

# Ekološke prednosti, rizici i monitoring utiskivanja CO2 u podzemlje

---

**Majić, Matej**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:940680>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-21**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO GEOLOŠKO NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**EKOLOŠKE PREDNOSTI, RIZICI I MONITORING UTISKIVANJA CO<sub>2</sub> U  
PODZEMLJE**

Diplomski rad

Matej Majić

N193

Zagreb, 2017.

EKOLOŠKE PREDNOSTI, RIZICI I MONITORING UTISKIVANJA CO<sub>2</sub> U  
PODZEMLJE

MATEJ MAJIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Utiskivanje ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) u podzemlje odvija se u svrhu njegova trajnog skladištenja ili u svrhu povećanja iscrpka ugljikovodika. Pri tome je važno spriječiti njegovu migraciju iz utisne formacije prema podzemnim vodama i eventualno na površinu. Osim ekoloških prednosti skladištenja CO<sub>2</sub> u podzemlje postoje i mnogi potencijalni rizici koji prvenstveno proizlaze iz istjecanja CO<sub>2</sub> iz ležišta u koje je pohranjen. Kako bi se ti rizici sveli na minimum, potrebna je precizna procjena i analiza rizika i kvalitetan plan praćenja stanja okoliša (monitoring). U ovom radu opisani su procesi kaptiranja i geološkog skladištenja CO<sub>2</sub>, mogući rizici vezani uz to i metode njihove procjene, raspoložive metode monitoringa migracije CO<sub>2</sub> te je dan primjer monitoringa utiskivanja CO<sub>2</sub> u okviru pilot projekta Lacq u Francuskoj.

Ključne riječi: CO<sub>2</sub>, skladištenje, CCS, rizik, monitoring, okoliš

Diplomski rad sadrži: 56 stranica, 5 tablica, 26 slika i 38 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF

Pomoć pri izradi: Dr.sc. Karolina Novak Mavar

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF  
2. Dr. sc. Lidia Hrnčević, izvanredna profesorica RGNF  
3. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF

Datum obrane: 23. veljače 2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

ECOLOGICAL BENEFITS, RISKS AND MONITORING OF CO<sub>2</sub> UNDERGROUND  
STORAGE

MATEJ MAJIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Department of Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

The underground injection of CO<sub>2</sub> is carried out for the purpose of its permanent storage or enhanced hydrocarbon recovery. It is important to prevent the migration of the injected CO<sub>2</sub> from the reservoir to the groundwater or possibly to the surface. In addition to environmental benefits, there are many potential risks, primarily resulting from the leakage of CO<sub>2</sub> from the reservoir. Minimizing these risks requires precise risk assessment and analysis as well as a high-quality monitoring plan. This thesis describes the processes of capture and geological storage of CO<sub>2</sub>, potential risks and their assessment, available methods for monitoring CO<sub>2</sub> migration and sample monitoring of CO<sub>2</sub> injection in the pilot project in Lacq, France.

Key words: CO<sub>2</sub>, storage, CCS, risk, monitoring, environment

Thesis contains: 56 pages, 5 tables, 26 pictures and 38 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Reviewers: 1. Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD  
2. Associate Professor Lidia Hrnčević, PhD  
3. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: February 23<sup>rd</sup> 2017., Faculty of Mining, Geology and Petroleum  
Engineering, University of Zagreb

# SADRŽAJ

POPIS TABLICA.....	I
POPIS SLIKA .....	II
1. UVOD.....	1
2. KAPTIRANJE I GEOLOŠKO SKLADIŠTENJE CO <sub>2</sub> .....	5
2.1. PROCESI KAPTIRANJA I GEOLOŠKOG SKLADIŠTENJA .....	10
2.1.1. KAPTIRANJE.....	12
2.1.2. TRANSPORT.....	16
2.1.3. SKLADIŠTENJE .....	17
3. PROCJENA RIZIKA UTISKIVANJA I GEOLOŠKOG SKLADIŠTENJA CO <sub>2</sub> .....	19
3.1. GLAVNI RIZIK ZA OKOLIŠ – ISTJECANJE CO <sub>2</sub> .....	22
3.1.1. LOKALNI UTJECAJ ISTJECANJA CO <sub>2</sub> NA ZDRAVLJE I OKOLIŠ .....	24
3.2. RIZICI POVEZANI S RANIJIM FAZAMA SKLADIŠTENJA .....	25
3.3. RIZICI POVEZANI SA SKLADIŠTENJEM .....	27
3.4. RAZVOJ METODA ZA PROCJENU RIZIKA .....	30
4. PRAĆENJE STANJA OKOLIŠA - MONITORING.....	37
4.1. PRIMJER MONITORINGA – LACQ, FRANCUSKA .....	46
4.1.1. PROGRAM MONITORINGA.....	48
5. ZAKLJUČAK.....	51
6. LITERATURA.....	52

## **POPIS TABLICA**

Tablica 3-1. Tablica opasnosti istjecanja CO <sub>2</sub> .....	29
Tablica 3-2. Mjere ublažavanja/sanacije povezane sa tipičnim scenarijima rizika CCS-a .	35
Tablica 4-1. Različite metode monitoringa i njihove primjene na projekte skladištenja CO <sub>2</sub> .....	41
Tablica 4-2. Metode nadzora koje se primjenjuju na velikim CCS projektima .....	44
Tablica 4-3. Godišnji plan monitoringa na pilot projektu Lacq .....	50

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1-1.</b> Koncentracije CO <sub>2</sub> izmjerene na mjernoj stanici Manua Loa .....	3
<b>Slika 2-1.</b> Fazni dijagram CO <sub>2</sub> .....	6
<b>Slika 2-2.</b> Promjena volumena CO <sub>2</sub> na različitim dubinama .....	7
<b>Slika 2-3.</b> Mehanizmi uzamčivanja CO <sub>2</sub> .....	8
<b>Slika 2-4.</b> Mogućnosti geološkog skladištenja CO <sub>2</sub> .....	10
<b>Slika 2-5.</b> Potencijalni izvori emisija tijekom procesa hvatanja i trajnog zbrinjavanja CO <sub>2</sub> iz termoelektrane .....	12
<b>Slika 2-6.</b> Pregled procesa i sustava za hvatanje CO <sub>2</sub> .....	13
<b>Slika 2-7.</b> Izdvajanje CO <sub>2</sub> nakon izgaranja goriva .....	14
<b>Slika 2-8.</b> Kaptiranje CO <sub>2</sub> prije izgaranja goriva .....	15
<b>Slika 2-9.</b> Mogućnosti geološkog skladištenja CO <sub>2</sub> .....	18
<b>Slika 3-1.</b> Shematski prikaz razina rizika klasificiranih prema vjerojatnosti incidenta i njegovim posljedicama .....	19
<b>Slika 3-2.</b> Upravljanje rizikom temeljeno na projektu skladištenja CO <sub>2</sub> .....	21
<b>Slika 3-3.</b> Uzroci, rizici i posljedice geomehaničkih problema u potpuno cementiranim bušotinama.....	26
<b>Slika 3-4.</b> Uzroci, rizici i posljedice geomehaničkih problema u djelomično cementiranim bušotinama.....	26
<b>Slika 3-5.</b> Mogući putevi migracije (a) aktivnoj i (b) napuštenoj bušotini .....	28
<b>Slika 3-6.</b> Bayesova mreža za analizu rizika utiskivanja CO <sub>2</sub> .....	31
<b>Slika 3-7.</b> Ciklički proces procjene i upravljanja rizikom tijekom životnog ciklusa projekta skladištenja CO <sub>2</sub> .....	32
<b>Slika 3-8.</b> „Mašna“ model upravljanja rizicima prema CO <sub>2</sub> QUALSTORE-u.....	33
<b>Slika 3-9.</b> Trokut smanjenja rizika prema CO <sub>2</sub> QUALSTORE-u .....	34
<b>Slika 4-1.</b> Opća metodologija za analizu integriteta bušotine.....	39
<b>Slika 4-2.</b> Metode za praćenje raznih komponenti sustava skladištenja CO <sub>2</sub> .....	39
<b>Slika 4-3.</b> Pojednostavljeni prikaz projekta skladištenja CO <sub>2</sub> Sleipner .....	43
<b>Slika 4-4.</b> Vertikalni presjek lokacije Sleipner u Norveškoj.....	43
<b>Slika 4-5.</b> Generički tijek procesa za procjenu, monitoring i verifikaciju projekta skladištenja CO <sub>2</sub> preuzet iz CO <sub>2</sub> ReMoVe projekta .....	45
<b>Slika 4-6.</b> Grafički prikaz CCS projekta Lacq .....	47

**Slika 4-7.** Grafički prikaz sustava monitoringa na CCS pilot projektu Lacq ..... 49



# 1. UVOD

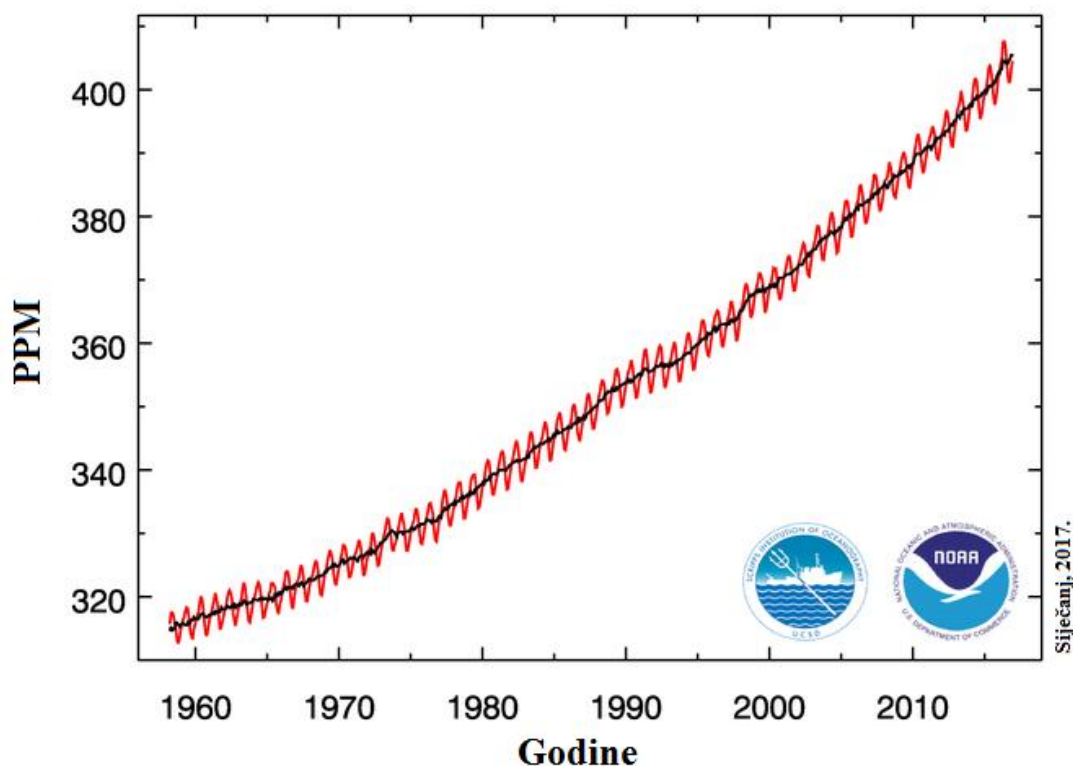
Iz godine u godinu čovječanstvo se sve više suočava sa posljedicama svojeg utjecaja na okoliš i klimatske promjene. Neki od pokazatelja klimatskih promjena su ekstremne pojave poput velikih poplava, požara, orkanskih nevremena, tsunamija, uragana i snježnih mećava, koje su sve češća pojava u zadnjih tridesetak godina. Vrlo je vjerojatno da će čovječanstvo ubuduće biti izloženo sve većem riziku od ovakvih pojava.

Iako su tijekom geološke prošlosti klimatski uvjeti na Zemlji bili podložni promjenama, većina znanstvenika je složna da su današnje klimatske promjene upravo posljedica antropogenog utjecaja. Utjecaj čovjekovih aktivnosti na klimatske promjene dugo vremena je bio zanemarivan i tek je 1990. godine Prvim izvješćem Međuvladinog tijela o klimatskim promjenama (engl. *International Panel On Climate Change, IPCC*) postignut globalni konsenzus o utjecaju čovjeka na klimu. Osnovni zaključci ovog izvješća bili su da postoji učinak staklenika i da emisije koje nastaju djelovanjem čovjeka značajno povećavaju koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi. Učinak staklenika je pojava zagrijavanja Zemlje apsorpcijom, od Zemljine površine reflektiranog, infracrvenog Sunčevog zračenja u atmosferi, a intenziviraju ga staklenički plinovi odnosno sve plinovite tvari u atmosferi koje imaju sposobnost apsorpcije infracrvenog zračenja reflektiranog od Zemljine površine (Hrnčević, 2014; <https://hr.wikipedia.org>). Učinak staklenika dovodi do postupnog globalnog povećanja prosječne temperature Zemljine površine i najnižih dijelova atmosfere. To globalno povećanje temperature, koje je zahvatilo Zemlju od sredine 19. st. do danas naziva se „globalno zatopljenje“. Iako je Zemlja i u prošlosti prolazila kroz toplija i hladnija razdoblja smatra se da današnje globalno zatopljenje nastaje zbog povećanih emisija stakleničkih plinova, a prema istraživanjima IPCC-a postoji 90 %-tna vjerojatnost da je glavni uzrok tome ljudska aktivnost. Procjenjuje se da će globalno povećanje prosječne temperature na Zemlji do 2100. godine biti između 1,4 °C i 5,8 °C ukoliko ispuštanje stakleničkih plinova nastavi rasti dosadašnjim tempom. To bi dovelo do velikih, i za neke dijelove čovječanstva, katastrofalnih posljedica (Hrnčević, 2014; <https://hr.wikipedia.org>).

Razvojem industrije, povećanjem broja stanovnika i povećanjem potrošnje energije zadnjih 70-tak godina u atmosferi je sve veća koncentracija stakleničkih plinova koji se ispuštaju u atmosferu kao posljedica ljudskog djelovanja (antropogeni staklenički plinovi). Najznačajniji antropogeni staklenički plinovi su ugljik-dioksid (CO<sub>2</sub>), ozon (O<sub>3</sub>), metan

(CH<sub>4</sub>), didušikov oksid (N<sub>2</sub>O), klorofluorougljici (CFC), hidrofluorougljici (HFC), perfluorougljici (PFC) i sumpor-heksafluorid (SF<sub>6</sub>) (Hrnčević, 2008). CO<sub>2</sub>, kao glavni staklenički plin, ima značajan utjecaj na globalne klimatske promjene. Oko 75% antropogenih izvora CO<sub>2</sub> u posljednjih 30 godina rezultat je izgaranja fosilnih goriva. Drugi veliki izvor emisija CO<sub>2</sub> je uništavanje šumske vegetacije, čime se smanjuje površina glavnog ponora CO<sub>2</sub>, budući da šume procesom fotosinteze uklanjaju najveći dio CO<sub>2</sub> iz atmosfere. U današnje vrijeme, veliki problem predstavljaju šumski požari koji su zbog globalnog zatopljenja sve češća pojava. Šumski požari imaju dvostruki negativan utjecaj zbog toga što predstavljaju sve značajniji izvor CO<sub>2</sub> i u isto vrijeme uništavaju veliku površinu ponora CO<sub>2</sub>. Polovica antropogenih emisija CO<sub>2</sub> odlazi u atmosferu, a druga polovica se otopi morima ili se apsorbira u ekosustavu.

Prije industrijske revolucije, sredinom 18. st., koncentracija CO<sub>2</sub> u atmosferi iznosila je oko 280 ppm, dok današnje koncentracije prelaze 400 ppm. Najčešće korištena metoda za određivanje koncentracija CO<sub>2</sub> iz vremena prije početka instrumentalnog mjerenja temelji se na uzorkovanju jezgri leda u polarnim područjima i mjerenju koncentracija CO<sub>2</sub> u mjehurićima zraka sadržanim u ledu. Tim mjerenjima određena je i koncentracija CO<sub>2</sub> prije industrijske revolucije. Najduže instrumentalno mjerenje koncentracija CO<sub>2</sub> provodi se na vulkanu Manua Loa koji se nalazi na Havajskom otočju. Mjerenje je započeto 1957. godine, kada su koncentracije CO<sub>2</sub> iznosile 315,98 ppm. Prema dostupnim podacima koncentracije CO<sub>2</sub> u siječnju ove godine iznosile su 406,20 ppm, dok su koncentracije u siječnju prošle godine iznosile 403,84 ppm (<https://www.esrl.noaa.gov>, 2017). Za usporedbu, koncentracije CO<sub>2</sub> od prije 10 godina, dakle u siječnju 2007. iznosile su 383,61 ppm. Na slici 1-1. prikazani su rezultati instrumentalnog mjerenja koncentracija CO<sub>2</sub> na Manua Loi od početka mjerenja do danas (tzv. Keelingova krivulja).



**Slika 1-1.** Koncentracije CO<sub>2</sub> izmjerene na mjernoj stanici Manua Loa

(<https://www.esrl.noaa.gov>)

Osim sve većih koncentracija CO<sub>2</sub>, posebice zabrinjava i godišnja stopa njenog rasta, koja za prošlu godinu iznosi 2,77 ppm (<https://www.esrl.noaa.gov>).

Većina znanstvenika se slaže u stavu da bi sadašnje ukupne emisije CO<sub>2</sub> u svijetu trebalo smanjiti za više od 50% kako bi se stabilizirala njegova koncentracija u atmosferi i ublažile posljedice klimatskih promjena (Goričnik et al., 2007). Budući da su koncentracije CO<sub>2</sub> na alarmantno visokoj razini, osim raznih mjera smanjenja emisija, potrebne su i metode njegovog uklanjanja iz atmosfere kako koncentracija ne bi dosegla razinu od 450 ppm koju znanstvenici smatraju kritičnom, jer iznad te razine možda više neće biti moguće spriječiti najdrastičnije posljedice. Zbog niza prepreka, kao što su infrastruktura, tehnologija i cijena, teško je vjerovati da će obnovljivi izvori energije, kao što su energija vjetra i sunca, u skoroj budućnosti zamijeniti fosilna goriva. Zbog toga je potrebno korištenje prijelaznih metoda za smanjenje koncentracija CO<sub>2</sub> u atmosferi, čime bi se osiguralo dovoljno vremena za prelazak na obnovljive izvore energije. Jedna od najpogodnijih opcija je primjena tehnologije kaptiranja i geološkog skladištenja CO<sub>2</sub> (engl. *Carbon Capture and Storage, CCS*). CCS tehnologija obuhvaća procese hvatanja emitiranog CO<sub>2</sub> na stacionarnim izvorima, njegov transport i trajno zbrinjavanje u pogodne geološke

formacije.

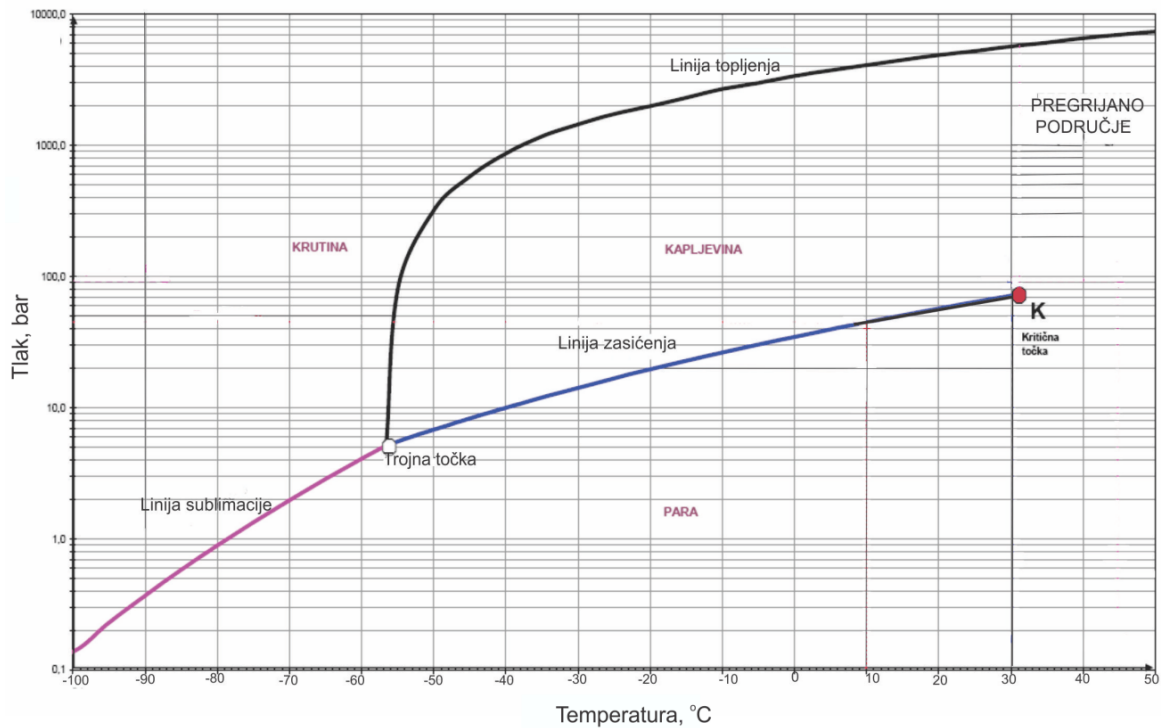
Prijašnja svrha utiskivanja CO<sub>2</sub> u podzemlje bila je isključivo u svrhu tercijarnih metoda pridobivanja nafte i plina. Tercijarne metode, odnosno metode povećanja iscrpka nafte (engl. *Enhanced Oil Recovery, EOR*) i plina (engl. *Enhanced Gas Recovery, EGR*) u primjeni su već nekoliko desetljeća. U Hrvatskoj EOR projekte provodi naftna kompanija, INA d.d. od 2014. godine na proizvodnim poljima Ivanić i Žutica. Znanja stečena u EOR i EGR projektima uvelike doprinose u razumijevanju i provođenju projekata kaptiranja i geološkog skladištenja CO<sub>2</sub>.

