

Utiskivanje otpada : tehnološki, regulatorni i okolišni izazovi i mogućnosti

Jakovljević, David

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:169:911052>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-28**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij naftnog rudarstva

**UTISKIVANJE OTPADA: TEHNOLOŠKI, REGULATORNI I OKOLIŠNI
IZAZOVI I MOGUĆNOSTI**

Diplomski rad

David Jakovljević

N 403

Zagreb, 2024.

UTISKIVANJE OTPADA: TEHNOLOŠKI, REGULATORNI I OKOLIŠNI IZAZOVI I MOGUĆNOSTI

David Jakovljević

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Kroz pregled povijesnog razvoja tehnologije, regulative, te rizika povezanih s utiskivanjem, rad istražuje učinkovitost ove metode za smanjenje utjecaja otpada na okoliš. Detaljno su prikazani zakonski okviri u SAD-u i EU, kao i tehnički izazovi u odabiru lokacija i održavanju mehaničkog integriteta bušotina. Unatoč rizicima poput potencijalne kontaminacije podzemnih voda, pravilno regulirane i nadzirane tehnike utiskivanja otpada mogu igrati ključnu ulogu u održivom zbrinjavanju otpada i smanjenju štetnih emisija. Osim toga, razmatra se tehnologija hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida (CCS) kao važan alat u smanjenju emisija stakleničkih plinova, s posebnim primjerima iz europskih projekata poput norveškog Sleipnera.

Ključne riječi: otpad, utisne bušotine, naftna industrija, regulativa, slojna voda, hvatanje i skladištenje CO₂ (CCS).

Završni rad sadrži: 58 stranica, 6 tablica, 16 slika i 58 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr.sc. Karolina Novak Mavar, izvanredna profesorica RGNf-a

Komentor: Dr.sc. Igor Medved, viši asistent

Ocjenjivači: Dr.sc. Karolina Novak Mavar, izvanredna profesorica RGNf-a
Dr.sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNf-a
Dr.sc. Helena Vučenović, docentica RGNf-a

DEEP-WELL WASTE DISPOSAL: TECHNOLOGICAL, REGULATORY AND ENVIRONMENTAL
CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

David Jakovljević

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Through an analysis of the historical development of technology, regulation, and risks associated with deep well injection, this paper covers the effectiveness of this method for reducing the impact of waste on the environment. The legal frameworks in the USA and the EU are presented in detail, as well as the technical challenges in selecting locations and maintaining the mechanical integrity of wells. Despite risks such as potential groundwater contamination, properly regulated and monitored waste injection techniques can play a key role in sustainable waste management and reduction of harmful emissions. In addition, carbon capture and storage (CCS) technology is considered as an important tool in reducing greenhouse gas emissions, with specific examples from European projects such as Norway's Sleipner.

Keywords: waste, injection wells, oil industry, regulation, formation water, carbon capture and storage (CCS).

Thesis contains: 58 pages, 6 tables, 16 figures, and 58 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Karolina Novak Mavar, PhD

Co-supervisor: Senior Assistant Igor Medved, PhD

Reviewers: Associate Professor Karolina Novak Mavar, PhD
Associate Professor Vladislav Brkić, PhD
Assistant Professor Helena Vučenović, PhD

Defence date: September 30, 2024, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS TABLICA	III
POPIS KORIŠTENIH KRATICA	IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA	V
1. UVOD	1
2. POVIJEST BUŠOTINSKOG ZBRINJAVANJA OTPADNIH FLUIDA	3
3. UIC PROGRAM	6
3.1. Klase utisnih bušotina	11
3.2. UIC program po državama	14
3.3. Mehanički integritet utisne bušotine.....	18
4. UTISKIVANJE OTPADA U EUROPI	19
4.1. Zakonska regulativa EU-a iz područja utiskivanja otpada u pogodne stijene.....	19
5. TEHNOLOGIJA UTISKIVANJA OTPADA	23
5.1. Izbor pogodnih lokacija za utiskivanje otpada.....	25
5.2. Kriterij za odabir utisne bušotine	26
6. UTISKIVANJE SLOJNE VODE	29
6.1. Postupanje s proizvedenom slojnom vodom.....	30
6.2. IOGP izvješća o proizvedenoj slojnoj vodi.....	32
6.2.1. Kopno.....	33
6.2.2. More.....	33
7. HVATANJE I SKLADIŠTENJE CO₂.....	35
7.1. Primjeri operativnih CCS projekata	37
7.1.1. Projekt Sleipner, Norveška.....	38
8. AKCIDENTI I RIZICI UTISKIVANJA OTPADA.....	40
8.1. Rizici povezani s utiskivanjem	41
8.2. Primjeri akcidenata utisnih bušotina i njihove posljedice u različitim regijama SAD-a.	43
8.2.1. Miami-Dade, Florida.....	51
8.2.2. Romulus, Michigan.....	52
8.2.3. Vickery, Ohio	52
9. ZAKLJUČAK	53
10. LITERATURA	54

