki v globinah med 1000 in 2000 m,



Slika 7. Različne zamisli za skladiščenje CO₂ v oceanih
Figure 7. Various concepts for storage of CO₂ in oceans

- izpust CO₂ v depresijo v oceanskem dnu na globini okoli 3000 m, kjer nastane "jezero" CO₂,
- oblikovanje "oblaka" CO₂, ki tone v globino in s seboj potegne večino izpuščene količine,
- "odlaganje" CO₂ v trdnem stanju na oceanskem dnu.

Kratkoročno je videti prvi način najobetavnejši. Transport CO₂ bi potekal s tankerji ali s plinovodom. Predtem bo seveda treba rešiti mnogo tehnoloških vprašanj in raziskati vse mogoče vplive na okolje, ki se jih morda še ne zavedamo.

Možnosti za geološko skladiščenje CO₂ v Sloveniji

Tudi v Sloveniji smo začeli razmišljati o tej privlačni možnosti za zmanjšanje emisij CO₂, saj analiza virov in ponorov toplogrednih plinov (MOP, 2002; Seljak in Paradiž, 2001) kaže, da bo izpolnitev obveze Kjotskega sporazuma zelo težka naloga. Geoinženiring je tako sodeloval pri uspešni prijavi projekta šestega okvirnega programa EU, katerega cilj je oceniti potencial za geološko skladiščenje CO₂ v vzhodni in južni Evropi. Triletni projekt, ki ga usklajuje danski geološki zavod, se bo začel izvajati v jeseni 2005. Raziskave potekajo tudi v okviru Premogovnika Velenje, kar je razumljivo, saj je Termoelektrarna Šoštanj kot največji energetski objekt v Sloveniji, ki uporablja fosilna goriva, največji točkovni vir emisij CO₂ v Sloveniji. V letu 1995 je znašala emisija CO₂ iz TE Šoštanj 3.582.000 t, iz TE Trbovlje 704.000 t in iz TE Toplarna Ljubljana 814.000 t (Velkavrh, 1998).

Sicer so v Sloveniji v letih med 1980 in 1995 potekale dokaj intenzivne raziskave, da bi našli ustrezno lokacijo za podzemno skladiščenje zemeljskega plina v vodonosnikih (Sadnikar, 1993). Na podlagi geofizikalnih raziskav (Gosar, 1995) sta bili kot najprimernejši izbrani dve lokaciji v Prekmurju, kjer so izvrtali tudi dve raziskovalni vrtni. Pozneje se investitor iz ekonomskih razlogov ni odločil za nadaljevanje projekta. Podatki, zbrani v teh raziskavah, pa bi bili lahko koristni tudi pri oceni možnosti za geološko skladiščene CO₂ v vodonosnikih. Ta način skladiščenja je za Slovenijo verjetno najprimernejši, saj je proizvodnja nafte in plina zelo majhna. Tudi nekatere druge značilnosti opuščanih naftnih in plinskih polj v Murski depresiji, kot so debelina in globina poroznih plasti ter možne prostornine skladiščenja, so se pri ocenah možnosti za morebitno podzemno skladiščenje zemeljskega plina v njih izkazale za neprimerne. Drug možen način skladiščenja, ki pa ga je prav tako treba še ovrednotiti, pa je v plasteh premoga ali na območjih opuščenega izkoriščanja premoga. Seveda pa je v vsakem primeru eno od odločilnih meril pri iskanju morebitne lokacije geološkega skladiščenja CO₂ bližina vira emisij.

Sklepne misli

Geološko skladiščenje CO₂ postaja resna možnost za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, ker kljub sprejetju Kjotskega sporazuma postaja vse bolj jasno, da veliko državam ne bo uspelo samo s prestrukturiranjem proizvodnje električne energije in zmanjšanjem porabe fosilnih goriv uresničiti zastavljenega zmanjšanja emisij. Številni projekti, ki potekajo predvsem v Severni Ameriki in Evropi (šesti okvirni raziskovalni program EU), bodo predvidoma v petih do desetih letih odgovorili, ali so raziskovalci in tehnologi našli ustrezne rešitve za ločevanje in zajetje CO₂ iz dimnih plinov ter za njegovo varno in trajno geološko skladiščenje ob še sprejemljivih stroških. Ker so raziskave nekaterih alternativnih virov za pridobivanje električne energije, kot je jedrska fuzija, še dlje od njihove morebitne komercialne izvedbe in povezane z mnogimi odprtimi vprašanji in bo torej človeštvo še dolgo odvisno od fosilnih goriv, gre za zelo pomembne projekte, ki bodo imeli odločilno vlogo pri našem nadaljnjem razvoju. Podnebne spremembe zaradi učinka tople grede pa so že danes tako velike, da zahtevajo takojšnje ukrepanje.

Viri in literatura

1. Davidson, J., Freund, P., Smith, A., 2001. Putting carbon back into the ground. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 28 str.
2. GeoForschungsZentrum 2005. CO₂SINK project Ketzin. <http://www.co2sink.org/>
3. Gosar, A., 1995. Modeliranje refleksijskih seizmičnih podatkov za podzemno skladiščenje plina v strukturah Pečarovci in Dankovci – Murska depresija. *Geologija*, 37–38, 483–549.
4. Herzog, H., Eliasson, B., Kaarstad, O., 2000. Capturing Greenhouse Gases, *Scientific American*, Feb. 2000, 54–61.
5. MOP, 2002. Poročilo o stanju okolja 2002. http://www.gov.si/mop/podrocja/uradzaokolje_sektorokolje/porocila/stanje_okolja.htm
6. Sadnikar, J., 1993. Raziskave za podzemno skladiščenje plina v Sloveniji. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 49/1–2, 149–167.
7. Seljak, J., Paradiž, B., 2001. IPCC evidenca toplogrednih plinov za Slovenijo 1985–1996. MOP, 348 str.
8. Statoil 2005. CO₂ storage 1000 m down. <http://www.statoil.com/statoilcom/svg00990.nsf/web/sleipneren?opendocument>
9. Stevens, S., Gale, J., 2000. *Geologic CO₂ Sequestration*. *Oil and Gas Journal*, May 2000, 40–44.
10. US Department of Energy 2005: *Carbon Sequestration*. <http://cdiac2.esd.ornl.gov/>
11. Velkavrh, A. (ur.), 1998. *Okolje v Sloveniji 1996*. MOP, 300 str.