U ovom diplomskom radu pobliže su opisani procesi kaptiranja i geološkog skladištenja CO<sub>2</sub>, potencijalni rizici vezani uz isto te načini i svrha praćenja stanja okoliša (monitoringa) prilikom navedenih aktivnosti.

## 2. KAPTIRANJE I GEOLOŠKO SKLADIŠTENJE CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub> se može izdvojiti iz dimnih plinova na velikim stacionarnim izvorima i sigurno uskladištiti u podzemne duboke geološke formacije te na taj način bitno smanjiti emisije CO<sub>2</sub> u atmosferu i njihov utjecaj na klimatske promjene. Ideja o skladištenju CO<sub>2</sub> u podzemlje se temelji na prirodnoj pojavi, jer diljem svijeta već postoje prirodne podzemne akumulacije CO<sub>2</sub> koji je u tim ležištima zadržan već tisućama i milijunima godina. CCS se sastoji od hvatanja CO<sub>2</sub> iz elektrana i/ili emisijski intenzivnih industrija kao što su rafinerije, cementare, željezare i čeličane, zatim transporta tog CO<sub>2</sub> na lokaciju za utiskivanje i na kraju njegovo utiskivanje u pogodne podzemne geološke formacije u svrhu trajnog zbrinjavanja. Smatra se jednom od srednjoročnih „tehnologija premošćenja“ (engl. *bridging technology*) u portfelju dostupnih postupaka za stabiliziranje koncentracija atmosferskog CO<sub>2</sub>. Pri razvoju novih tehnologija postoji razdoblje tzv. „dolina smrti“ (engl. *valley of death*) kada je tehnologija dokazana u laboratoriju, ali još se treba pokazati komercijalno izvedivom. CCS tehnologija je brzo napredovala od konceptualne do ključne tehnologije u planovima ublažavanja klimatskih promjena zbog dobrih rezultata dobivenih iz pilot projekata, gdje su se utiskivale male količine CO<sub>2</sub> u istraživačke svrhe. Uz navedeno, veliki utjecaj je imalo i veliko iskustvo prikupljeno iz projekata utiskivanja CO<sub>2</sub> u svrhu EOR-a u zadnjih 40 godina (EEA, 2011).

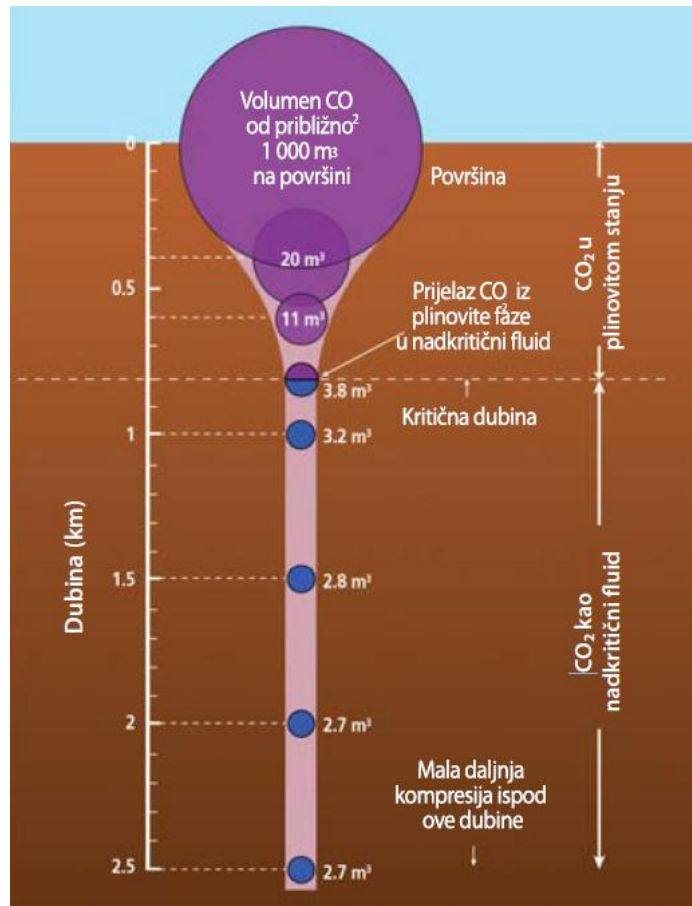
CO<sub>2</sub> se ovisno o tlaku i temperaturi u podzemlje utiskuje kao superkritičan fluid (engl. *supercritical fluid*) koji ima manju gustoću od slojne vode. Superkritični fluidi zauzimaju značajno manji prostor od plinova i difundiraju bolje od plinova i uobičajenih kapljevina kroz porne prostore u stijeni. Superkritično stanje postiže se stlačivanjem i zagrijavanjem CO<sub>2</sub> iznad kritične točke, određene tlakom 73,9 bar i temperaturom 31,1°C, što je prikazano u faznom dijagramu na slici 2-1.



**Slika 2-1.** Fazni dijagram CO<sub>2</sub> (Novosel, 2009)

Slojevi dublji od 800 metara osiguravaju zadržavanje utisnutog CO<sub>2</sub> u superkritičnom stanju, ali se iz sigurnosnih razloga utiskivanja planiraju na dubinama većim od 1000 metara, dok se ekonomskom granicom smatra dubina od 2500 metara jer s porastom dubine raste i količina energije potrebne za utiskivanje (Gaurina-Međimurec, 2015).

Na slici 2-2. prikazano je drastično smanjenje volumena CO<sub>2</sub> sa 1000 m<sup>3</sup> na površini do 2,7 m<sup>3</sup> na dubini od 2 km.



**Slika 2-2.** Promjena volumena CO<sub>2</sub> na različitim dubinama (Saftić et al., 2011)

Postoje 4 mehanizma uzamčivanja CO<sub>2</sub>:

1. strukturno/stratigrafsko uzamčivanje,
2. residualno uzamčivanje,
3. uzamčivanje otapanjem,
4. mineralno uzamčivanje.

Nakon što se superkritični CO<sub>2</sub> utisne u ležište, koje je u većini slučajeva već ispunjeno slojnom vodom on se, budući da je „lakši“ od slojne vode, počinje uzdizati prema višim dijelovima utisne formacije, dok njegovo daljnje uzdizanje ne spriječi nepropusna krovina. Nastanak nepropusne krovine zbog litoloških promjena predstavlja slučaj stratigrafskog uzamčivanja (engl. *stratigraphic trapping*), a strukturno uzamčivanje (engl. *structural trapping*) je posljedica nastanka nepropusne krovine usljed strukturnih promjena (npr. rasjedanja). Migracijom CO<sub>2</sub> jedan dio ostaje zarobljen u porama zbog površinske napetosti i kapilarnih tlakova, što se naziva rezidualnim uzamčivanjem (engl. *residual*

*trapping*). Mali dio CO<sub>2</sub> se otopa u slojnoj vodi koja ispunjava porni prostor ležišta. Ovaj mehanizam zadržavanja naziva se uzamčivanje otapanjem (engl. *dissolution trapping*). Grube procjene na projektu Sleipner u Norveškoj pokazuju da se otprilike 15% CO<sub>2</sub> otopi nakon utiskivanja. Posljednji mehanizam uzamčivanja je mineralno uzamčivanje (engl. *mineral trapping*) i vrlo je spor, najčešće traje više od 1000 godina (IPCC, 2005; Hrnčević, 2008; Novak, 2015). Slika 2-3 prikazuje mehanizme uzamčivanja, odnosno povećanje sigurnosti s vremenom. Iz slike je vidljivo da sigurnost zadržavanja raste s vremenom, te da je najveća nesigurnost prisutna u razdoblju utiskivanja, odnosno prvih 20-40 godina.



**Slika 2-3.** Mehanizmi uzamčivanja CO<sub>2</sub> (Hrnčević, 2008.)

Veliki istraživački programi CCS-a provode se u Europi, Sjedinjenim Američkim Državama, Kanadi, Australiji i Japanu od 90-ih godina. Mnogo je znanja stečeno na prvim opsežnim demonstracijskim projektima u kojima je CO<sub>2</sub> utiskivan duboko u podzemlje tijekom nekoliko godina: Sleipner u Norveškoj (oko 1 Mt godišnje od 1996.), Weyburn u Kanadi (oko 1,8 Mt godišnje od 2000.) i In Salah u Alžiru (oko 1 Mt godišnje od 2004.) (Saftić et al., 2011).

Europska Unija je 2009. godine usvojila klimatsko-energetski paket specifičnih mjera koje bi pomogle u ostvarenju ciljeva klimatskog i energetskog paketa „20-20-20“. Ciljevi paketa „20-20-20“ koji je donesen 2008. godine su smanjenje emisija stakleničkih plinova za 20% u odnosu na 1990. godinu, postizanje 20% udjela obnovljivih izvora energije u



ukupnoj energetskej potrošnji i povećanje energetske učinkovitosti za 20% do 2020. godine.

Jedan od dijelova tog klimatsko-energetskog paketa je Direktiva 2009/31/EZ o geološkom skladištenju CO<sub>2</sub>, takozvana „Direktiva o CCS-u“. Direktivom o CCS-u uspostavljen je pravni okvir za geološko skladištenje ugljikova dioksida koje je sigurno za okoliš kako bi se pridonijelo ublažavanju promjene klime. Cilj Direktive o CCS-u je osigurati da ne postoji znatan rizik od istjecanja CO<sub>2</sub> ili štete za zdravlje ili okoliš te spriječiti sve štetne učinke na sigurnost transportne mreže ili skladišnih geoprostora. Tom Direktivom se utvrđuju zahtjevi koji obuhvaćaju cijeli vijek trajanja skladišnoga geoprostora. Ona sadržava i odredbe o komponentama hvatanja i transporta u pogledu CCS-a, iako su te aktivnosti uglavnom obuhvaćene postojećim zakonodavstvom EU-a u području zaštite okoliša, kao što je Direktiva o procjeni utjecaja na okoliš ili Direktiva o industrijskim emisijama, u vezi s izmjenama uvedenima Direktivom o CCS-u (Europska komisija, 2014; European Commission, 2011b).

Unutar Europske unije, Europska komisija je 2011. godine izradila „Plan za preobrazbu Unije u konkurentno gospodarstvo s niskom razinom ugljika do 2050. godine“ u kojem se nalazi plan Europske Unije za dugoročno smanjenje emisija stakleničkih plinova od 80 do 95% do 2050. godine u odnosu na baznu 1990. godinu. Kao i visoko korištenje obnovljivih izvora energije predviđena je i implementacija CCS tehnologija i u energetske i u industrijske sektore. Razvojem CCS tehnologije pretpostavlja se da će upravo CCS u budućnosti imati glavnu ulogu u budućoj dekarbonizaciji Europskog energetskog i industrijskog sektora, te biti ključna tehnologija za smanjenje stakleničkih plinova do 2050. na ekonomičan način (EEA, 2011.).

U prosincu 2015. godine u Parizu je održano zasjedanje Konferencije stranaka COP 21 (engl. *Conference Of Parties*) Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC), gdje je donesen takozvani Pariški sporazum o klimi. Sporazum uključuje plan djelovanja čiji je cilj ograničiti globalno zatopljenje na razini „znatno manjoj“ od 2 °C u usporedbi s predindustrijskim razinama, te su vlade postigle dogovor da će ulagati napore da se taj porast ograniči na 1,5 °C (<http://cop21.co2geonet.com>, 2015).

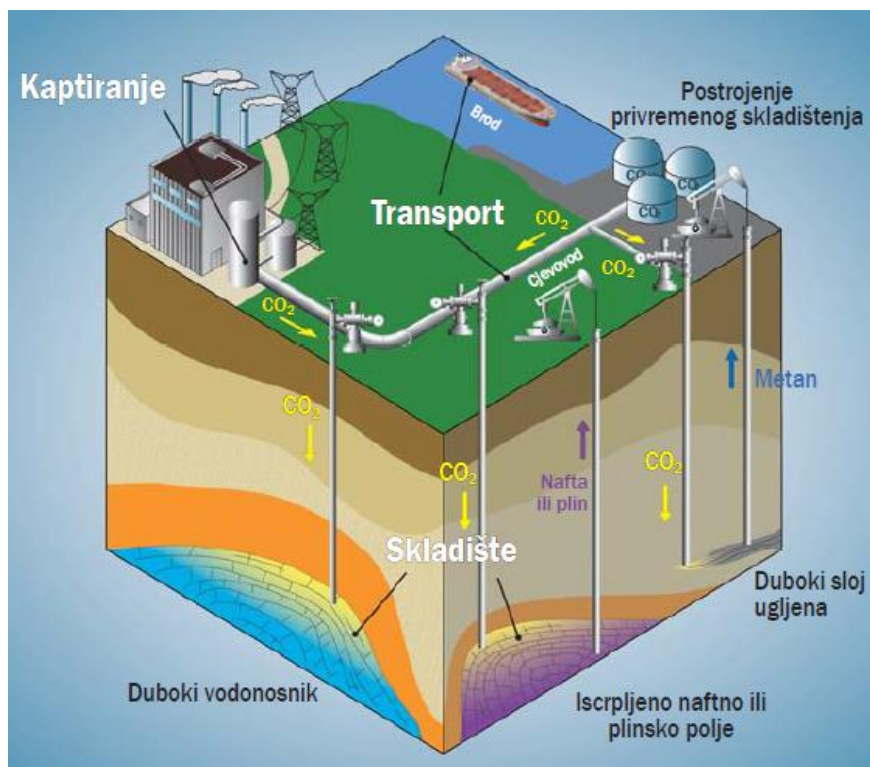
## 2.1. PROCESI KAPTIRANJA I GEOLOŠKOG SKLADIŠTENJA

CCS je termin koji obuhvaća čitav niz različitih procesa i koraka.

Tri su osnovne faze u tipičnom CCS procesu (EEA, 2011):

1. kaptiranje (hvatanje),
2. transport,
3. skladištenje.

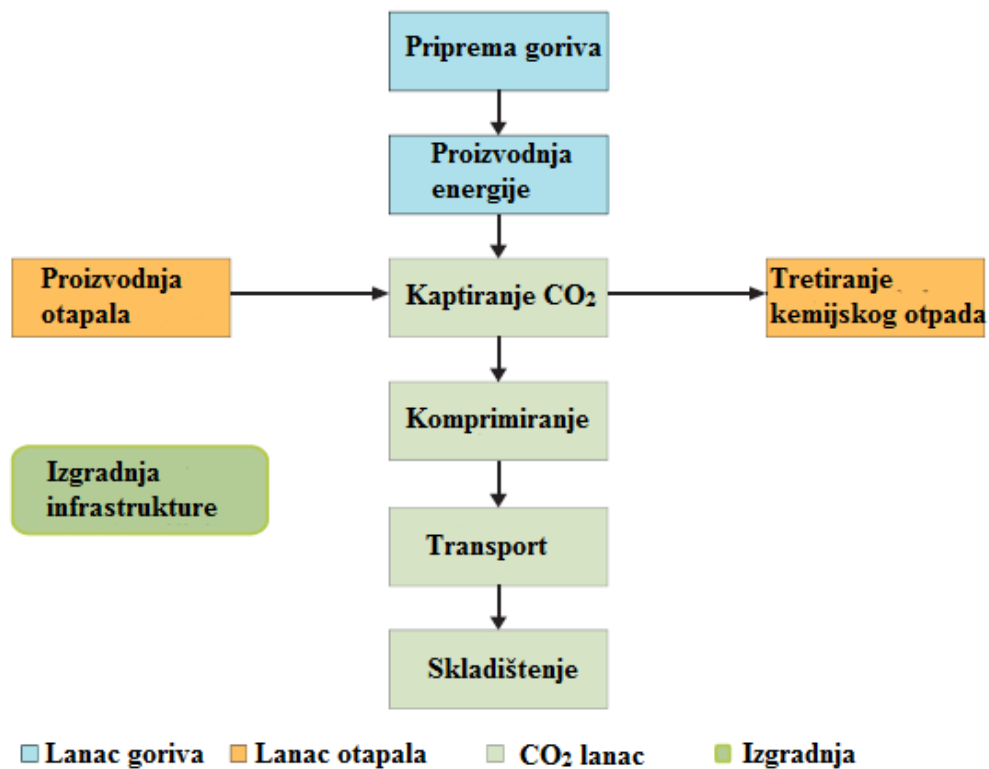
Ispušni plinovi sadrže malu količinu CO<sub>2</sub>, oko 3-15% volumena, dok se ostatak sastoji od dušika, pare i malih količina čestica i drugih onečišćujućih tvari, stoga je potrebno iz struje otpadnih plinova izdvojiti čisti CO<sub>2</sub> i pripremiti ga za transport. Faza procesa CCS koja uključuje korištenje tehnologija za separaciju i komprimiranje CO<sub>2</sub> proizvedenog u industrijskim i energetske sektorima naziva se kaptiranje (hvatanje) CO<sub>2</sub>. Faza transporta CO<sub>2</sub> obuhvaća prijenos CO<sub>2</sub> do pogodne lokacije za skladištenje, uglavnom cjevovodima (plinovodima) i brodovima. Faza skladištenja CO<sub>2</sub> se odnosi na procese njegovog sigurnog i trajnog zbrinjavanja u podzemlje. Na slici 2-4. prikazan je pojednostavljeni prikaz CCS procesa i mogućnosti geološkog skladištenja CO<sub>2</sub>.



Slika 2-4. Mogućnosti geološkog skladištenja CO<sub>2</sub> (Saftić et al., 2011)

Uvođenjem tehnologije hvatanja CO<sub>2</sub> u termoelektrane dolazi do energetske gubitaka (*engl. energy penalty*) koji variraju ovisno o tehnologiji hvatanja koja se koristi. Ti energetske gubici zahtijevaju dodatnu potrošnju goriva, što za posljedicu ima dodatne izravne i neizravne emisije. Potrebno je napomenuti da kaptiranje CO<sub>2</sub> iz termoelektrana omogućuje smanjenje samo izravnih emisija iz termoelektrana, dok se indirektna emisija CO<sub>2</sub> i ostalih onečišćivača zraka iz *upstreama* i *downstreama* CCS postrojenja uključujući i emisije tijekom transporta i skladištenja, ne mogu kaptirati. Zbog toga se pri razmatranju potencijalnog utjecaja CCS tehnologije na emisije onečišćivača zraka moraju uzeti u obzir i neizravne emisije koje se javljaju tijekom CCS procesa, a nisu na samoj lokaciji kaptiranja. Potencijalni izvori emisija tijekom procesa kaptiranja CO<sub>2</sub> na lokaciji termoelektrane, njegovog transporta i skladištenja, sa podjelom u lance goriva, CO<sub>2</sub> i otapala prikazani su na slici 2-5:

- CO<sub>2</sub> lanac obuhvaća emisije koje nastaju u tri glavna, ranije navedena CCS procesa;
- Emisije koje nastaju u procesu izgaranja goriva na CCS postrojenju, uključujući i dodatne emisije koje se pojavljuju zbog energetske gubitaka;
- Indirektna emisija koje proizlaze iz lanaca goriva i otapala:
  - a) priprema goriva, uključujući pridobivanje i transport,
  - b) proizvodnja otapala,
  - c) zbrinjavanje otpadnog otapala,
- Emisije „trećeg reda“ : a) izgradnja infrastrukture.