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Približan broj utisnih bušotina po desetljećima.....	3
Slika 3-1. Broj utisnih bušotina po klasama za 2022. godinu.....	10
Slika 3-2. Broj pregleda utisnih bušotina po klasama za 2018. godinu.....	11
Slika 3-3. Klase utisnih bušotina.....	11
Slika 4-1. Hijerarhija gospodarenja otpadom	19
Slika 4-2. Karta trenutno aktivnih i budućih CCS projekata u Europi.....	22
Slika 5-1. a) Utiskivanje kroz prstenasti prostor, b) utiskivanje kroz tubing napuštene bušotine, c) utiskivanje kroz tubing utisne bušotine.....	24
Slika 5-2. Tipična utisna bušotina klase II.....	27
Slika 6-1. Volumen proizvedene slojne vode po regijama	29
Slika 6-2. Svjetske regulatorne regije.....	30
Slika 6-3. Postotak ponovno utisnute slojne vode, izražen kao postotak ukupno proizvedene slojne vode u periodu 2017. - 2021.....	34
Slika 6-4. Odnos utisnute i ispuštene proizvedene slojne vode po regijama u periodu 2019. – 2021.....	34
Slika 7-1. Faze procesa hvatanja i trajnog skladištenja ugljikovog dioksida	35
Slika 7-2. Kapaciteti CCS postrojenja.....	37
Slika 7-3. Ilustracija tehnologije CCS na polju Sleipner.....	39
Slika 8-1. Mogući putevi migracije fluida u a) aktivnoj i b) napuštenoj bušotini	42

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Podaci o broju klasa utisnih bušotina po državama SAD-a.....	8
Tablica 3-2. Primarne provedbene ovlasti klasa utisnih bušotina UIC programa po državama, teritorijima i plemenima SAD-a	16
Tablica 6-1. Glavne komponente vode proizvedene u naftnim poljima	31
Tablica 6-2. Dopuštene granice koje su utvrdile različite regulatorne agencije.....	32
Tablica 7-1. Popis operativnih CCS projekata s kapacitetom hvatanja, transporta i/ili skladištenja većim od 1 Mt/god.....	38
Tablica 8-1. Popis incidenata prilikom utiskivanja po SAD-u.....	44

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

CCS - hvatanje i skladištenje ugljika (engl. *Carbon Capture and Storage*)

EU - Europska unija (engl. *European Union*)

CO₂ - ugljikov dioksid

SAD - Sjedinjene Američke Države

EPA - Agencija za zaštitu okoliša (engl. *Environmental Protection Agency*)

UIC - Program za podzemno utiskivanje (engl. *Underground Injection Control*)

EOR - Povećani iscrpak nafte (engl. *Enhanced Oil Recovery*)

EGR - Povećani iscrpak plina (engl. *Enhanced Gas Recovery*)

IEA - Međunarodna agencija za energiju (engl. *International Energy Agency*)

UIPC - Vijeće za podzemno utiskivanje (engl. *Underground Injection Practices Council*)

IOGP - Međunarodno udruženje proizvođača nafte i plina (engl. *International Association of Oil and Gas Producers*)

GWPC - Vijeće za zaštitu podzemnih voda (engl. *Ground Water Protection Council*)

PCB - Poliklorirani bifenili

LNG - ukapljeni prirodni plin (engl. *Liquefied Natural Gas*)