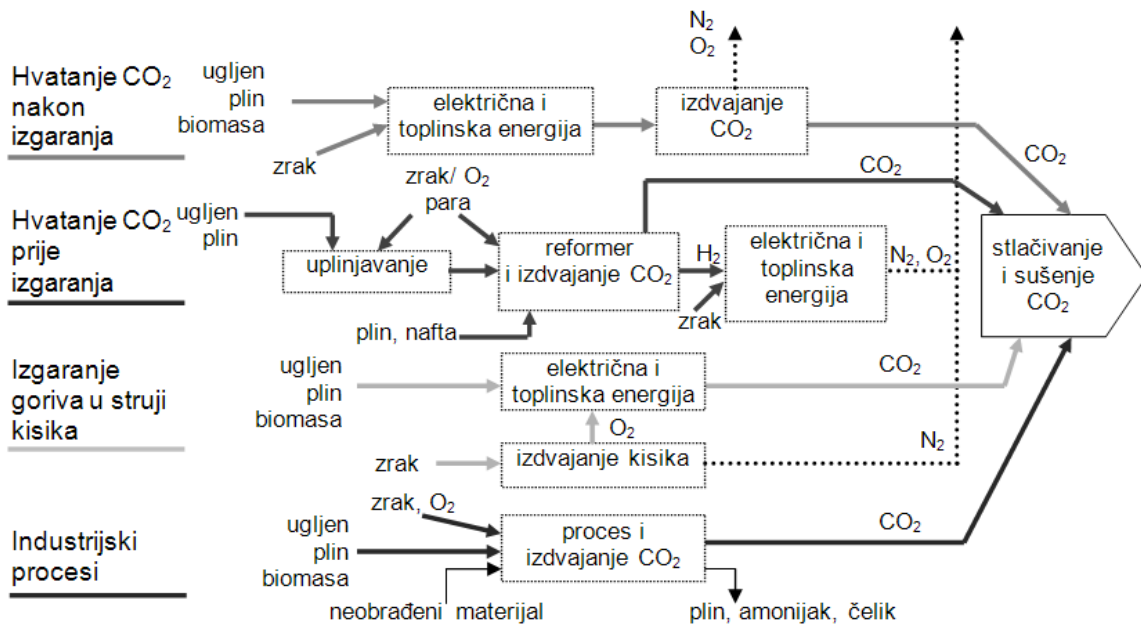
**Slika 2-5.** Potencijalni izvori emisija tijekom procesa hvatanja i trajnog zbrinjavanja CO<sub>2</sub> iz termoelektrane (EEA, 2011)

### 2.1.1. KAPTIRANJE

Tehnologije za kaptiranje CO<sub>2</sub> se mogu potencijalno primijeniti na niz različitih vrsta velikih industrijskih postrojenja, kao što su elektrane na fosilna goriva ili biomasu, rafinerije plina, postrojenja za proizvodnju etanola, petrokemijska postrojenja, postrojenja za proizvodnju vodika iz fosilnih goriva, postrojenja za proizvodnju cement, željeza, itd (IEA/UNIDO, 2011).

Postoje četiri osnovna sustava za kaptiranje CO<sub>2</sub> kod korištenja fosilnih goriva ili biomase (EEA, 2011; Haramija, 2012):

1. sustavi za kaptiranje nakon izgaranja,
2. sustavi za kaptiranje prije izgaranja,
3. sustavi za izgaranje goriva u struji kisika,
4. industrijski procesi.



**Slika 2-6.** Pregled procesa i sustava za hvatanje CO<sub>2</sub> (Haramija, 2012)

Smisao faze kaptiranja je u izdvajanju čistog CO<sub>2</sub> iz smjese CO<sub>2</sub> i ostalih plinovitih komponenti te zbog toga svi prikazani postupci zahtijevaju korak koji uključuje izdvajanje CO<sub>2</sub>, vodika ili kisika iz struje plina. Koriste se različite metode separacije: apsorpcija ili adsorpcija, membrane te termički procesi kao što su kriogeno hlađenje ili mineralizacija. Odabir određene metode kaptiranja uvelike ovisi o uvjetima pod kojima se proces mora provoditi. Trenutni sustavi koji se primjenjuju na elektranama za hvatanje CO<sub>2</sub> prije i poslije izgaranja mogu kaptirati 80 - 95 % proizvedenog CO<sub>2</sub>. Smatra se da je za kaptiranje i komprimiranje u grubo potrebno 10-40% više energije nego za isto postrojenje bez kaptiranja (IPCC, 2005)

#### 2.1.1.1. KAPTIRANJE NAKON IZGARANJA

Sustav za kaptiranje CO<sub>2</sub> nakon izgaranja goriva izdvaja CO<sub>2</sub> iz ispušnih plinova nastalih izgaranjem primarnog goriva. Ovi sustavi obično koriste tekuće otapalo za kaptiranje malog dijela CO<sub>2</sub> (obično 3 do 15% volumena) iz struje ispušnih plinova u kojima je dušik najzastupljenija komponenta. Sustavi za kaptiranje nakon izgaranja koji se koriste kod

modernih termoelektrana na ugljenu prašinu ili kombiniranih termoelektrana obično koriste monoetanolamin (MEA) kao organsko otapalo (IEA, 2009a; IPCC, 2005.).

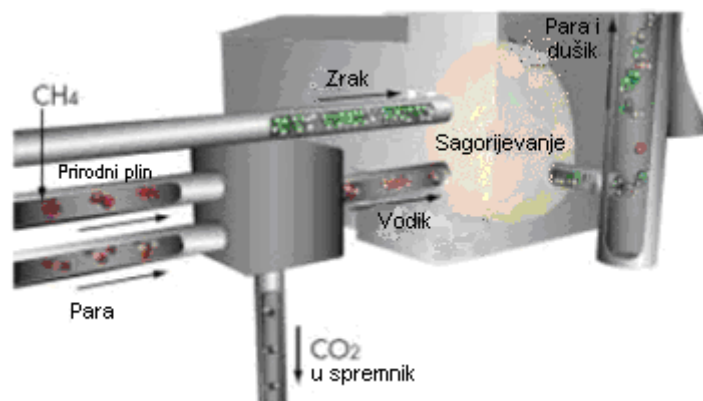
Prednost sustava za kaptiranje nakon izgaranja je u mogućnosti njihove nadogradnje (ako to prostor dozvoljava) na postojeće termoelektrane na ugljen ili plin, industrijske objekte, itd. Na slici 2-7 prikazan je proces kaptiranja CO<sub>2</sub> nakon izgaranja.



**Slika 2-7.** Izdvajanje CO<sub>2</sub> nakon izgaranja goriva (Hrnčević, 2008)

#### 2.1.1.2. KAPTIRANJE CO<sub>2</sub> PRIJE IZGARANJA GORIVA

Izdvajanje CO<sub>2</sub> iz fosilnih goriva moguće je provesti prije procesa izgaranja. Sustavi za kaptiranje prije izgaranja obrađuju primarno gorivo u reaktoru s parom i zrakom ili kisikom pri čemu nastaje smjesa koja se uglavnom sastoji od ugljičnog monoksida (CO) i vodika (H<sub>2</sub>) (sintezni plin). Reakcijom CO i pare u drugom reaktoru (tzv. engl. „*shift reactor*“) nastaje smjesa dodatnog H<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>, koja se potom može razdvojiti na struju plina CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>. Tako izdvojeni vodik se kasnije može spaljivati za proizvodnju energije i/ili topline. Iako su početni koraci obrade goriva složeniji i skuplji nego u sustavima za kaptiranje poslije izgaranja, visoke koncentracije izdvojenog CO<sub>2</sub> u drugom reaktoru (obično 15-60% volumena) i visoki tlakovi koji se primjenjuju u postupcima kaptiranja CO<sub>2</sub> prije izgaranja goriva su pogodniji za separaciju (IEA, 2009a; IPCC, 2005). Na slici 2-8 prikazan je proces kaptiranja CO<sub>2</sub> prije izgaranja.



**Slika 2-8.** Kaptiranje CO<sub>2</sub> prije izgaranja goriva (Hrnčević, 2008)

Kaptiranje prije izgaranja se na primjer može koristiti na termoelektranama koje koriste tehnologiju kombiniranog procesa s integriranim uplinjavanjem (engl. *Integrated gasification combined cycle, IGCC*) (IEA, 2009a; IPCC, 2005.).

Tehnologija kaptiranja prije izgaranja primjenjiva je samo na nove termoelektrane na fosilna goriva, zbog toga što proces kaptiranja zahtjeva jaku integraciju s procesom izgaranja. Daljnjim razvojem ove tehnologije u narednih 10 do 20 godina, može se očekivati da će ubuduće tehnologija kaptiranja prije izgaranja biti jeftinija i povećane efikasnosti u usporedbi sa kaptiranjem poslije izgaranja.

### 2.1.1.3. KAPTIRANJE CO<sub>2</sub> PRILIKOM IZGARANJA U STRUJI KISIKA

Sustavi za izgaranje goriva u struji kisika koriste čisti kisik umjesto zraka za sagorijevanje primarnog goriva, kako bi nastali dimni plinovi, koji se uglavnom sastoje od vodene pare i CO<sub>2</sub>, s time da udio CO<sub>2</sub> iznosi više od 80% volumena. Vodena para se zatim uklanja hlađenjem i komprimiranjem struje plina. Izgaranje u struji kisika prethodno zahtjeva izdvajanje kisika iz zraka, do predviđene čistoće od 95 do 99% .

Kako bi se iz dimnog plina uklonili onečišćivači zraka i nekondenzirani plinovi (kao npr. dušik), zahtjeva se njegova daljnja obrada (IEA, 2009a; IPCC, 2005).

U teoriji ova tehnologija je jednostavnija i jeftinija od kompleksnijeg procesa apsorpcije, koji je potreban na primjer u procesu kaptiranja nakon izgaranja i može postići visoku

učinkovitost uklanjanja CO<sub>2</sub>.

Nedostatak ove tehnologije je trenutno visoka cijena pridobivanja struje čistog kisika.

#### 2.1.1.4. KAPTIRANJE IZ INDUSTRIJSKIH PROCESA

U industriji se od 1970-ih godina CO<sub>2</sub> kaptira koristeći različite postupke kako bi se neželjeni CO<sub>2</sub> uklonio ili izdvojio kao produkt.

Primjeri procesa pomoću kojih se izdvaja CO<sub>2</sub> su: pročišćavanje prirodnog plina, proizvodnja vodika i sinteznog plina koji se koristi za proizvodnju amonijaka, alkohola i sinteznih tekućih goriva.

Ostale industrije koje emitiraju CO<sub>2</sub> su industrije za proizvodnju cementa, željeza i čelika (IPCC, 2005).

#### 2.1.2. TRANSPORT

Osim u slučaju da su termoelektrane smještene neposredno iznad lokacije za geološko skladištenje, kaptirani CO<sub>2</sub> je potrebno transportirati s lokacije kaptiranja na lokaciju skladištenja, što predstavlja drugi korak u CCS lancu.

Kaptirani CO<sub>2</sub> se može transportirati u krutom, plinovitom ili tekućem stanju ili kao superkritični fluid. Faza u kojoj će se CO<sub>2</sub> transportirati ovisi o načinu transporta.

Postoje dvije glavne opcije transporta: plinovodima i brodovima.

Premda je u teoriji moguć transport CO<sub>2</sub> kamionima ili željeznicom, veliki broj potrebnih kamiona ili vagona takav način transporta čini nepraktičnim. Transport kamionima za teške terete bio bi moguć samo u početnim fazama istraživanja ili pilot projektima. Zbog toga se transport cjevovodima smatra jedinom praktičnim rješenjem za transport na kopnu u slučaju komercijalne primjene CCS-a, koja uključuje zbrinjavanje više milijuna (ili čak milijardi) tona CO<sub>2</sub> godišnje. Transport cjevovodima se također smatra općenito najisplativijom opcijom, iako transport brodovima može biti ekonomski isplativiji pri transportu velikih količina CO<sub>2</sub> na veće udaljenosti (>1000km) (IPCC, 2005).

U Sjevernoj Americi razvijena je velika mreža cjevovoda za transport CO<sub>2</sub>, koja je u funkciji već više od 30 godina. Preko 30 milijuna tona CO<sub>2</sub> iz prirodnih i antropogenih



izvora se godišnje transportira kroz 6200 km plinovoda u Sjedinjenim Američkim Državama i Kanadi (IEA, 2009a i 2009b).

### 2.1.3. SKLADIŠTENJE

Treći korak u CCS lancu je skladištenje kaptiranog i transportiranog CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> ne može biti utisnut bilo gdje u podzemlje, već se prvo moraju odrediti odgovarajuće stijene kao buduća 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.

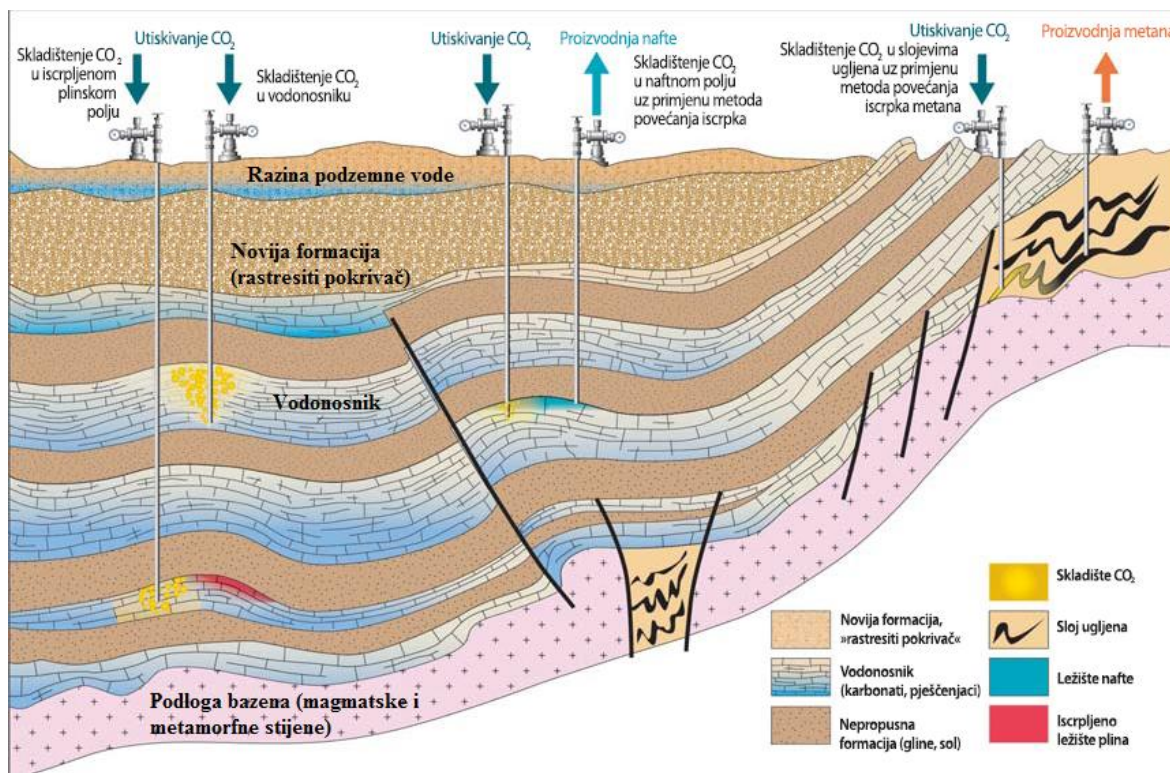
U literaturi su definirana tri glavna oblika skladištenja CO<sub>2</sub> (IPCC, 2005):

1. u duboke geološke formacije,
2. u oceane,
3. kroz površinsku mineralnu karbonizaciju (uključujući konverziju CO<sub>2</sub> u krute anorganske karbonate pomoću kemijskih reakcija) ili industrijske procese (npr. sirovina za proizvodnju različitih kemikalija koje sadrže ugljik).

Mineralna karbonizacija predstavlja skupo rješenje, koja ima štetan utjecaj na okoliš, dok se skladištenje u oceane još uvijek smatra nerazvijenom tehnologijom koja može ugroziti organizme u oceanu i uzrokovati negativne posljedice na ekosustave (Hangx, 2009; IPCC, 2005). Obje metode su još u fazi istraživanja (IEA, 2009b; IPCC, 2005). Nadalje, CCS Direktiva Europske unije izričito zabranjuje skladištenje CO<sub>2</sub> u vode. Za razliku od toga, geološko skladištenje CO<sub>2</sub> se oslanja na iskustvo stečeno iz istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Štoviše, čini se da ova tehnologija pruža veliki CO<sub>2</sub> skladišni kapacitet, premda neravnomjerno raspoređen po Zemlji, te ima vrijeme sigurnog zbirnjavanja od nekoliko stoljeća do milijuna godina (IPCC, 2005). Utiskivanje CO<sub>2</sub> u superkritičnom stanju izvodi se kroz bušotine u pogodne geološke formacije. Postoje tri mogućnosti geološkog skladištenja CO<sub>2</sub> (IEA, 2008a i 2008b):

1. Iscrpljena ležišta nafte i plina – dobro poznata zahvaljujući istraživanju i iskorištavanju ležišta ugljikovodika, nude neposrednu mogućnost skladištenja CO<sub>2</sub>;
2. Duboki slojevi zasićeni slanom vodom – imaju veliki potencijal skladištenja, ali općenito nisu toliko dobro poznati odnosno nedovoljno su istraženi;
3. Duboki slojevi ugljena – opcija za budućnost, nakon što se riješi problem utiskivanja velikog volumena CO<sub>2</sub> u ugljen male propusnosti.

Navedene mogućnosti geološkog skladištenja prikazane su u slici 2-9.



**Slika 2-9.** Mogućnosti geološkog skladištenja CO<sub>2</sub> (Saftić et al., 2011)

Predviđa se da duboki slojevi zasićeni slanom vodom imaju najznačajniji skladišni kapacitet za skladištenje najvećih količina CO<sub>2</sub>, a nakon njih ležišta nafte i plina (Hangx, 2009).

Potencijalni slojevi za skladištenje CO<sub>2</sub> moraju ispuniti mnoge kriterije, od kojih su najvažniji sljedeći (Saftić et al., 2011):

- dovoljna poroznost, propusnost i kapacitet,
- prisutnost nepropusnih pokrovnih stijena iznad ležišta (npr. glina, glinovitih stijena, lapora, naslaga soli) koje onemogućuju migraciju CO<sub>2</sub> prema gore,
- prisutnost strukturnih zamki, odnosno elemenata kao što su pokrovne stijene u obliku kupole koje mogu zadržati CO<sub>2</sub> unutar skladišne formacije,
- lokacije dublje od 800 m gdje su tlak i temperatura dovoljno visoki, tako da je moguće uskladištiti CO<sub>2</sub> u superkritičnom stanju, čime se znatno povećava kapacitet,
- odsutnost pitke vode (CO<sub>2</sub> se ne utiskuje u slojeve s podzemnom vodom koju bi čovjek mogao konzumirati ili koristiti u druge svrhe).

### 3. PROCJENA RIZIKA UTISKIVANJA I GEOLOŠKOG SKLADIŠTENJA CO<sub>2</sub>

Rizik ukazuje na vjerojatnost ostvarivanja događaja koji će imati nepovoljan utjecaj na sigurnost ljudi, okoliša i ekonomskih resursa. Primjena bilo koje tehnologije uključuje rizike. Vrlo je važno na vrijeme uočiti i odrediti potencijalne rizike te razraditi plan njihove eliminacije ili barem ublažavanja štetnog djelovanja (Lale et al, 2014). Na slici 3-1 prikazane su razine rizika prema vjerojatnosti i posljedicama incidenta.

	Velika	srednje	visoko	najviše
Posljedica	Srednja	nisko	srednje	visoko
	Niska	najniže	nisko	srednje
	Razine rizika	Niska	Srednja	Visoka
	Vjerojatnost			

**Slika 3-1.** Shematski prikaz razina rizika klasificiranih prema vjerojatnosti incidenta i njegovim posljedicama (Rütters et al., 2013)

Na slici 3-1 vidi se da niska vjerojatnost incidentnog događaja s malim posljedicama opisuje najnižu razinu rizika, dok velika vjerojatnost s velikim posljedicama odgovara najvišoj razini rizika.

Rizici povezani sa skladištenjem CO<sub>2</sub> ovise o mnogo faktora koji uključuju korištenu infrastrukturu, vrstu ležišta, iskustvo stečeno na specifičnim ležištima, ali i o različitim fazama projekta. Prije primjene CCS-a potrebno je odrediti jesu li rizici prihvatljivi i jesu li usporedivi s rizicima drugih tehnologija smanjenja emisija CO<sub>2</sub>.

Podzemno ležište za uskladištenje treba biti dovoljno udaljeno od seizmički aktivne zone, što jamči stabilnost stijena.

Glavni rizici geološkog skladištenja CO<sub>2</sub> variraju od mjesta do mjesta i uglavnom ovise o sljedećim faktorima (IPCC, 2005):

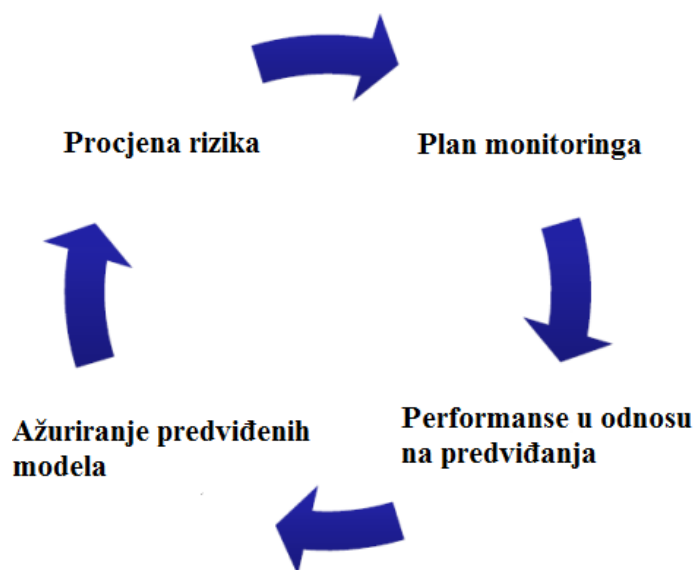
- 1) konfiguraciji skladišne lokacije, uključujući geološke karakteristike odabranog sloja,
- 2) heterogenosti izolacijskih pokrovnih stijena,
- 3) heterogenosti mase u cjelini (stratigrafska heterogenost, postojanje diskontinuiteta, itd.),
- 4) postojećim utisnim bušotinama u blizini,
- 5) adekvatnosti sustava utiskivanja,
- 6) promjeni biogeokemijskih ciklusa,
- 7) geomehaničkom trošenju stijena (nastajanje lomova i fraktura),
- 8) metodama napuštanja bušotina nakon ispunjenja kapaciteta ležišta.

Rizici povezani s CCS-om prvenstveno su rezultat moguće migracije CO<sub>2</sub> iz ležišne formacije. Najveći rizik predstavlja mogućnost migracije kroz nehermetičnu utisnu bušotinu ili tehnički nepravilno napuštenu bušotinu u blizini. Drugi rizik predstavlja migracija kroz rasjede ili frakture u pokrovnim formacijama zbog lošeg odabira ležišta ili oštećenja formacija tijekom utiskivanja. U slučaju migracije kroz bušotinu istjecanje bi vjerojatno bilo na malom prostoru, ali u relativno velikim količinama i predstavljalo bi opasnost samo za one koji se nalaze u blizini bušotine. Kod migracije kroz rasjede ili frakture istjecanje bi se vjerojatno dogodilo na širem području, ali u manjim količinama, te takvo istjecanje može, a i ne mora, predstavljati rizik za ljude i okoliš (Benson, 2006). Jedan od prvih zahtjeva koje mora ispunjavati lokacija predviđena za skladištenje je postojanje nekoliko slojeva izolatorskih pokrovnih stijena. Vrlo malo je vjerojatno da će dobro odabrano i dobro projektirano ležište propuštati. Podaci dostupni iz postojećih projekata ukazuju da će vrlo vjerojatno preko 99% uskladištenog CO<sub>2</sub> ostati zarobljeno 100 godina, a moguće je i da će preko 99% CO<sub>2</sub> ostati zarobljeno i 1000 godina (IPCC, 2005). Iako je mogućnost propuštanja relativno mala potrebno je u potpunosti razumjeti sve moguće procese i učinke vezane uz skladištenje CO<sub>2</sub> kako bi se odabralo, projektiralo i provelo najsigurnije moguće skladištenje. Prije početka utiskivanja potrebno je demonstrirati sigurnost projekta.

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

- ležišnu i pokrovnu 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.

Rano otkrivanje migracije i bilo kojih drugih nepravilnosti zahtjeva ispravno prilagođen plan monitoringa. Monitoring predstavlja ključni dio bilo kojeg projekta skladištenja i u svim direktivama i propisima je u najvećem fokusu. Sa stalnim praćenjem kontinuirano se dobivaju nove informacije i podatci o projektu i njegovoj učinkovitosti. Pomoću podataka dobivenih monitoringom mogu se ažurirati radni parametri i predviđeni modeli. Na slici 3-2 prikazan je tijek upravljanja rizikom temeljen na CCS projektu.



**Slika 3-2.** Upravljanje rizikom temeljeno na projektu skladištenja CO<sub>2</sub> (European Commission, 2011a)

Procjenu provedbe projekta i kontrolu rizika treba provoditi u određenim intervalima dogovorenim s nadzornim tijelom, a prema CCS Direktivi (2009/31/EC) barem jednom godišnje (European Commission, 2011a).

Za procjenu geološkog sastava, građe i oblika ležišta koriste se iste metode kao i kod istraživanja ležišta nafte i plina. Tok fluida, kemijsko i geomehaničko modeliranje CO<sub>2</sub> unutar ležišta omogućuju predviđanje ponašanja CO<sub>2</sub>, 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 je sigurno da će CO<sub>2</sub> 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. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> na ljude i okoliš procjenjuju se kroz studije utjecaja na okoliš, što je uobičajena praksa u bilo kojem procesu licenciranja industrijskog postrojenja. U studijama o utjecaju na okoliš se istražuju i „normalni“ scenarij (uobičajene aktivnosti) i scenarij u slučaju propuštanja kako bi se procijenio potencijalni rizik vezan uz postrojenje (Saftić et al, 2011).

### **3.1. GLAVNI RIZIK ZA OKOLIŠ – ISTJECANJE CO<sub>2</sub>**

Istjecanje CO<sub>2</sub> ili emisije transportiranog i uskladištenog CO<sub>2</sub> je glavni problem što se tiče okoliša i sigurnosti kada je u pitanju primjena CCS-a.

Stvarni utjecaj bilo kakvog potencijalnog istjecanja CO<sub>2</sub> ovisi o vjerojatnosti pojave istjecanja fluida u određenom dijelu CCS lanca i o količini ispuštenog CO<sub>2</sub>. Ako pohranjeni CO<sub>2</sub> isteče, on može naškoditi lokalnom kopnenom i morskom ekosustavu u blizini mjesta skladištenja. Ako se odjednom ispuste jako velike količine CO<sub>2</sub> on u teoriji može zamijeniti kisik te tako stvoriti smrtonosne uvijete. Za dobro odabrane, projektirane i nadzirane lokacije za geološko skladištenje CO<sub>2</sub>, Međuvladino tijelo o klimatskim promjenama, IPCC procjenjuje da je rizik usporediv sa rizicima koji postoje pri pridobivanju ugljikovodika. CO<sub>2</sub> može biti zarobljen milijunima godina. Iako može doći do male migracije prema površini kroz tlo, smatra se da će dobro odabrane lokacije skladištenja zadržati više od 99% utisnutog CO<sub>2</sub> preko 1000 godina. Rizik od incidentnog

ispuštanja na lokaciji geološkog skladištenja smatra se relativno malim zbog dobro razvijenih i shvaćenih tehnologija i tehnika koje se primjenjuju te mogućnosti njihove kontrole, nadzora i unapređenja (IPCC, 2005). Smatra se da bi primarni put istjecanja CO<sub>2</sub> trebao biti kroz bušotinu ili utisnu cijev, prije nego kroz bilo koji geološki put. Poznato je međutim da još uvijek nema potpunog razumijevanja mehanizma za moguću migraciju CO<sub>2</sub>. Iako je utisna cijev obično zaštićena protupovratnim ventilom, svejedno postoji rizik od pucanja i propuštanja cijevi zbog tlaka (IPCC, 2005).

Ispuštanje velike količine CO<sub>2</sub> iz cjevovoda u tlo uslijed incidenta moglo bi rezultirati stvaranjem ugljične kiseline (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), koja bi nastala otapanjem CO<sub>2</sub> u slojnoj vodi u tlu. Postoji i rizik da bi ta ugljična kiselina mogla otopiti vapnenačke formacije, ako ih ima na toj lokaciji, iako bi za to bila potrebna duboka penetracija i dugo vrijeme kontakta. Ti rizici su vrlo specifični s obzirom na lokaciju te se ne mogu procijeniti bez detaljnog modeliranja. U ležištima soli, utisnuti CO<sub>2</sub> u superkritičnom stanju će biti lakši od podzemne vode visokog saliniteta i vertikalna migracija CO<sub>2</sub> mogla bi biti popraćena otapanjem u plitkim vodonosnicima i stvaranjem H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Ugljična kiselina može kemijski reagirati s pokrovnom stijenom što dovodi do promjena u geokemiji i hidrogeologiji formacije. U usporedbi s iscrpljenim ležištima nafte i plina, gdje su svojstva ležišta dobro poznata operatorima, postoji manjak seizmičkih podataka za mapiranje većine slanah akvifera. Hidraulički diskontinuitet se može proširiti i na desetke kilometara udaljenosti i na takvim udaljenostima velika je mogućnost da postoje frakture i linije rasjeda sa mogućom vezom s površinskim vodama i podzemnim izvorima pitke vode. Kako bi se osiguralo da kumulativna i trenutačna ispuštanja CO<sub>2</sub> u okoliš ne ugroze učinkovitost i sigurnost skladištenja CO<sub>2</sub>, potrebno je dobro poznavati geološke i hidrogeološke karakteristike lokacije skladištenja i okoline. Na početku utiskivanja morat će se koristiti odgovarajuće metode nadzora u redovitim intervalima u svrhu praćenja kretanja oblaka CO<sub>2</sub>, kako bi osigurali da se oblak kreće kao što je očekivano, a ako nije da se može planirati mogućnosti sanacije. Smatra se da će učinkovit odabir lokacije i dobra nadzorna kontrola izvođenja operacija osigurati prihvatljiv i razuman stupanj rizika. Kao što je prije spomenuto, CCS Direktiva Europske Unije postavlja pravni okvir za ekološki sigurno skladištenje CO<sub>2</sub>. Ona pokriva svo skladištenje CO<sub>2</sub> u geološke formacije unutar EU i utvrđuje zahtjeve koji obuhvaćaju cijeli vijek trajanja skladišnog geoprostora. Cilj ekološki sigurnog geološkog skladištenja je trajno zadržavanje CO<sub>2</sub> tako da spriječi i, gdje to nije moguće, eliminira što je više moguće negativnih učinaka i bilo kakvih rizika za okoliš i zdravlje ljudi. Odredbe uključene u Direktivu odnose se na odabir lokacije, monitoring,

korektivne mjere, prihvatljivi protok CO<sub>2</sub> i mjere za ispuštanja ili velike nepravilnosti. Karakterizacija i procjena potencijalne lokacije skladištenja i okolnog područja mora se provoditi u tri koraka, uključujući prikupljanje podataka, izradu trodimenzionalnog statičkog geološkog modela, karakterizaciju skladišnog dinamičkog ponašanja, karakterizaciju osjetljivosti i procjenu rizika (EEA, 2011).

### **3.1.1. LOKALNI UTJECAJ ISTJECANJA CO<sub>2</sub> NA ZDRAVLJE I OKOLIŠ**

Rizik za ljudsko zdravlje i sigurnost ne ovisi samo o vjerojatnosti istjecanja i o količini ispuštenog CO<sub>2</sub>, nego i o gustoći naseljenosti u blizini CCS operacija. Koncentracija CO<sub>2</sub> u zraku od 10% se smatra smrtonosnom za izloženu populaciju. Smatra se da odobalna ispuštanja CO<sub>2</sub> ne predstavljaju nikakav rizik za javnost. Tamo će postojati rizici samo za ljudstvo na platformi i postrojenju za utiskivanje, ali je predviđeno da se u takvim situacijama postupa prema postojećim zdravstvenim i sigurnosnim legislativama (Commission of the European Communities, 2008). Povećane razine emisija onečišćivača zraka (npr. NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> i NH<sub>3</sub>) koje se mogu pojaviti zbog dodatnih izgaranja fosilnih goriva mogu dovesti do dodatnih lokalnih utjecaja na zdravlje, usjeve i materijale, te do zakiseljavanja i eutrofikacije vodenih sustava. Moguće je da kaptirana struja CO<sub>2</sub> može sadržavati razne onečišćivače zraka, što znači da će emisije i tih onečišćivača u atmosferu biti smanjene, iako će to jako ovisiti o dopuštenim količinama nečistoća u struji CO<sub>2</sub> u budućnosti.

Otpad koji nastaje tijekom postupka kaptiranja CO<sub>2</sub> uključuje šljaku i pepeo zbog povećanog korištenja ugljena, talog iz sustava za odsumporavanje dimnih plinova, oslobođeni sumpor i iskorištene absorbente. Značajne količine otpada u EU u budućnosti će nastajati iz pogona za kaptiranje nakon izgaranja i odlaganje takvog otpada će podlijegati strogim propisima kontrole utjecaja na okoliš.

Tijekom izgradnje postrojenja za utiskivanje CO<sub>2</sub> mogu nastati značajne količine otpada i otpadnih voda kao nusprodukt izrade bušotina. Količine tog otpada ovise o mnogo faktora, uključujući i geološke karakteristike područja, dubinu i metodu bušenja, a utjecaj otpada i otpadnih voda ovisi o lokaciji i metodi odlaganja. Izrada bušotina je dobro razvijena i utvrđena tehnologija u naftno-plinskoj industriji, te postoje striktno kontrole upravljanja otpadom koje se koriste u ovom sektoru.

Na bioraznolikost i kulturnu baštinu značajno može utjecati izgradnja novih cjevovoda za transport CO<sub>2</sub>, kako trajno, na mjestima gdje cjevovodi prolaze kroz osjetljiva područja ili

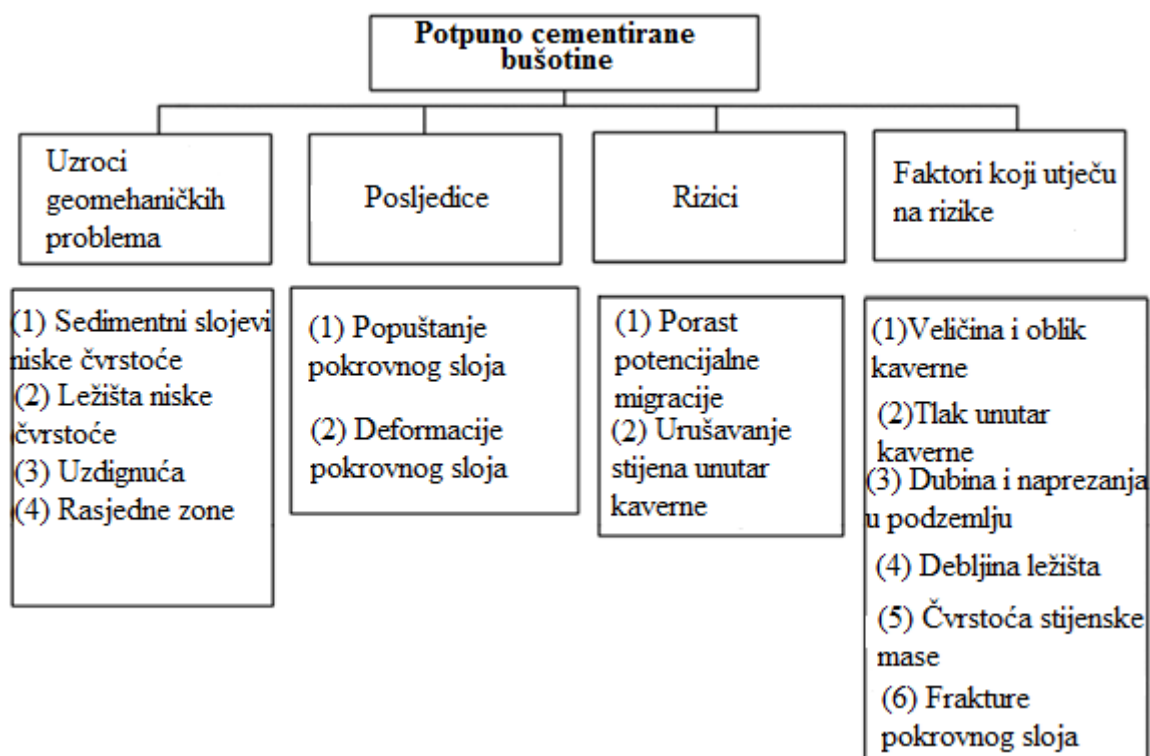


sijeku rute divljači, tako i trenutno, tijekom izgradnje zbog buke, prašine i drugih smetnji. Cjevovod obično zauzima 15-30 metara u širinu, što je potrebno kako bi se zaštitila javnost, a i sam cjevovod. Tijekom rada cjevovoda nepovoljan utjecaj na kulturnu baštinu (npr. zgrade, spomenike, itd.) je malo vjerojatan, ali akcidentna ispuštanja CO<sub>2</sub> mogu dovesti do nepovoljnih utjecaja na životinjske i biljne vrste u blizini i ekosustav zbog toksičnog djelovanja. Ukoliko dođe do oštećenja cjevovoda životinje zarobljene u neposrednoj blizini ispuštenog CO<sub>2</sub> mogle bi se ugušiti (EEA, 2011).

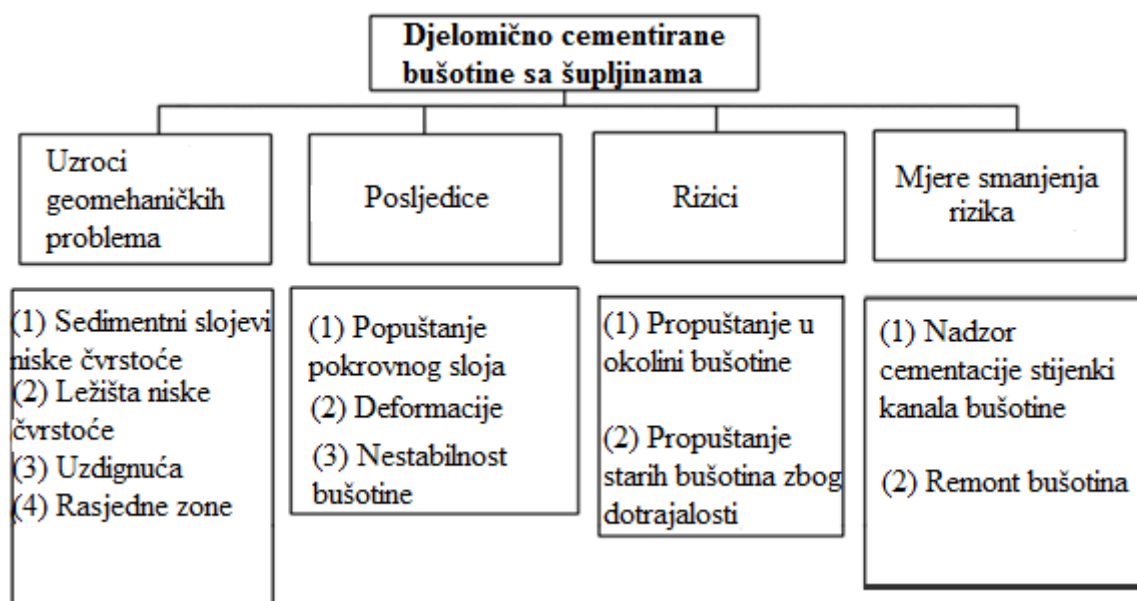
Dugoročne fugitivne emisije mogu promijeniti kemijska svojstva okolne podzemne vode, morske vode ili tla zakiseljavanjem. Zakiseljavanje tla moglo bi potaknuti ispiranje određenih minerala te tako izazvati dugoročne posljedice na kvalitetu tla. Akcidentne i fugitivne emisije na postrojenjima za skladištenje i utiskivanje mogu utjecati na okoliš isto kao i emisije iz transporta. Svi ti rizici moraju se uzeti u obzir pri odabiru lokacije i izdavanju dozvola kako bi se izbjegli veliki štetni utjecaji (European Union, 2009).