OSPAR - Konvencija za zaštitu morskog okoliša Sjeveroistočnog Atlantika (engl. *Oslo and Paris Convention for the Protection of the Marine environment of the North-East Atlantic*)

DPR - Odjel za naftne resurse (engl. *Department of Petroleum Resources*)

MIT - Test mehaničkog integriteta (engl. *Mechanical Integrity Test*)

GCCSI - Svjetski institut za hvatanje i skladištenje CO₂ (engl. *Global Carbon Capture and Storage Institute*)

CBL - Karotažno mjerenje kvalitete cementne veze (engl. *Cement Bond Log*)

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	mg/L	gustoća
V	m ³	volumen
-	t/god	kapacitet hvatanja CO ₂
L	m	duljina

1. UVOD

Zbrinjavanje otpada postaje jedno od ključnih pitanja suvremenog društva, posebno u kontekstu industrijske proizvodnje i njenog utjecaja na okoliš. Pitanje upravljanja otpadnim fluidima i čvrstim otpadom, proizvedenim u industrijskim procesima, izaziva sve veći interes, kako zbog mogućih ekoloških posljedica, tako i zbog regulatornih okvira koji postaju sve stroži. Jedna od tehnologija koja se razvila kao odgovor na te izazove je metoda utiskivanja otpada i otpadnih fluida.

Utiskivanja otpada ima dugu povijest, koja se proteže gotovo od početaka naftne industrije. Razvoj ove tehnologije kroz desetljeća odgovarao je potrebama industrije za sigurnim i ekološki prihvatljivim načinima zbrinjavanja nusproizvoda kao što su slojna voda i industrijski otpad. Jedan od prvih dokumentiranih slučajeva utiskivanja otpada zabilježen je 1938. godine u Teksasu, kada je slojna voda utisnuta natrag u iscrpljeno ležište (Texas Department of Water Resources, 1984). Kroz naredne godine, osobito u razdoblju od 1950-ih do 1970-ih, broj utisnih bušotina znatno se povećao, a tehnologija se razvijala kako bi zadovoljile rastuće potrebe naftne industrije (Clark et al., 2005).

Uvođenje strožih regulativa, poput američkog Zakona o zaštiti pitke vode (engl. *Safe Drinking Water Act*, SDWA) 1974. godine i pokretanje Programa za podzemno utiskivanje (engl. *Underground Injection Control*, UIC) pod nadzorom Agencije za zaštitu okoliša (engl. *Environmental Protection Agency*, EPA), smatraju se ključnim koracima u osiguravanju zaštite izvora pitke vode (EPA, 2024a). UIC program regulira sve klase bušotina za utiskivanje u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD), osiguravajući da su one pravilno konstruirane, nadzirane i održavane.

U Europi, tehnologija utiskivanja otpada također se razvijala, s posebnim fokusom na zaštitu okoliša. Europska unija (EU) uspostavila je Okvirnu direktivu o otpadu (Direktiva 2008/98/EC) i druge regulative koje osiguravaju sigurnost i održivost ovog postupka. Norveška predvodi u primjeni tehnologija hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida (engl. *Carbon Capture and Storage*, CCS) kako bi se smanjile emisije stakleničkih plinova, dok je utiskivanje slojne vode široko rasprostranjeno kao metoda zbrinjavanja otpada iz naftne industrije. Slojna voda, nusproizvod pri proizvodnji nafte i plina, predstavlja složeni problem za industriju. Prema procjenama, svjetska proizvodnja slojne vode doseže približno 39,5 milijuna kubičnih metara dnevno, što naglašava obim problema i potrebu za efikasnim metodama obrade i odlaganja (Jimenez et al., 2018).