### **3.2. RIZICI POVEZANI S RANIJIM FAZAMA SKLADIŠTENJA**

Različite faze koje prethode samom skladištenju CO<sub>2</sub> uzrokuju naprezanja i deformacije stijenske mase. Posljedično mogu nastati putevi kroz koje bi mogao istjecati CO<sub>2</sub>, zbog rasjeda i fraktura. Postojanjem rasjeda moguće su pojave potresa koji donose još više rizika za CCS projekte. Geomehanička nestabilnost kanala bušotine je problem s kojim se može susresti tijekom bušenja. Frakturiranjem stijena i deformacijama kanala bušotine nastaju mogući putevi migracije. Rizik od migracije minimalizira se cementacijom kolone zaštitnih cijevi. Dva osnovna načina opremanja bušotina su sa zacijevljenim kanalom bušotine i s nezacijevljenim dijelom kanala bušotine. Na slikama 3-3 i 3-4 prikazani su uzroci geomehaničkih problema, posljedice, rizici i faktori koji utječu na njih za potpuno cementirane bušotine i djelomično cementirane bušotine (Manchao et al., 2011).



**Slika 3-3.** Uzroci, rizici i posljedice geomehaničkih problema u potpuno cementiranim bušotinama (Manchao et al., 2011)

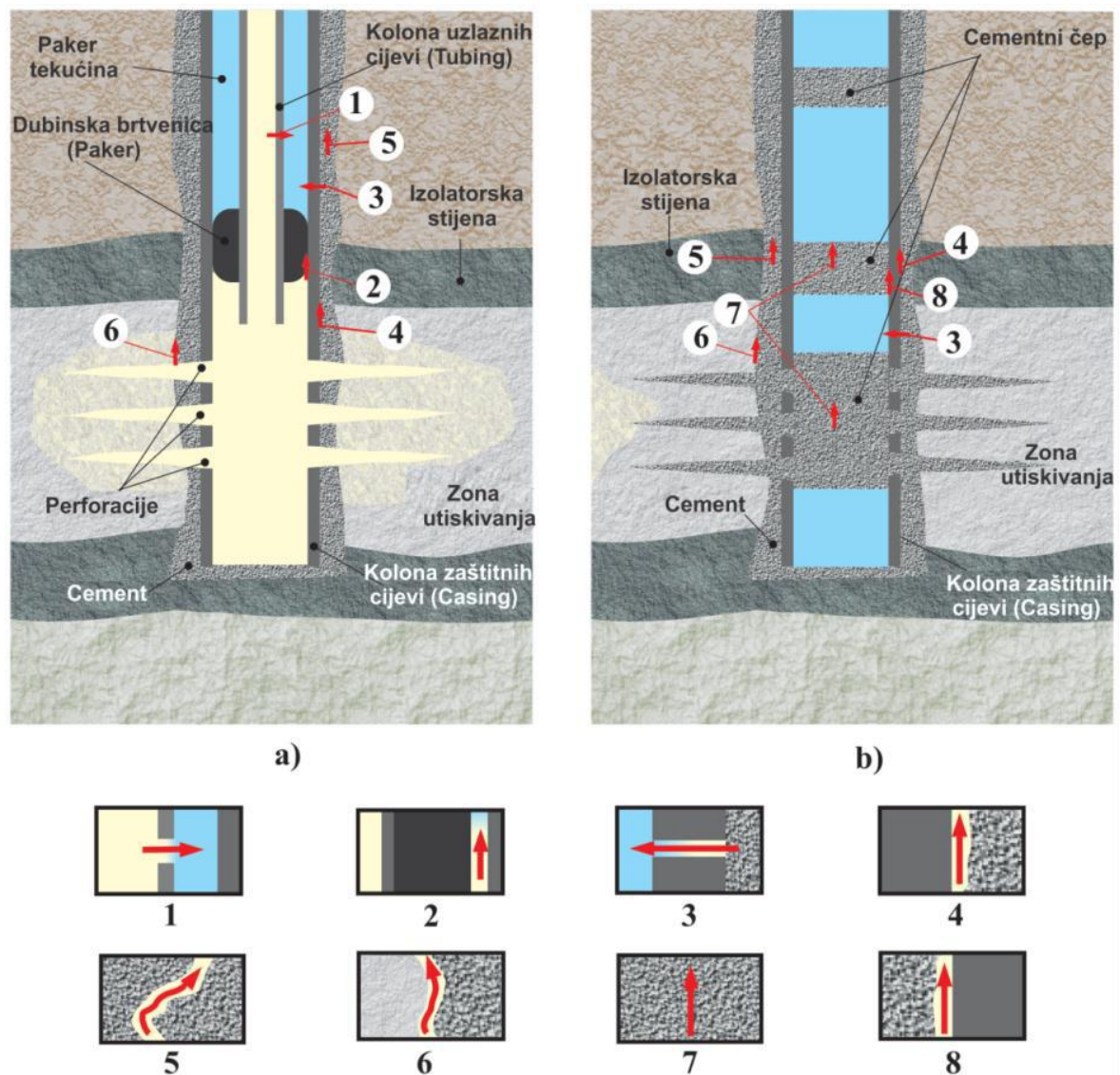


**Slika 3-4.** Uzroci, rizici i posljedice geomehaničkih problema u djelomično cementiranim bušotinama (Manchao et al., 2011)

### 3.3. RIZICI POVEZANI SA SKLADIŠTENJEM

Općenito uzevši, mogući putovi propuštanja CO<sub>2</sub> su ili tehnički (npr. duboke bušotine) ili prirodni (npr. sustavi pukotina i rasjedi). I aktivne i napuštene bušotine mogu predstavljati putove migracije prvenstveno iz razloga što tvore izravnu vezu između površine i ležišta, ali i zbog toga što su izgrađene od materijala koji može korodirati tijekom vremena. Dodatan problem je u tome 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 popravnih radnji koje se mogu primijeniti. Migracija CO<sub>2</sub> uzduž prirodnih rasjeda i pukotina koje postoje u pokrovnoj stijeni ili njenoj krovini složenija je od migracije kroz bušotinu jer se radi o nepravilnim, plošnim obilježjima s prostorno varijabilnom propusnošću. Znanstveno i tehničko razumijevanje prirodnih sustava koji propuštaju i onih koji ne propuštaju CO<sub>2</sub> omogućuje projektiranje objekata geološkog skladištenja koji imaju iste značajke kao i prirodna ležišta koja uzamčuju CO<sub>2</sub> i metan tisućama i milijunima godina.

Izolatorska pokrovna stijena, stijenske kanala bušotine, prstenasti prostor, cementni kamen i okolni stjenski masiv su glavni elementi koji se moraju pažljivo analizirati (Manchao et al., 2011). U prisutnosti vode, CO<sub>2</sub> reagira s vodom pri čemu nastaje ugljična kiselina, koja nagrizanjem može narušiti integritet cementnog kamena. Kako bi se to spriječilo, razmatra se povećanje debljine cementnog kamena ili dodavanje aditiva u cement (Gaurina-Međimurec, 2010). Na slici 3-5 prikazani su mogući putevi migracije CO<sub>2</sub> u aktivnim i napuštenim bušotinama.



**Slika 3-5.** Mogući putevi migracije (a) aktivnoj i (b) napuštenoj bušotini (Gaurina-Međimurec i Pašić, 2011)

Potencijalni putovi migracije CO<sub>2</sub> kroz bušotinu uključuju (Gaurina-Međimurec & Pašić, 2011): (1) migraciju kroz korozijom oštećen dio tubinga, (2) migraciju uz paker, (3) migraciju kroz korozijom oštećen dio kolone zaštitnih cijevi, (4) migraciju između kolone zaštitnih cijevi i cementnog kamena, (5) migraciju kroz pukotine u cementnom kamenu, (6) migraciju kroz prstenasti prostor između cementnog kamena i stjenke bušotine, (7) migraciju kroz cementni čep, (8) migraciju između cementnog kamena i unutarnje stjenke kolone zaštitnih cijevi.

Za procjenu rizika potrebno je ustanoviti alate i modele koji će primjenjivati postojeća znanja i obavljati analize rizika i odluka. Procjena rizika i upravljanje rizicima CCS-a zahtijevaju procjenu opasnosti i procjenu vjerojatnosti štetnih učinaka. Procjena rizika

započinje identifikacijom opasnosti, što se odnosi na identifikaciju mogućih velikih opasnosti i mogućnosti opsega štete. Nakon identifikacije opasnosti slijedi karakterizacija rizika, što uključuje detaljnu procjenu svake opasnosti kako bi se ocijenio rizik povezan sa svakom opasnošću. Na temelju studija objavljenih u nekoliko publikacija određeno je devet opasnosti vezanih uz istjecanje CO<sub>2</sub> koje su navedene u tablici 4-1 (Manchao et al., 2011).

**Tablica 3-1.** Tablica opasnosti istjecanja CO<sub>2</sub> (Manchao et al., 2011)

Opasnost	Opis
H1	Istjecanje CO <sub>2</sub> iz cjevovoda ili pumpnih stanica
H2	Istjecanje CO <sub>2</sub> tijekom transporta
H3	Sporo i ustaljeno istjecanje CO <sub>2</sub> iz geološkog skladišta
H4	Brzo i veliko istjecanje CO <sub>2</sub> iz geološkog skladišta
H5	Istjecanje iz geološkog skladišta u podzemne vode
H6	Istjecanje CO <sub>2</sub> iz geološkog skladišta u ležišta fosilnih goriva
H7	Istjecanja CO <sub>2</sub> koja eliminiraju dobrobiti geološkog skladištenja
H8	Izazivanje frakturiranja ili seizmičnosti
H9	Istjecanje iz napuštenih rudnika ugljena

Istjecanje CO<sub>2</sub> iz geološkog skladišta može izazvati dva tipa opasnosti, ovisno o brzini istjecanja. Kod sporog i ustaljenog istjecanja CO<sub>2</sub> iz geološkog skladišta ne dolazi do značajnijih posljedica. Istjecanja mogu uzrokovati lokalne probleme, uključujući i ljudske žrtve. Brza i obilna istjecanja CO<sub>2</sub> iz ležišta mogu dovesti do brojnih ljudskih žrtava, iako su takve katastrofe rijetke. Primjer jedne takve katastrofe je incident koji se dogodio 1986. g. na jezeru Nyos u Kamerunu, prilikom kojeg je smrtno stradalo oko 1700 ljudi i 3500 grla stoke (Manchao et al., 2011). Migracija CO<sub>2</sub> iz ležišta prema površini potencijalno može utjecati na kvalitetu podzemne vode koja se koristi za piće ili za industrijske i poljoprivredne potrebe. Indikacije zagađenja podzemnih voda s CO<sub>2</sub> jesu smanjivanje pH vrijednosti, pojava teških metala u vodi za piće, kontaminacija površinskih voda, promjena mirisa, boje i okusa. U najgorem slučaju zagađenje može doseći opasne razine te tako onemogućiti korištenje vode za piće ili navodnjavanje. Utiskivanje CO<sub>2</sub> pod velikim tlakovima može dovesti do prodiranja u ležišta ugljikovodika. Zagađenje ležišta ugljikovodika uzrokuje velike ekonomske rizike, jer smanjuje vrijednost fosilnih goriva.

Vjerojatnost pojave ove opasnosti slična je vjerojatnosti migracije CO<sub>2</sub> u podzemne vode. Mjere za smanjenje rizika migracije CO<sub>2</sub> u ležišta ugljikovodika uključuju (Manchao et al., 2011):

- 1) odabir ležišta za utiskivanje koje bi moglo zadržati CO<sub>2</sub> najmanje tisuću godina;
- 2) odabir ležišta za utiskivanja koje je daleko od ležišta ugljikovodika.

Ukoliko dođe do istjecanja CO<sub>2</sub> velikom brzinom prednosti geološkog skladištenja nestaju i nastaju dodatni troškovi. Bušotine mogu biti kontrolirane i nadzirane kako bi se osiguralo da su adekvatno izolirane, a ako nisu naknadno se mogu provesti postupci za postizanje bolje izolacije i brtvljenja. Kod geološke sekvestracije ugljika u porozne stijenske masive pri visokim tlakovima može doći do pojave frakturiranja i pomicanja stijena duž rasjeda, uz stvaranje potencijalnih puteva za migraciju CO<sub>2</sub> i aktivacija rasjeda koji mogu potaknuti potrese dovoljno velike za izazivanje štete. Do sada je dolazilo samo do umjerenih potresa uzrokovanih utiskivanjem CO<sub>2</sub>. Utjecaj aktivnih rasjeda na izolacijska svojstva pokrovnih stijena je bitan sigurnosni faktor koji se mora uzeti u obzir pri procjenama rizika.

### **3.4. RAZVOJ METODA ZA PROCJENU RIZIKA**

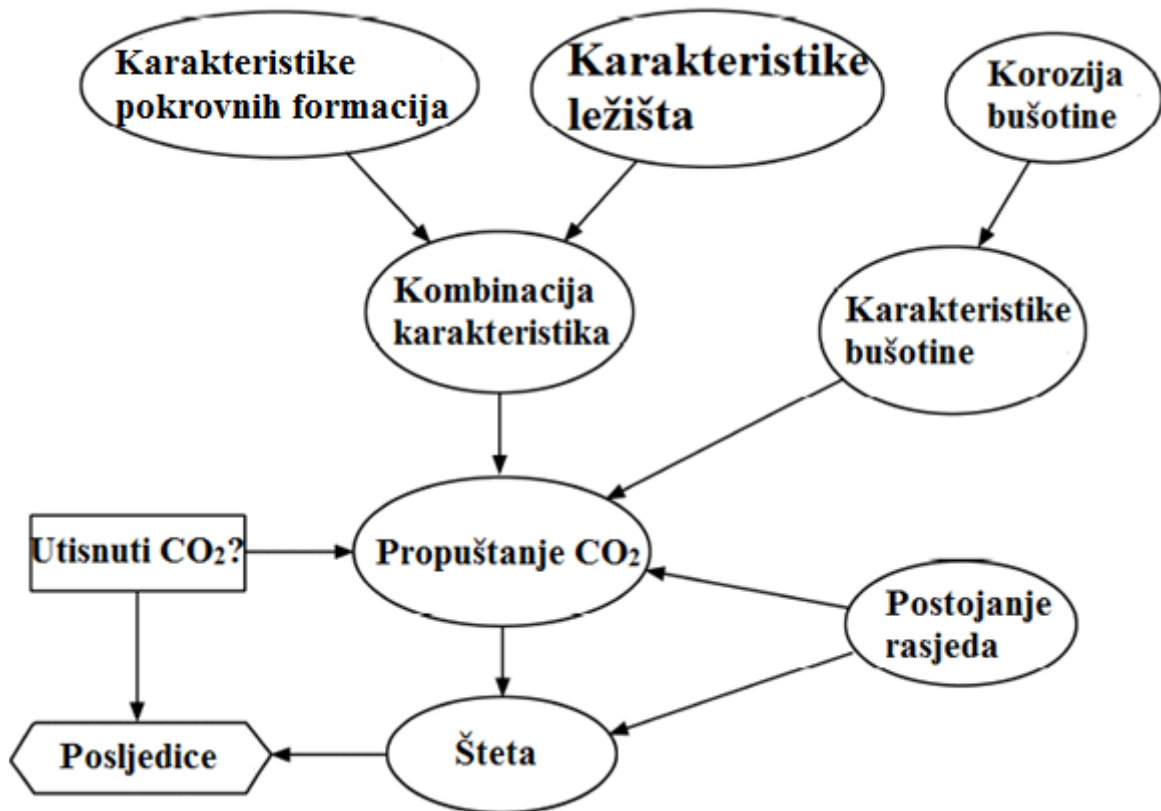
Analiza rizika je sistematski postupak koji omogućava ocjenjivanje potencijalnih negativnih efekata i upravljanje njima. Glavni cilj analize rizika je sprječavanje nesreća ili katastrofa. Analiza rizika inženjerima omogućuje identifikaciju rizika i njihovo umanjivanje, ali ne i njihovo potpuno izbjegavanje. Danas analize rizika najčešće uključuju matematičku i statističku programsku opremu.

Nakon što se rizici kvantificiraju nastavlja se s razvojem odgovarajućih alata za kontrolu rizika i određivanjem politike i postupaka u incidentnim situacijama (Lale et al., 2015).

Postoji nekoliko dostupnih modela za analizu i prikaz podataka, uključujući stabla događaja, sustave temeljene na pravilima (engl. *Rule-based systems*), sustave temeljene na nesavršenim pravilima (engl. *Fuzzy-ruled systems*), umjetne neuronske mreže i Bayesove mreže (BN). Postoji i nekoliko tehnika za analizu podataka kao što su razvrstavanje, procjena gustoće, regresija i grupiranje. Sustavi za prikaz znanja i tehnike za analizu odluka razvijeni su kako bi olakšali i poboljšali postupke donošenja odluka. Sustavi za prikaz znanja koriste različite računalne tehnike umjetne inteligencije za prikaz ljudskih

znanja i zaključaka (Manchao et al.,2011).

U zadnjem desetljeću primjena Bayesovih mreža postala je popularna za prikaz analiza rizika. Bayesova mreža može se koristiti u bilo kojoj fazi analize rizika i može zamijeniti stabla pogrešaka i stabla događaja u stablu logičke analize. Za analizu rizika utiskivanja CO<sub>2</sub> razvijena je Bayesova mreža prikazana na slici 3-6 (Manchao et al.,2011).



**Slika 3-6.** Bayesova mreža za analizu rizika utiskivanja CO<sub>2</sub> (Manchao et al.,2011)

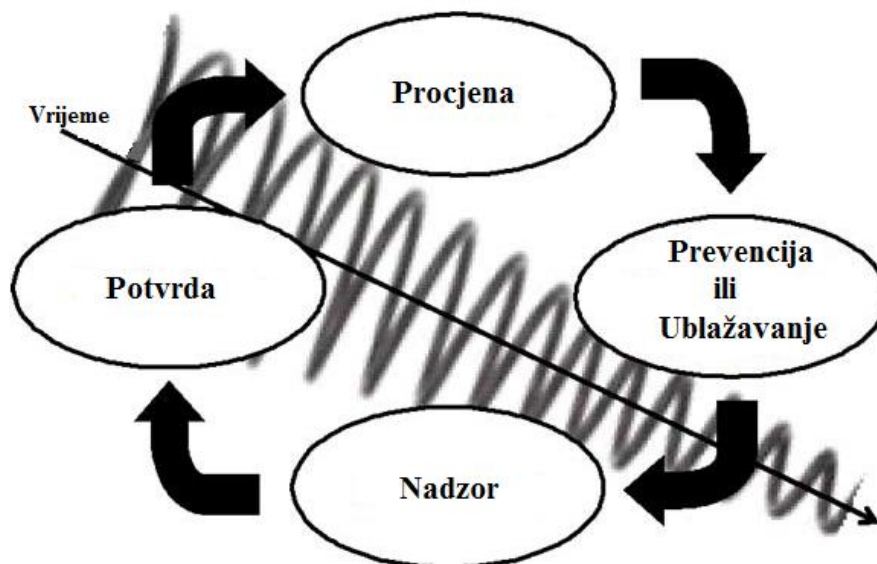
Varijable uključene u Bayesovu mrežu uključuju:

1. stanje pokrovnih stijena iznad ležišta (usvojene su tri vrijednosti: dobro, loše i jako loše),
2. karakteristike ležišta (vrednuju se kao: dobro, loše i jako loše),
3. kombinirane karakteristike pokrovnih formacija i ležišta,
4. geomehaničke karakteristike bušotina (vrednuju se kao dobro ili loše ukoliko postoji pojava korozije),
5. koroziju opreme ili cementnog kamena u bušotini (razmatraju se dvije razine: razina 1 (prihvatljivo) i razina 2 (loše)),
6. postojanje rasjeda (obzir su uzete dvije hipoteze: DA ili NE),

7. propuštanje CO<sub>2</sub> (u obzir se uzimaju kombinirane karakteristike pokrovnih stijena i ležišta, postojanje bušotina i rasjeda, i naravno da li se CO<sub>2</sub> utiskuje ili ne).
8. utiskivanje CO<sub>2</sub> (za ovu situaciju razmatraju se dvije suprotne varijable: DA ili NE),
9. posljedice (ovise o tome da li su usvojene sanacijske mjere),

Izračunati rizik ovisi o mogućnosti istjecanja CO<sub>2</sub> i postojanju rasjeda, te su prema tome usvojene vrijednosti rizika: visoki, prosječni i niski.