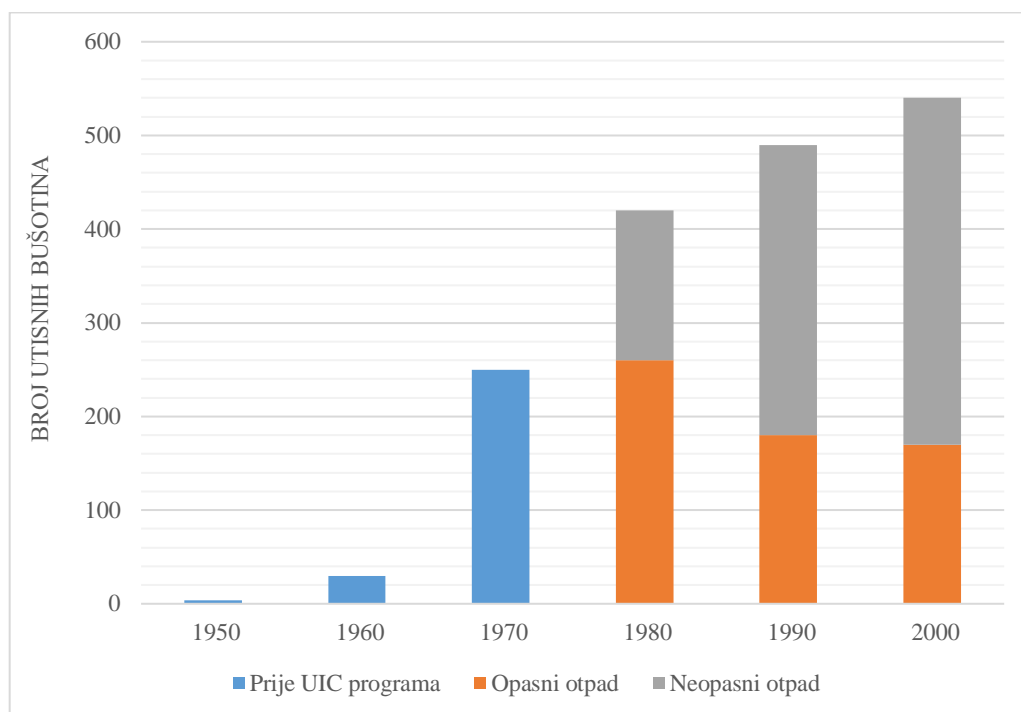
U ovom diplomskom radu, kroz povijesni pregled prakse utiskivanja fluida u podzemlje, te pregled tehnologije, regulative i rizika, istražuje se učinkovitost utiskivanja otpada za smanjenje njegovog utjecaja na okoliš. Detaljno su prikazani zakonski okviri u SAD-u i EU, kao i tehnički izazovi u odabiru lokacija i održavanju mehaničkog integriteta bušotina. Geološke strukture odabrane za utiskivanje otpada moraju biti izuzetno stabilne i nepropusne, kako bi se osigurala dugoročna izolacija otpada od površinskih i podzemnih voda. Unatoč rizicima, poput potencijalne kontaminacije podzemnih voda, pravilno regulirane i nadzirane tehnike utiskivanja otpada mogu igrati ključnu ulogu u održivom zbrinjavanju otpada i smanjenju štetnih emisija.

S obzirom da proizvedena slojna voda čini najviše otpada u industriji nafte i plina, kroz izvješća Međunarodnog udruženja proizvođača nafte i plina (engl. *International Association of Oil and Gas Producers*, IOGP) prikazani su podaci o utisnutoj i ispuštenoj slojnoj vodi na kopnu i moru, te po regijama. Uz to, tehnologija hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida (CCS) razmatra se kao važan alat u smanjenju emisija stakleničkih plinova.

2. POVIJEST BUŠOTINSKOG ZBRINJAVANJA OTPADNIH FLUIDA

Razvoj naftne industrije započinje sredinom 19. st., a ključni događaj koji je obilježio početak moderne naftne industrije zbio se 1859. godine, kada je Edwin Drake izveo prvu uspješnu bušotinu u Titusvilleu, Pennsylvania. U ranim fazama, nusprodukti proizvodnje nafte, poput slojne vode i ostalih tekućih otpadnih materijala, nisu bili pravilno zbrinjavani. Voda, onečišćena različitim anorganskim i organskim tvarima, obično bi se ispuštala u okoliš, što je često rezultiralo kontaminacijom tla i lokalnih vodnih resursa (ACS, 2009).