U modelu analize rizika takozvane OSPAR konvencije (Konvencija o zaštiti morskog okoliša sjeveroistočnog Atlantika) OSPAR-FRAM ističe se da je upravljanje projektom skladištenja CO<sub>2</sub> tijekom cijelog životnog vijeka projekta iterativni postupak koji je potreban za njegovo kontinuirano poboljšanje. Slika 3-7 prikazuje ciklički proces procjene i upravljanja rizikom tijekom cijelog životnog ciklusa projekta skladištenja CO<sub>2</sub>. Nadzor se treba provoditi od faze planiranja sve do faze nakon zatvaranja bušotine (engl. *post-closure phase*). U fazi planiranja upravljanje rizicima koristi se za određivanje preventivnih mjera na temelju predviđanja koje proizlaze iz karakterizacije rizika. Upravljanje rizicima dodatno definira zahtjeve za praćenje tijekom i nakon utiskivanja CO<sub>2</sub>.



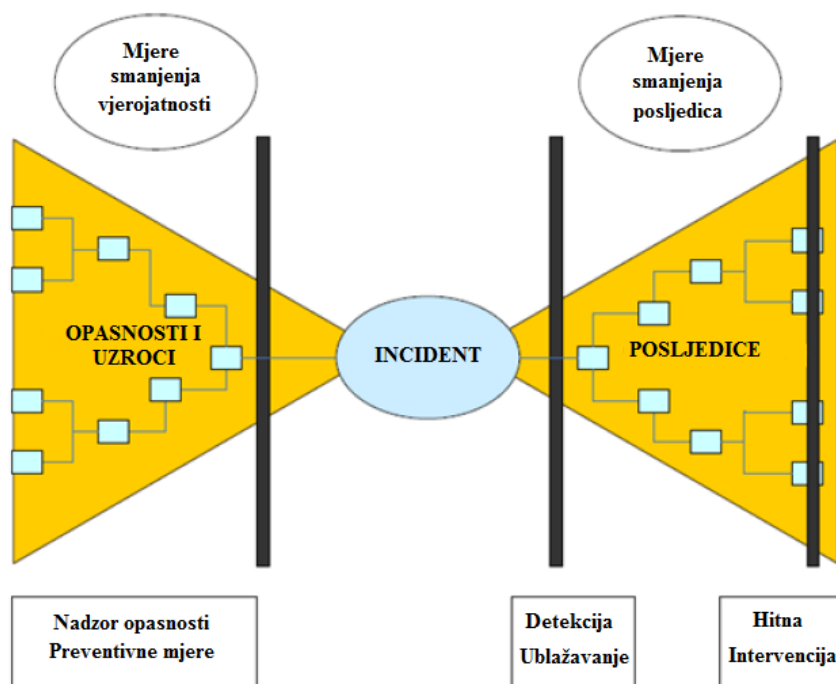
**Slika 3-7.** Ciklički proces procjene i upravljanja rizikom tijekom životnog ciklusa projekta skladištenja CO<sub>2</sub> (OSPAR, 2007)



Rezultati nadzora mogu dovesti do identifikacije dodatnih preventivnih mjera i/ili mjera ublažavanja incidentnih situacija. Nakon napuštanja, odnosno zatvaranja bušotine monitoring se treba nastaviti, ali se njegov intenzitet može smanjiti. Tek kada postoji dokaz da ne postoji mogućnost bilo kakvog negativnog utjecaja na okoliš monitoring se može i u potpunosti obustaviti (OSPAR, 2007).

Prema CO<sub>2</sub>QUALSTORE-u (Smjernice za odabir i kvalifikaciju lokacija i projekata za geološko skladištenje CO<sub>2</sub>) planiranje nepredviđenih događaja i sanacija incidentnih situacija su ključan dio upravljanja rizicima i nesigurnostima u CCS-u. Planirane mjere za nepredviđene događaje predstavljaju jednu vrstu mjera usmjerenih na smanjenje rizika i povezanih nesigurnosti.

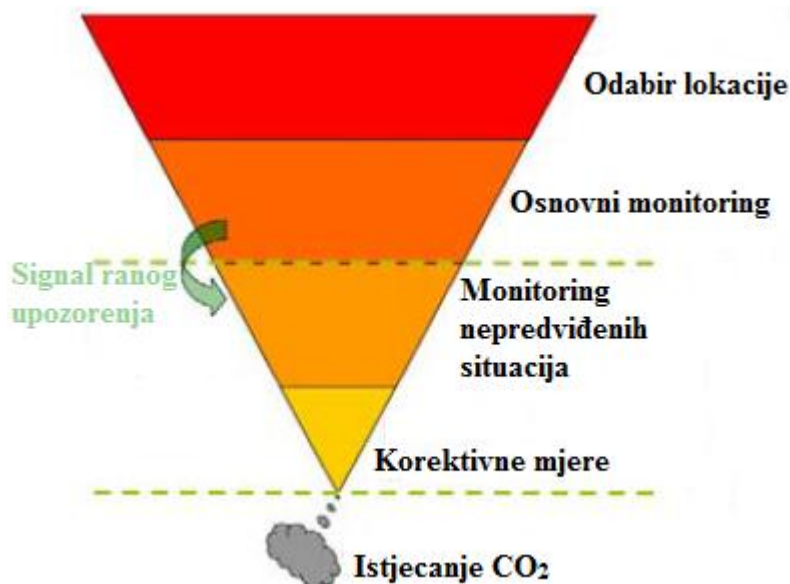
U takozvanom „mašna“ modelu upravljanju rizicima, prikazanom na slici 3-8, mjere ublažavanja i sanacije su dio mjera smanjenja posljedica (desna strana dijagrama) koje se provode nakon incidenta. Mogu se smatrati kao mjere hitne intervencije. Ovaj model trebao bi pružiti dovoljnu sigurnost nadzornim organima i javnosti da će odabrana lokacija skladištenja osigurati dugoročno skladištenje CO<sub>2</sub> (Aarnes et al., 2010).



**Slika 3-8.** „Mašna“ model upravljanja rizicima prema CO<sub>2</sub>QUALSTORE-u (Aarnes et al., 2010)

Osim osnovnog scenarija praćenja, smjernice preporučuju dodatno praćenje nepredviđenih situacija s ciljem stjecanja dodatnih podataka koji se mogu koristiti, između ostalog, i za

pravilan odabir i dizajn mjera sanacije posljedica incidenta. Cijeli CCS proces predstavlja dio procedure smanjenja rizika, kao što je prikazano u trokutu smanjenja rizika na slici 3-9 (Aarnes *et al.*, 2010).



**Slika 3-9.** Trokut smanjenja rizika prema CO<sub>2</sub>QUALSTORE-u (Aarnes *et al.*, 2010)

Plan korektivnih mjera mora biti predan u sklopu prijave za dozvolu provođenja projekta CCS-a. Detaljne korektivne mjere moraju se razviti prije početka utiskivanja. Tijekom životnog vijeka lokacije skladištenja može se pojavljivati potreba za novim korektivnim mjerama ili za promjenom pristupa postojećim mjerama. Preporučuje se redovito ažuriranje plana korektivnih mjera, a najbolje da bude u skladu s vremenskim okvirom ažuriranja plana nadzora (Korre *et al.*, 2014). U tablici 3-2 prikazane su mjere ublažavanja i sanacije povezane sa scenarijima rizika CCS-a.

**Tablica 3-2.** Mjere ublažavanja/sanacije povezane sa tipičnim scenarijima rizika CCS-a  
(Korre et al., 2014)

Scenarij rizika	Mjere ublažavanja/sanacije
Istjecanje kroz rasjede i frakture	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zatvaranje ventila za prekid utiskivanja,</li> <li>- smanjenje brzine i tlaka utiskivanja,</li> <li>- smanjenje ležišnog tlaka uklanjanjem vode ili drugih fluida iz ležišta,</li> <li>- stvaranje hidrauličke barijere povećanjem ležišnog tlaka iznad mjesta istjecanja,</li> <li>- postavljanje kemijskih brtvećih barijera,</li> <li>- prekid utiskivanja, crpljenje utisnutog CO<sub>2</sub> iz ležišta i ponovno utiskivanje u pogodnije ležište.</li> </ul>
Istjecanje kroz aktivne ili napuštene bušotine	<ul style="list-style-type: none"> <li>- postavljanje novog cementnog čepa u napuštenoj bušotini,</li> <li>- popravno opremanje utisne bušotine zamjenom tubinga i pakera,</li> <li>- postavljanje cementnih čepova i napuštanje bušotine koja se ne može preopremit,</li> <li>- stvaranje hidrauličke barijere povećanjem ležišnog tlaka iznad mjesta istjecanja,</li> <li>- postavljanje kemijskih brtvećih barijera,</li> <li>- prekid utiskivanja.</li> </ul>
Istjecanje u zonu aeracije i akumulacija u tlu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- izvlačenje CO<sub>2</sub> iz zone aeracije i tla standardnim tehnikama isparavanja,</li> <li>- ispuštanje CO<sub>2</sub> iz udolina ili nisko zalježućih područja i njegovo ispuštanje u zrak ili ponovno utiskivanje u podzemlje,</li> <li>- primjena metoda pasivne sanacije, kao što su difuzija i sporo ispriljivanje CO<sub>2</sub> iz zone aeracije zbog razlike tlakova (tzv. engl. <i>barometric pumping</i>),</li> <li>- natapanje i drenaža tla ili dodavanje lužnatih materijala (kao vapno) u tlo koje je zakiseljeno zbog zagađenosti s CO<sub>2</sub>,</li> <li>- stvaranje hidrauličke barijere povećanjem ležišnog tlaka iznad mjesta istjecanja,</li> <li>- postavljanje kemijskih brtvećih barijera,</li> <li>- prekid utiskivanja.</li> </ul>
Akumulacija CO <sub>2</sub> u podzemnim vodama	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bušenje bušotina koje ulaze u akumulacije u podzemnim vodama i izvlačenje CO<sub>2</sub> kroz njih (čisti CO<sub>2</sub> ili otopljen u vodi),</li> <li>- otapanje mineraliziranog CO<sub>2</sub> u vodi i njegovo izvlačenje u otopljenoj fazi kroz bunare,</li> <li>- ispuštanje vode kontaminirane s CO<sub>2</sub> na površinu i uklanjanje CO<sub>2</sub> aeracijom,</li> <li>- stvaranje hidrauličkih barijera za zadržavanje zagađivača, pravilnim postavljanjem bušotina za utiskivanje i izvlačenje,</li> <li>- primjena pasivnih metoda koje se zasnivaju na prirodnim biogeokemijskim procesima,</li> <li>- stvaranje hidrauličke barijere povećanjem ležišnog tlaka iznad mjesta istjecanja,</li> <li>- postavljanje kemijskih brtvećih barijera,</li> <li>- prekid utiskivanja.</li> </ul>
Akumulacija	<ul style="list-style-type: none"> <li>- plitke površinske vodene cjeline u kojima dolazi do miješanja</li> </ul>

<p>CO<sub>2</sub> u površinskim vodama</p>	<p>(plitka jezera) ili turbulencija (potoci) brzo će otpustiti otopljeni CO<sub>2</sub> u nazad atmosferu,</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- izbjegavanje lociranja projekata u blizini limničkih jezera, u slučaju potrebe razvijeni su sustavi za uklanjanje CO<sub>2</sub> iz takvih jezera koji se primjenjuju u jezerima Nyos i Monoun u Kamerunu,</li> <li>- stvaranje hidrauličke barijere povećanjem ležišnog tlaka iznad mjesta istjecanja,</li> <li>- postavljanje kemijskih brtvećih barijera,</li> <li>- prekid utiskivanja.</li> </ul>
<p>Velika ispuštanja CO<sub>2</sub> u atmosferu</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- korištenje velikih ventilatora kako bi se brzo razrijedila razina CO<sub>2</sub> na sigurne razine u zgradi ili zatvorenom prostoru,</li> <li>- na velikim otvorenim prostorima u većini slučajeva će vjetar brzo razrijediti razine CO<sub>2</sub>,</li> <li>- postavljanje kemijskih brtvećih barijera,</li> <li>- prekid utiskivanja.</li> </ul>

## 4. PRAĆENJE STANJA OKOLIŠA - MONITORING

Kako bi se spriječili potencijalni rizici potreban je nadzor (monitoring). Potrebno je provoditi mjerenja određenih parametara kako bi bilo moguće procijeniti kretanje i „ponašanje“ oblaka CO<sub>2</sub>. Podatke dobivene mjerenjem potrebno je usporediti s onima predviđenim modeliranjem i analizama rizika. Modeli se mogu korigirati nakon precizne analize i uspoređivanja podataka. Ležišta s pohranjenim ugljikovim dioksidom je nužno nadzirati stotinama, a u nekim slučajevima i tisućama godina zbog spore geokemijske reakcije.

Razloge za nadziranje skladišta moguće je podijeliti na (Saftić et al., 2011):

- 1) operativne: da bi se kontrolirao i optimalizirao proces utiskivanja;
- 2) sigurnosne i vezane uz zaštitu okoliša: da bi se minimalizirao ili spriječio učinak na čovjeka, životinje i ekosustave u blizini skladišta, i kako bi se osiguralo ublažavanje globalnih klimatskih promjena;
- 3) društvene: da bi se javnosti osigurala informacije vezane uz sigurnost skladišta i kako bi se zadobilo povjerenje javnosti;
- 4) financijske: da bi se osiguralo povjerenje tržišta u tehnologiju CCS-a i potvrdilo da se uskladištene količine CO<sub>2</sub> na taj način smatraju „izbjegnutim emisijama“ u budućim fazama Sheme trgovanja emisijama EU-a.

Tehnički razlozi provođenja monitoringa jesu (Manchao et al., 2011):

- 1) osiguravanje i utvrđivanje volumena utisnutog CO<sub>2</sub>, posebno praćenje stanja utisne bušotine i mjerenje brzine utiskivanja, kao i tlakova na ušću bušotine i u ležištu;
- 2) dokazivanje količine utisnutog CO<sub>2</sub> uskladištenog različitim mehanizmima;
- 3) mogućnost optimizacije projekta skladištenja pomoću saznanja o volumenu skladišta, najprihvatljivijim tlakovima utiskivanja i potrebi bušenja novih bušotina;
- 4) dokazivanje, uz primjerene tehnike monitoringa, da je CO<sub>2</sub> još uvijek zadržan u predviđenim formacijama skladištenja;
- 5) otkrivanje propuštanja (curenja) i pravovremeno upozoravanje na pojave curenja, tako da se na vrijeme može pristupiti mjerama sanacije;
- 6) nadzor stanja bušotina koje se koriste ili koje su napuštene;

- 7) podešavanje i utvrđivanje modela za određivanje provedbe;
- 8) detekcija mikroseizmike povezane s procesima skladištenja.

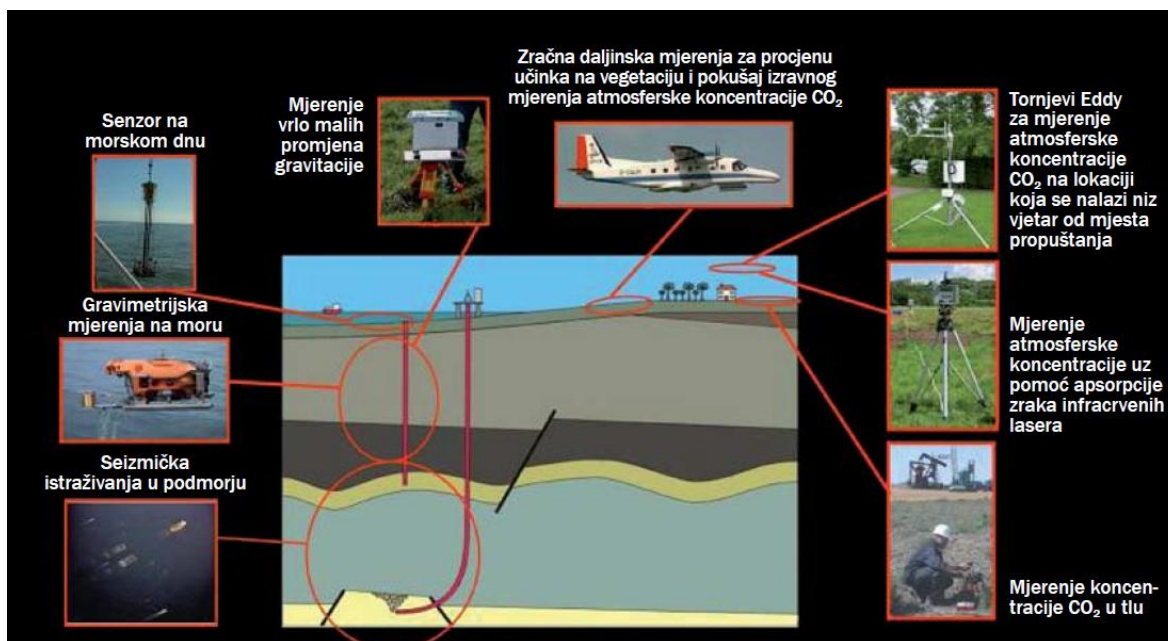
Prije skladištenja, odnosno utiskivanja CO<sub>2</sub>, potrebno je izmjeriti sve parametre koji su potrebni za kontrolu i karakterizaciju lokacije, te kako bi se znalo početno stanje i osnovica za uspoređivanje budućih mjerenja. Preporučljivo je provođenje nekoliko podzemnih ispitivanja tijekom različitih godišnjih doba, jer neka svojstva imaju prirodnu promjenjivost. Potreba za tim se naročito osjeti kod korištenja daljinskih senzora, na primjer seizmičkih senzora. Ovo osobito vrijedi za tehnologije seizmičkih i drugih daljinskih očitavanja, gdje se identifikacija zasićenja fluida s CO<sub>2</sub> zasniva na komparativnoj analizi.

Mjerenje parametara utiskivanja CO<sub>2</sub> je uobičajena praksa na naftnim i plinskim poljima, te su mjerni instrumenti za tu svrhu dostupni na tržištu. Mjerenja se provode mjeračima (*engl. gauges*) na ušću bušotine ili prstenastom prostoru tubinga (*engl. injection tube*). Preciznost mjerenja ovisi o brojnim faktorima. Za povećanje preciznosti mjerenja vrlo važno je precizno određivanje gustoće smjese CO<sub>2</sub>. Male promjene u temperaturi, tlaku i sastavu mogu imati veliki utjecaj na gustoću smjese. Mjerenja tlaka utiskivanja na površini i u geološkim formacijama se također uglavnom provode. U većini utisnih bušotina mjerači su postavljeni kroz otvore u uvodnoj zaštitnoj koloni u blizini ušća bušotine. Mjerenja tlakova u bušotini su uobičajena praksa. Široki rasponi senzora tlaka dostupni su i pogodni za praćenje tlakova na ušću ili u formacijama. Podaci o tlakovima su stalno dostupni i stalno se prate. Mjerači tlaka na površini često su povezani sa zapornim ventilima koji zaustavljaju ili smanjuju tlak utiskivanja do određene granice, ako tlak prijeđe unaprijed određene maksimalno dopuštene vrijednosti, ili ako dođe do pada tlaka zbog propuštanja. Dostupni su senzori tlaka i temperature od optičkih vlakana, te bi takvi senzori trebali omogućiti točnije podatke kao i bolju kontrolu bušotine. Trenutna tehnologija je pogodnija za mjerenje stope (brzine) utiskivanja i tlakova na vrhu bušotine. U kombinaciji s temperaturnim mjerenjima ti podaci nam omogućuju dobivanje podatka o stanju CO<sub>2</sub> (superkrično, tekuće ili plinovito) i preciznim vrijednostima o količinama utisnutog CO<sub>2</sub>. Ti podaci mogu se koristiti za provjeru i moguće poboljšanje usvojenog modela. Slika 4-1 prikazuje metodologiju koja se može koristiti za dugoročnu analizu integriteta bušotine.



**Slika 4-1.** Opća metodologija za analizu integriteta bušotine (Manchao et al., 2011)

Način na koji se CO<sub>2</sub> širi i kreće u podzemlju može se pratiti na nekoliko načina. Već se primjenjuje širok raspon metoda praćenja u demonstracijskim i istraživačkim projektima. Postoje metode kojima se izravno prati CO<sub>2</sub> 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. Na slici 4-2 prikazane su metode praćenja raznih komponenti CCS-a.



**Slika 4-2.** Metode za praćenje raznih komponenti sustava skladištenja CO<sub>2</sub> (Saftić et al., 2011)

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, od kojih su mnoge dobro razrađene u naftnoj i plinskoj industriji, pa se sada prilagođavaju opažanju CO<sub>2</sub>. Već se istražuje optimalizacija postojećih metoda i razvoj inovativnih postupaka s ciljem povećanja pouzdanosti, smanjivanja troškova, automatizacije postupaka i demonstracijske učinkovitosti.

Glavno pitanje sigurnosti CCS-a odnosi se na operativnu fazu, jer nakon što utiskivanje završi lokacija postaje sigurnija zbog pada tlaka. Projektiranje i kontrola operacija CCS-a temelje se uglavnom na iskustvu naftne i plinske industrije, posebno na sezonskom skladištenju prirodnog plina ili metodama povećanja iscrpka nafte.

Glavni parametri koje treba kontrolirati prilikom CCS-a su (Saftić et al., 2011):

- 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 CO<sub>2</sub>,
- integritet utisnih bušotina i bušotina smještenih unutar ili u blizini širenja oblaka CO<sub>2</sub>;
- širenje oblaka CO<sub>2</sub> i otkrivanje propuštanja,
- stabilnost tla.

U tablici 4-1 sažete su metode monitoringa, parametri mjerenja i primjeri njihove primjene.



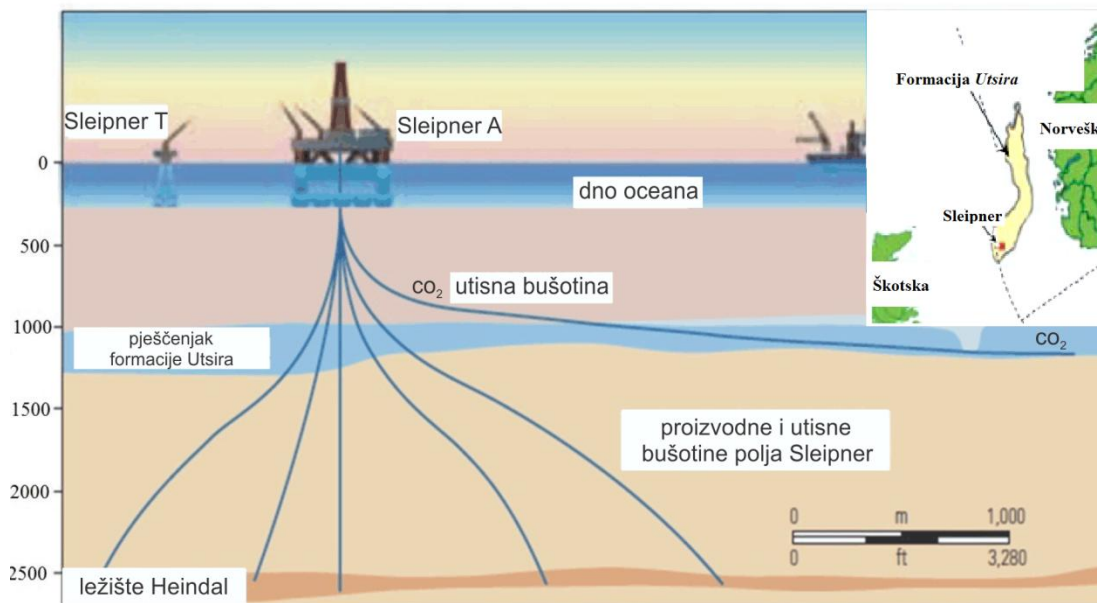
**Tablica 4-1.** Različite metode monitoringa i njihove primjene na projekte skladištenja CO<sub>2</sub>  
(Manchao et al.,2011)

Metoda mjerenja	Parametri mjerenja	Primjer primjene
Obilježivači	(1) Vrijeme putovanja (2) Raspodjela CO <sub>2</sub> u vodi ili nafti (3) Utvrđivanje izvora CO <sub>2</sub>	(1) Praćenje kretanja CO <sub>2</sub> u skladišnim formacijama (2) Kvantifikacija uzamčivanja otapanjem (3) Praćenje propuštanja
Sastav vode	(1) CO <sub>2</sub> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (2) Glavni ioni (3) Elementi u tragovima (4) Salinitet	(1) Kvantifikacija uzamčivanja otapanjem i mineralnog uzamčivanja (2) Kvantifikacija interakcije CO <sub>2</sub> -voda-stijena (3) Otkrivanje propuštanja u plitke podzemne vodonosnike
Tlakovi u podzemlju	(1) Slojni tlak (2) Tlak u prstenastom prostoru (3) Tlak podzemnih vodonosnika	(1) Kontrola slojnog tlaka ispod tlaka frakturiranja (2) Stanje kanala bušotine i utisne cijevi (tubinga) (3) Istjecanje iz ležišta
Karotaža bušotine	(1) Salinitet slojne vode (2) Akustična brzina (3) Zasićenje CO <sub>2</sub>	(1) Praćenje kretanja CO <sub>2</sub> u i iznad skladišne formacije (2) Praćenje migracije slojne vode u plitke vodonosnike (3) Kalibriranje seizmičkih brzina za 3D seizmička istraživanja
3D seizmika	(1) Brzina P i S valova (2) Refleksija (3) Prigušenja amplitude	Praćenje kretanja CO <sub>2</sub> u i iznad skladišne formacije
Vertikalno seizmičko profiliranje i praćenje seizmičke refleksije	(1) Brzina P i S valova (2) Refleksija (3) Prigušenja amplitude	(1) Otkrivanje detaljne raspodjele CO <sub>2</sub> u ležištu (2) Otkrivanje ispuštanja kroz rasjede i frakture
Pasivno seizmičko praćenje	Lokacija, magnituda i karakteristike izvora seizmičkih pojava	(1) Razvoj mikropukotina u formaciji ili pokrovnim stijenama (2) Putovi migracije CO <sub>2</sub>
Električne i elektromagnetske tehnike	(1) Specifična vodljivost formacije (2) Elektromagnetska indukcija	(1) Praćenje kretanja CO <sub>2</sub> u i iznad skladišne formacije (2) Detekcija migracije slojne vode u plitke vodonosnike
Gravitacijska mjerenja u vremenskim	Promjena gustoće uzrokovana istisninom	(1) Praćenje kretanja CO <sub>2</sub> u i iznad skladišne formacije (2) Bilanca mase CO <sub>2</sub> u

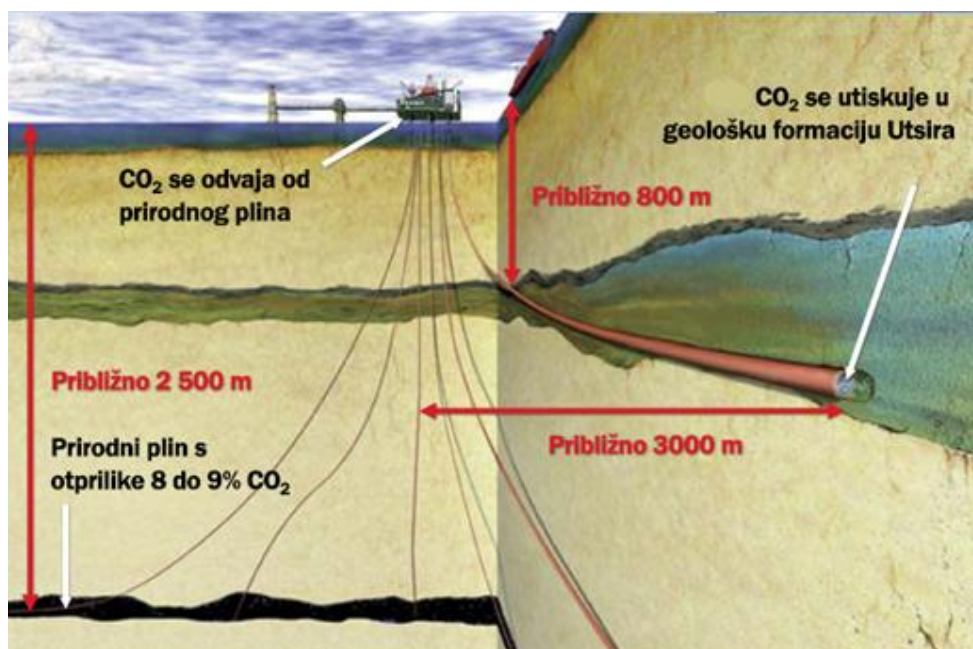
intervalima	tekućine	podzemlju
Mjerenje nagiba	(1) Nagib (2) Vertikalni i horizontalni pomaci korištenjem interferometrije i GPSa	(1) Detekcija geomehaničkih učinaka na ležišnu formaciju i pokrovnu stijenu (2) Lociranje migracijskih puteva CO <sub>2</sub>
Daljinsko snimanje avionima(LIDAR) ili satelitski	Hiperspektralno snimanje lokacije	Utjecaj na vegetaciju
Praćenje ispuštanja CO <sub>2</sub> na površini zemlje pomoću komore (balona)	Ispuštanja CO <sub>2</sub> između površine zemlje i atmosfere	Otkrivanje, lociranje i kvantificiranje istjecanja CO <sub>2</sub>
Uzorkovanje plina u tlu	(1) Sastav plina iz tla (2) Analiza izotopa CO <sub>2</sub>	(1) Detekcija porasta razina CO <sub>2</sub> (2) Utvrđivanje izvora porasta CO <sub>2</sub> u tlu (3) Procjena utjecaja na ekosustave

Kod planiranja strategije monitoringa, odluke koje se donose ovise o geološkim i inženjerskim specifičnostima, a to su: dubina i oblik ležišta, očekivano širenje oblaka CO<sub>2</sub>, potencijalni putovi propuštanja, geološki sastav krovine, brzina toka, vrijeme utiskivanja te površinskim faktorima kao što su topografija, gustoća naseljenosti, infrastruktura i ekosustavi. Svaki program monitoringa mora biti fleksibilan kako bi se razvijao zajedno s procesom skladištenja. Primjenjivost različitih tehnika se razlikuje od ležišta do ležišta od lokacije do lokacije. Studija o nadzoru (monitoringu) provedena je na plinskom polju Sleipner u središtu Sjevernog mora gdje se godišnje utiskuje jedna Mt CO<sub>2</sub> od rujna 1996. godine. Prirodni plin, koji se crpi s dubine od 2 500 m, sadrži određen postotak CO<sub>2</sub> koji treba biti uklonjen da bi plin bio u skladu s komercijalnim standardima. Koncentracija CO<sub>2</sub> u sastavu prirodnog plina smanjuje se s 9% na 2,5% kako bi se zadovoljile tržišne specifikacije, tj. kako bi se izbjegle visoke naknade za emisije u okoliš (oko 45 USD/t). Umjesto da ga se ispusti u atmosferu, CO<sub>2</sub> se nakon kaptiranja utiskuje na dubinu od otprilike 1000 m u pješčane slojeve zasićene slanom vodom formacije „Utsira“. Na projektu se 1999. godine počelo sa monitoringom ponašanja CO<sub>2</sub> i postavljena je osnovica za prva seizmička mjerenja. Projekt se provodi u 3 faze (faze 0, 1 i 2). Posljednja faza

obuhvaća interpretaciju podataka uključujući provjeru programa monitoringa i predviđenih modela. Na slikama 4-3 i 4-4 prikazani su lokacija, pojednostavljeni prikaz projekta i vertikalni prikaz CCS projekta Sleipner.



**Slika 4-3.** Pojednostavljeni prikaz projekta skladištenja CO<sub>2</sub> Sleipner (dodana slika lokacije iz slike preuzete od: Bennaceur et al., 2004)



**Slika 4-4.** Vertikalni presjek lokacije Sleipner u Norveškoj (Saftić et al., 2011)

U tablici 4-2 prikazane su metode nadzora koji se primjenjuju na najvećim CCS projektima u svijetu, korištene tehnike označene su žutim poljima.

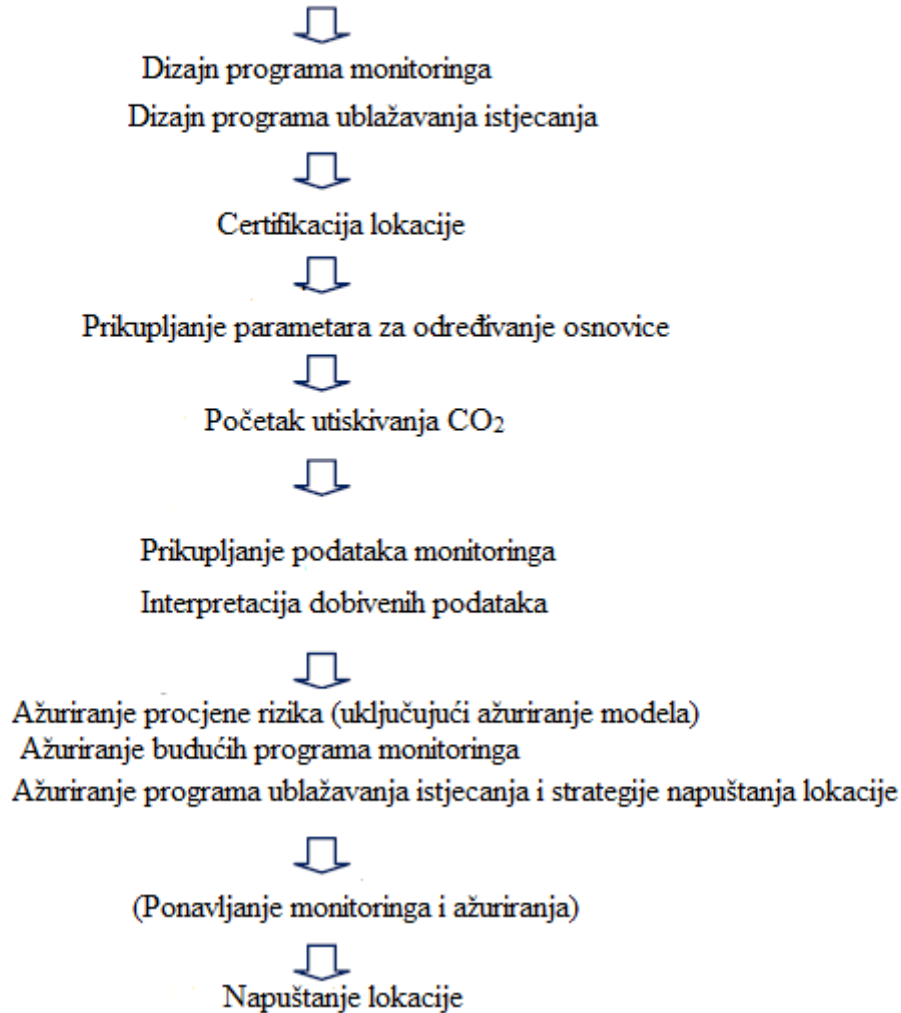
**Tablica 4-2.** Metode nadzora koje se primjenjuju na velikim CCS projektima (Wildenborg et al., 2009)

	Potpovršinski nadzor								Nadzor na površini i u blizini površine				
	Seizmičke metode				Ne-seizmičke metode								
	4D površinska seizmika	2D seizmika visoke rezolucije	Seizmika bušotine / vertikalno seizmičko profiliranje	Mikroseizmika	Elektromagnetska provodljivost	Gravimetrija	Tilometri	Protok i tlak u bušotini	Sutimanje morskog dna	Plin u tlu	Mjerenje površinskih i atmosferskih razina	Nadzor ekosustava	Satelitski nadzor (inSAR)
In Salah													
Sleipner													
Snøhvit													

Prema članku 13 Direktive o CCS-u Europske Unije sve države članice moraju osigurati obvezu provođenja nadzora lokacije skladištenja CO<sub>2</sub>, skladišnog kompleksa i okoliša, u skladu s predviđenim planom monitoringa. Koncept monitoringa za određenu lokaciju skladištenja mora biti odabran u skladu s: okolišem i geografskim uvjetima, opsegom podzemnih geoloških formacija, mogućim utjecajem bilo koje metode na infrastrukturu, dugoročnim i kratkoročnim utjecajem na okoliš i ljudsko zdravlje, utjecajem na postojeće poslove i industriju u okolini te ekonomskom isplativosti metoda. Okoliš, površinski i uvjeti u podzemlju, te lokalna infrastruktura se razlikuju od lokacije do lokacije tako da je potreban specifičan plan monitoringa za svaku lokaciju. Plan monitoringa mora se redovito ažurirati uzimajući u obzir promjene u procjeni rizika istjecanja, utjecaju na ljudsko zdravlje i okoliš, nove znanstvene spoznaje i poboljšanja u najboljim dostupnim tehnologijama. Novi plan monitoringa ponovno mora biti odobren od nadležnog tijela (European Union, 2009). Na slici 4-5 prikazan je tijek procesa za procjenu, monitoring i verifikaciju projekta skladištenja CO<sub>2</sub>.

Procjena lokacije:

- geološka karakterizacija
- kratkoročna i dugoročna karakterizacija (protjecanje fluida, geomehanika, geokemija)
- procjena rizika



**Slika 4-5.** Generički tijek procesa za procjenu, monitoring i verifikaciju projekta skladištenja CO<sub>2</sub> preuzet iz CO<sub>2</sub>ReMoVe projekta (Wildenborg et al., 2009)

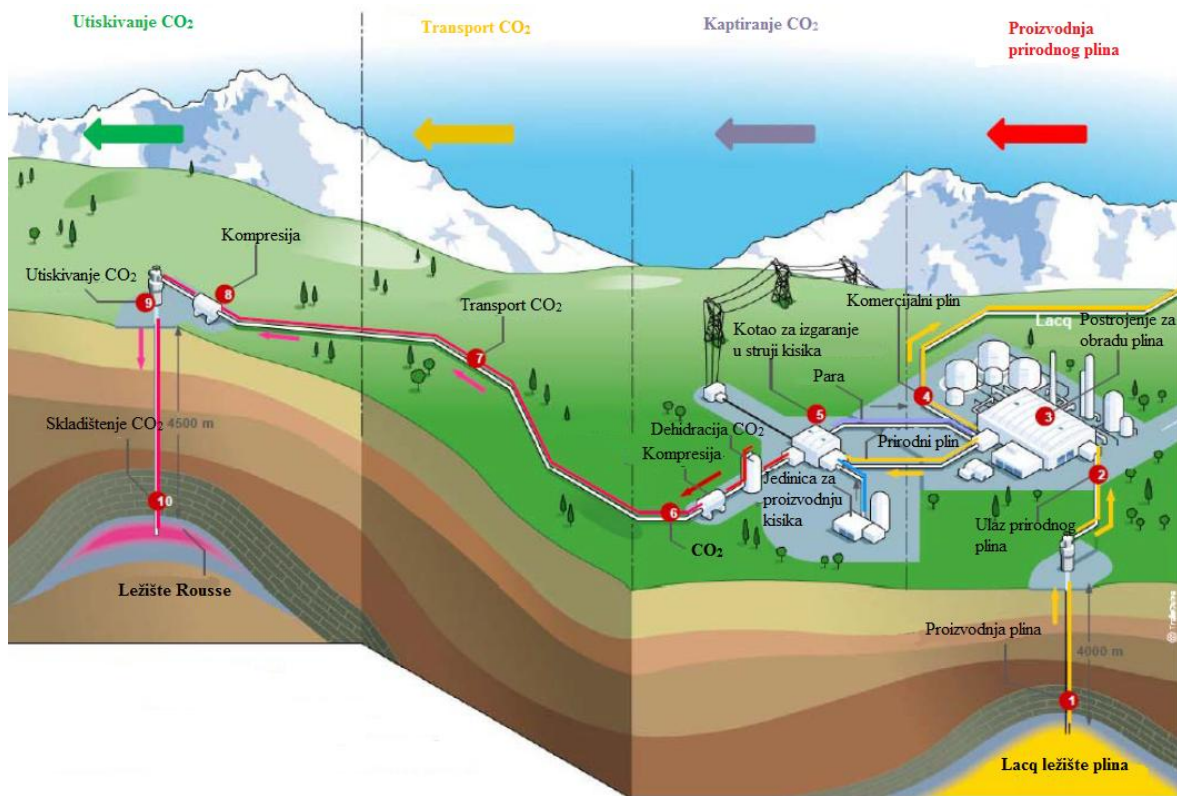
#### 4.1. PRIMJER MONITORINGA – LACQ, FRANCUSKA

Autor Jacques Monne ,u svom članku „*The Lacq CCS Pilot, a First*“, opisuje primjer monitoringa kojeg provodi francuska naftna kompanija Total. Članak je predstavljen na SPE internacionalnoj konferenciji o zdravlju, sigurnosti i okolišu u istraživanju i proizvodnji nafte i plina koja je 2012. održana u Perth-u (Australija). Projekt je detaljno opisan u knjizi naslova „*Carbon capture and storage, The Lacq pilot*“ 2015.

U skladu s postavljenim ciljevima, na području poboljšanja energetske učinkovitosti svojih industrijskih objekata, smanjenja spaljivanja plinova, ulaganja u korištenje alternativnih izvora energije te sudjelovanja u mnogim programima istraživanja i razvoja CCS-a, kompanija Total je 2006. godine odlučila uložiti 60 milijuna eura u demonstracijski projekt kaptiranja, transporta i utiskivanja CO<sub>2</sub> u iscrpljeno ležište plina u području bazena Lacq u jugozapadnoj Francuskoj, 800 km od Pariza i 5 km južno od grada Pau (140 000 stanovnika).

Specifičnost ovog projekta očituje se u njegovoj veličini, primjeni kotla za izgaranje u struji kisika od 30 MW toplinske energije, u izboru iscrpljenog ležišta plina (jedinствeno u Europi), koje se nalazi na kopnu 5 km od grada Pau. Osim toga, ovaj projekt je poseban i po opsegu potpuno integriranog industrijskog lanca koji obuhvaća pridobivanje, obradu i izgaranje prirodnog plina, proizvodnju pare pod visokim tlakom te kaptiranje, transport i utiskivanje CO<sub>2</sub>.

Projekt je uključivao zamjenu postojećeg kotla zrak-plin, kotlom za izgaranje u struji kisika. Kotao parom snabdijeva postrojenje za obradu prirodnog plina Lacq. Primjenom kotla za izgaranje u struji kisika nastaju dimni plinovi koji se uglavnom sastoje od CO<sub>2</sub> i vodene pare, s time da udio CO<sub>2</sub> iznosi više od 80 % volumena, što omogućuje lakše kaptiranje CO<sub>2</sub>. Korišteni kotao za izgaranje u struji kisika od 30 MW toplinske energije može isporučiti 38 t/h pare u postrojenje za proizvodnju i obradu prirodnog plina iz ležišta Lacq. Nakon izdvajanja iz dimnog plina, CO<sub>2</sub> se komprimira (do 27 bar), suši i transportira cjevovodima u plinovitom stanju do 29 kilometara udaljene lokacije za utiskivanje, gdje se utiskuje u iscrpljeno ležište plina Rouse, kao što je prikazano na slici 4-6 (Monne, 2012).



**Slika 4-6.** Grafički prikaz CCS projekta Lacq (Monne, 2012)

Zamjena kotla započeta je 2009. godine, a cijeli CCS projekt, uključujući utiskivanje, započet je 8. siječnja 2010. Utiskivanje je završeno 15. ožujka 2013. Tijekom 39 mjeseci utiskivanja utisnuto je više od 51000 tona CO<sub>2</sub> (Total, 2015).

Glavni ciljevi kompanije Total u ovom projektu bili su (Monne, 2012) :

- dokazivanje tehničke izvedivosti i pouzdanosti kaptiranja, transporta i utiskivanja CO<sub>2</sub> uz proizvodnju pare,
- stjecanje operativnog iskustva i podataka u svrhu povećanja primjene tehnologije izgaranja u struji kisika u industriji uz smanjenje troškova,
- razvoj metodologija praćenja koje će služiti za buduće projekte.

Primjena tehnologije izgaranja u struji kisika smanjuje emisije CO<sub>2</sub> sa 205 kg CO<sub>2eq</sub> po toni pare na 89 kg CO<sub>2eq</sub> po toni pare poslana u postrojenje za obradu plina.

Testno utiskivanje sastojao se od jedinice za separaciju kisika iz zraka, kotla za izgaranje u struji kisika, kontaktne kolone za izravno hlađenje, kolone za sušenje i cjevovoda za transport do lokacije utiskivanja gdje se nalazio kompresor za utiskivanje i utisna bušotina.

Utisna bušotina bila je opremljena sa 4 senzora tlaka, 4 senzora temperature i 3

mikroseizmička senzora (Monne, 2012).

Mikroseizmički sustav nadzora koristio se kako bi identificirali bilo kakve mehaničke utjecaje utiskivanja na ležište i pokrovnu stijenu koji bi mogli utjecati na integritet skladištenja. Sastoji se od sedam plitkih bušotina dubine 200 metara sa po četiri mikroseizmička senzora u svakoj. Šest bušotina postavljeno je u radijusu od 2 kilometra od utisne bušotine, a sedma na lokaciji utisne bušotine. Tri mikroseizmička senzora postavljena su u utisnu bušotinu na dubini od 4200 do 4400 metara. U blizini sedme bušotine postavljen je seizmometar koji je detektirao i bilježio prirodna podrhtavanja tla (Monne, 2012).

#### **4.1.1. PROGRAM MONITORINGA**

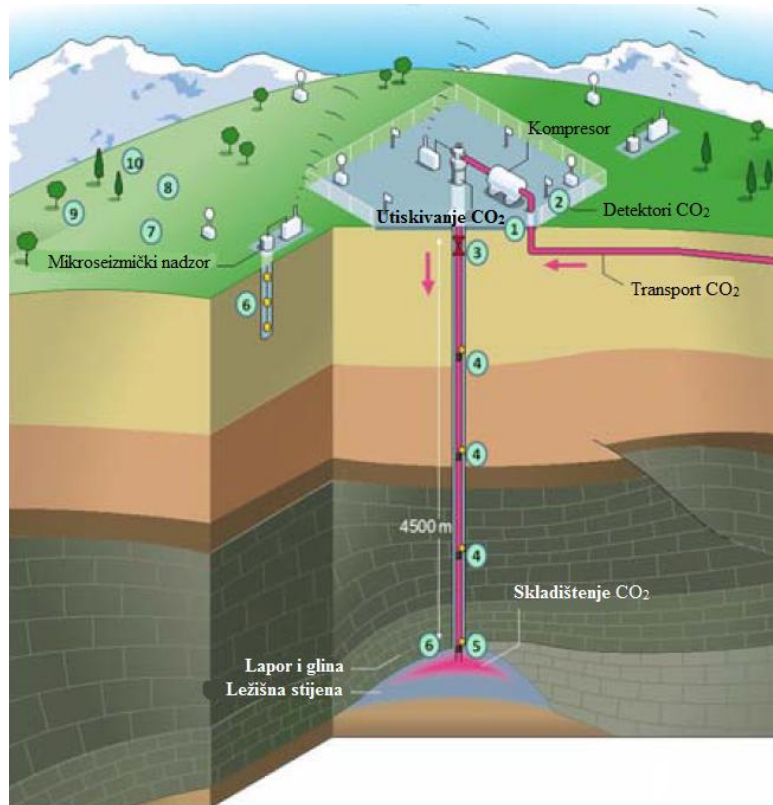
Program monitoringa osmišljen je u razdoblju 2007. – 2008. godine te je prilagođen specifičnim karakteristikama lokacije (npr. vrlo duboko ležište) kako bi pružio ključne informacije i podatke o ležištu, utisnoj bušotini, sloju u koji se utiskuje i pokrovnim stijenama. Službenim odobrenjima od strane francuske uprave propisani su aspekti praćenja. Početni plan nadzora predvidio je nadzor utiskivanja u trajanju od tri i pol godine (do srpnja 2013.) te tri godine nadzora nakon utiskivanja (od srpnja 2013. do srpnja 2016.). Ciljevi programa su: utvrditi zadržavanje plina u ležištu (nepostojanje migracije iz ležišta prema gore kroz kanal bušotine ili pokrovnu stijenu, nepostojanje migracije u podzemne vode i prema površini, nepostojanje utjecaja na biosferu i ljudsko zdravlje), mjerenje brzine protjecanja i sastava utisnutog plina, praćenje stanja bušotine, utvrditi da se CO<sub>2</sub> ponaša kao što je to predviđeno izradom modela, prikupljanje podataka potrebnih za kalibraciju alata i ažuriranje predviđenog modela (Monne, 2012). Na slici 4-7 prikazan je sustav monitoringa na CCS pilot projektu Lacq.

Praćeni su sljedeći parametri (Monne, 2012):

1. sastav struje CO<sub>2</sub>, koncentracija i protok (stalno),
2. atmosferske koncentracije CO<sub>2</sub> na lokaciji utisne bušotine (stalno),
3. tlak u prstenastom prostoru kanala bušotine (stalno),
4. tlak i temperatura duž kanala utisne bušotine (stalno),
5. ležišni tlak i temperatura (stalno),



6. integritet ležišta i pokrovnih stijena (mikroseizmičko praćenje: stalno),
7. koncentracije plina u tlu (prema periodično organiziranim kampanjama),
8. kvaliteta podzemnih voda (prema periodično organiziranim kampanjama),
9. kvaliteta površinskih voda (prema periodično organiziranim kampanjama),
10. bioraznolikost ekosustava (godišnja provjera flore i faune).



**Slika 4-7.** Grafički prikaz sustava monitoringa na CCS pilot projektu Lacq (Monne, 2012)

U tablici 4-3 prikazan je godišnji plan monitoringa pilot projekta Lacq.

**Tablica 4-3.** Godišnji plan monitoringa na pilot projektu Lacq (Monne, 2012)

				Zima	Proljeće	Ljeto	Jesen
Okoliš	Kvaliteta vode	Površinske vode (rijeke)	Kemija				
			Bioindikator				
		Freatski akvifer (izvori)	Kemija				
		Podzemne vode	Kemija				
	Ekosustavi	Fauna					
		Flora					
	Plin u tlu						
Lokacija	Ležište i pokrovne stijene	Mikroseizmika + tlak i temperatura					
	Utisna bušotina	Senzori CO <sub>2</sub>					
		Tlak u prstenastom prostoru					
		Tlak i temperatura					
		Protok, sastav					
Dodatno (U svrhu istraživanja i razvoja)	Plin u tlu	Izotop C, inertni plin, radon					
	Freatski akvifer	6 m dubok plitki zdenac	Kemija				
		80 m dubok plitki zdenac	Kemija, razina vode				
		Izvori	Kemija				
	Atmosferske koncentracije CO <sub>2</sub>	Toranj sa senzovima					
		Infracrveni laser i LIDAR					

Monitoring okoliša i lokacije bio je dogovoren s nadzornim tijelom, a dodatne parametre monitoringa odredila je kompanija Total u svrhu istraživanja i razvoja CCS-a. Na temelju podataka prikazanih u tablici 4-3 vidi se da se monitoring parametara u bušotini, ležišta i pokrovnih stijena provodio stalno. Monitoring okoliša provodio se u određenim godišnjim dobima, na primjer vidimo da se kvaliteta voda ispitala u proljeće i jesen. U svrhu istraživanja i razvoja stalno su nadzirani freatski akviferi i atmosferske koncentracije CO<sub>2</sub> u zraku.

## 5. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme kad se čovječanstvo sve više suočava sa svojim dugotrajnim utjecajem na okoliš, prioritet postaje očuvanje okoliša i ublažavanje klimatskih promjena. Razine CO<sub>2</sub> u atmosferi drastično rastu i osim mjera smanjenja emisija potrebno je i njegovo uklanjanje iz atmosfere. Kao jedna od najpogodnijih i najefikasnijih opcija je primjena tehnologije kaptiranja i geološkog skladištenja CO<sub>2</sub>. S obzirom na zahtjeve o smanjenju emisija CO<sub>2</sub> i sve strože ekološke standarde proizvedeni CO<sub>2</sub> moguće je na trajan i siguran način ukloniti iz atmosfere. Kaptiranje i geološko skladištenje CO<sub>2</sub> smatra se tehnologijom premošćenja, koja bi trebala osigurati vrijeme za razvoj novih tehnologija i infrastrukture za prijelaz na obnovljive izvore energije koji ne štete klimi. S obzirom da je kaptiranje i geološko skladištenje CO<sub>2</sub> relativno nova tehnologija ona je još uvijek u razvoju i ima puno prostora za napredak. Postojeća znanja i tehnologije iz naftne i plinske industrije uvelike dopridonose tehnologiji kaptiranja i geološkog skladištenja CO<sub>2</sub>.

Ključni kriteriji kaptiranja i geološkog skladištenja su sigurnosni kriteriji i njima se pridaje najveća važnost. Kako bi se ispunila svrha ove tehnologije od ključne je važnosti spriječiti bilo kakvo moguće istjecanje ili migraciju utisnutog CO<sub>2</sub> iz ležišta. Zbog toga je vrlo važno od samog početka planiranja projekta, pa nadalje u obzir uzeti sve potencijalne rizike. Osim analize i procjene rizika najvažniji dio za provođenje uspješnog projekta je nadzor, odnosno plan nadzora koji omogućava detekciju bilo kakvih neplaniranih i neželjenih događaja tijekom projekta. Također za sigurno provođenje projekta određuju se i mjere ublažavanja rizika i korektivne mjere ukoliko dođe do bilo kakvih akcidentnih situacija.

Može se reći da je kaptiranje i geološko skladištenje CO<sub>2</sub> vrlo sigurna tehnologija ako se provodi u skladu s direktivama, propisima i stečenim znanjima. Pod tim se podrazumjeva pravilan odabir lokacije skladištenja, pravilna procjena i upravljanje rizicima, te pravilan plan nadzora.

## 6. LITERATURA

1. AARNES, L., CARPENTER, M., FLACH, T., SOLOMON, S., SOTHE, O. K., JOHASEN, K., RØSNES, O., 2010. CO<sub>2</sub>QUALSTORE: Guideline for selection and qualification of sites and projects for geological storage of CO<sub>2</sub>. — Det Norske Veintas repon no. 2009-1425
2. BENNACEUR, K., MONEA, M., SAKURAI, S., GUPTA, N., RAMAKRISHNAN, T.S., WHITTAKER, S. & RANDEN, T. (2004): CO<sub>2</sub> capture and storage a solution within. Oilfield Review, 16, 3, 44-61.
3. BENSON, S. M., 2006. Assessment of Risks from Storage of Carbon Dioxide in Deep Underground Geological Formations. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley
4. COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2008. Commission staff working document - Accompanying document to the Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the geological storage of carbon dioxide - Summary impact assessment
5. EUROPEAN COMMISSION, 2011a. Implementation of Directive 2009/31/EC on the Geological Storage of Carbon Dioxide. Guidance Document 1. CO<sub>2</sub> Storage Life Cycle Risk Management Framework. (GD 1)
6. EUROPEAN COMMISSION, 2011b. Roadmap to a Resource Efficient Europe. Brussels, 20.9.2011
7. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2011. Air pollution impacts from carbon capture and storage (CCS), EEA Technical report No 14/2011, Copenhagen
8. EUROPEAN UNION, 2009. DIRECTIVE 2009/31/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament

and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006

9. EUROPSKA KOMISIJA, 2014. Izvješće komisije europskom parlamentu i vijeću o provedbi Direktive 2009/31/EZ o geološkom skladištenju ugljikovog dioksida. Bruxelles, 25.2.2014. COM(2014) 99 final
10. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2010. The influence of CO<sub>2</sub> on well cement. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol. 22, str. 19-25, Zagreb, 2010
11. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2015. Nastavni materijali iz kolegija Utiskivanje otpada iz naftnog rudarstva u bušotine. Sveučilište u zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet
12. GAURINA-MEĐIMUREC, N., PAŠIĆ B., (2011). Design and Mechanical Integrity of CO<sub>2</sub> Injection Wells, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Zagreb, Vol 23, str. 1-8
13. GORIČNIK, B., SAFTIĆ, B., VULIN, D., 2007. Brošura „Vraćanje CO<sub>2</sub> u podzemlje“. Brošura je izrađena u okviru projekta CO2NETEAST, koji financira Europska komisija
14. HANGX S. J. T., 2009. Geological storage of CO<sub>2</sub>: Mechanical and chemical effects on host and seal formations
15. HRNČEVIĆ, L., 2008. Analiza utjecaja provedbe kyoto protokola na naftnu industriju i poslovanje naftne tvrtke. Doktorska disertacija, Zagreb: Rudarsko geološko naftni fakultet
16. HRNČEVIĆ, L., 2014. Nastavni materijali iz kolegija Zaštita zraka. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet
17. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2005. Carbon dioxide capture and storage. Published in the United States of America by Cambridge

University Press, New York

18. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2008a. Energy Technology Analysis, CO<sub>2</sub> capture and storage: A key carbon abatement options
19. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2008b. Energy Technology Perspectives 2008, Scenarios & Strategies to 2050
20. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2009a. Technology Roadmap, Carbon capture and storage
21. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2009b. Energy Technology Transitions for Industry: Strategies for the Next Industrial Revolution
22. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION (UNIDO), 2011. Technology Roadmap Carbon Capture and Storage in Industrial Application, OECD/ International Energy Agency and United Nations Industrial Development Organization
23. KORRE A., DELPRAT-JANNAUD F., PIESSENS K., WELKENHUYSEN K., FALUS G., VÄHÄKUOPUS T., NORDBÄCK N., POULSEN N., WICKSTRÖM L., DUDU A., VINCENT C. J., CAR M., WÓJCICKI A., ARTS R., HLADIK V., MOLINERO R., MARTINEZ R., KOMATINA S., AKERVOLL I., BRÜSTLE A. K., GÖTZL G., BRIKMANE B., HATZIGNATIOU D., 2014. State-of-the-art of directives and regulatory regimes related to operational and safety risks. CGS Europe report No. D3.5, Korre, A. and Delprat-Jannaud F. (Eds.), February 2014, 125 p.
24. LALE, S., KRILE, S., ČAVAR, S., LALE, D. 2014. Primjena Bayesove mreže u analizama rizika u pomorstvu. NAŠE MORE : znanstveno-stručni časopis za more i pomorstvo, 62(1 Supplement). doi:10.17818/NM.1.10.2015
25. MANCHAO H., SOUSA L., SOUSA R., GOMES A., 2011. Risk assessment of CO<sub>2</sub> injection processes and storage in carboniferous formations: a review. Journal of Rock

26. MONNE, J., 2012. The Lacq CCS Pilot, a First. SPE 157157, Presented at the SPE/APPEA International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production held in Perth, Australia, 11—13 September 2012
27. NOVAK, K., 2015. Modeliranje površinskoga transporta i geološki aspekti skladištenja ugljikova dioksida u neogenska pješčenjačka ležišta Sjeverne Hrvatske na primjeru polja Ivanić. Doktorska disertacija, Zagreb: Rudarsko geološko naftni fakultet
28. NOVOSEL, D., 2009. Učinak ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, 162 p., Zagreb
29. OSPAR, 2007. Guidelines for Risk Assessment and Management of Storage of CO<sub>2</sub> Streams in Geological Formations
30. RÜTTERS. H., MÖLLER. I., MAY. F., FLORNES. K., HIADIK. V., ARVANITIS. A., GÜLEC. N., BAKILER. C., DUDU. A., KUCHARIC. L., JUHOJUNTTI. N., SHOGENOVA. A., GEORGIEV. O., 2013. State-of-the-art of monitoring methods to evaluate CO<sub>2</sub> storage site performance. CGS Europe report No. D3.3, Kone. A.. Stead. R.. Jensen. N.B. (Eds.). July 2013. 109 p
31. SAFTIĆ, B., KURELEC, Ž., KICHL, A., 2011. Brošura „Što zapravo znači geološko skladištenje CO<sub>2</sub>?“ Hrvatsku verziju izdalo je Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet u okviru projekta »CGS Europe: Paneuropska koordinirana akcija za geološko skladištenje CO<sub>2</sub>« Sedmog okvirnog programa za istraživanje i razvoj EU-a
32. TOTAL, 2015. Carbon and capture storage, The Lacq pilot (Project and injection period 2006-2013)

33. WILDENBORG, T., BENTHAIN, M., CHADWICK, A., DAVID, P., DEFLANDRE, J. P., DILLEN, M., GROENENBERG, H., KIRK, K., LE GALLO, Y., 2009. Large-scale CO<sub>2</sub> injection demos for the development and verification technology and guidelines (COPeMoVe). Energy Procedia 1, 2367-2374

### **Web izvori**

1. CO2GEONET, 2015., CO2GEONET CONTRIBUTION TO COP21, Pariz.  
URL: <http://cop21.co2geonet.com> (7.2.2017.)
2. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Globalno\\_zatopljenje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Globalno_zatopljenje) (20.11.2016.)
3. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleni%20ki\\_plinovi](https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleni%20ki_plinovi) (20.11.2016.)
4. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleni%20ki\\_efekt](https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleni%20ki_efekt) (20.11.2016.)
5. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html> (5.2.2017.)



## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad samostalno izradio.

---

Matej Majić