Praksa utiskivanja fluida u podzemlje se razvijala tijekom nekoliko desetljeća, evoluirajući s napretkom tehnologije i promjenama u regulatornim okvirima, dok prvi pokušaji utiskivanja datiraju iz 1930-ih godina. Ovi rani pokušaji bili su usmjereni na rješavanje problema zbrinjavanja slojne vode (National Research Council, 1994). Prvi dokumentirani projekt zbrinjavanja slojne vode utiskivanjem u geološku formaciju iz koje je iscrpljena, izveden je u Teksasu 1938. godine (Texas Department of Water Resources, 1984). Godine 1950. bile su aktivne četiri utisne bušotine, a do ranih 1960-ih bilo ih je 30. Do 1970-ih, broj utisnih bušotina iznosio je približno 250, što je gotovo deseterostruko povećanje u odnosu na ukupni broj bušotina iz 1960. godine (Slika 2-1.) (Clark et al., 2005).



Slika 2-1. Približan broj utisnih bušotina po desetljećima (izrađeno prema Clark et al., 2005)

Tijekom 1950-ih i 1960-ih godina, tehnologija utiskivanja otpada značajno je napredovala. Razvijeni su osnovni sustavi za kontrolu i nadzor utiskivanja, što je omogućilo sigurnije i učinkovitije operacije. Kako se povećavala proizvodnja kemikalija, tako se povećavala i potreba za utiskivanjem. Utiskivanje se pokazalo sigurnom i jeftinom opcijom za zbrinjavanje neželjenih i često opasnih industrijskih nusproizvoda iz naftne, kemijske, drvne i tekstilne industrije, tako da su pionirski projekti u ovom razdoblju uključivali utiskivanje različitih tekućih industrijskih otpada, uključujući kemijski otpad i otpadne vode iz rafinerija (Smith i Swanson, 1978).

Od donošenja nekoliko zakonskih akata u 1970-ima koji su imali za cilj regulirati odlaganje otpada u vodu, zrak i na odlagališta, korištenje utiskivanja u podzemlje postalo je sve važnije. Samo u naftnoj industriji, oko 24,4 milijarde barela ili 1,02 bilijuna galona proizvedene vode, proizvede se svake godine u SAD-u, iz gotovo milijun naftnih i plinskih bušotina. Od ovog ukupnog broja oko 91,5 % se ponovno utiskuje u podzemlje za odlaganje ili za povećanje iscrpka nafte (engl. *Enhanced oil recovery*, EOR) (GWPC, 2021).

Uvođenje strogih regulatornih okvira bilo je ključno za daljnji razvoj utiskivanja otpada. U SAD-u, donošenjem Zakona o zaštiti pitke vode (engl. *Safe Water Drinking Act*, SDWA), 1974. godine Kongres Sjedinjenih Američkih Država (engl. *United States Congress*) postavio je temelje za regulaciju ove prakse (EPA, 2024a). SDWA je bio ključan za osiguranje da proces utiskivanja otpada ne ugrožava podzemne izvore pitke vode, što je rezultiralo zahtjevom za izdavanjem dozvola za utiskivanje i uspostavom sustava za praćenje sigurnosti (EPA, 1994). Ovaj zakon postavio je temelje za Program utiskivanja otpada u podzemlje (UIC) koji je implementirala Agencija za zaštitu okoliša (EPA). Od 1980-ih godina doneseni su savezni UIC propisi koji definiraju pet klasa utisnih bušotina i postavljaju minimalne standarde koje državni programi moraju ispuniti da bi dobili primarnu odgovornost za provedbu UIC propisa. Različite klase bušotina imaju specifične karakteristike i regulatorne zahtjeve, prilagođene zaštiti podzemnih voda i okoliša. Od 2010. godine, kada je EPA finalizirala propise za geološku sekvestraciju CO₂ koristeći postojeći regulatorni okvir UIC-a, modificiran kriterijima i standardima specifičnim za geološku sekvestraciju, uvedena je nova klasa utisnih bušotina (klasa VI), te je u konačnici time definirano šest klasa utisnih bušotina (EPA, 2012).

S povećanim regulatornim nadzorom, tehnologija utiskivanja otpada u duboke bušotine je dodatno napredovala. Razvijeni su sofisticirani sustavi za praćenje tlaka, integriteta bušotina i potencijalne filtracije. Ove inovacije smanjile su rizike povezane s utiskivanjem otpada i omogućile sigurnije operacije. U 1990-ima, tehnologija utiskivanja otpada postala

je široko prihvaćena u naftnoj industriji, posebno u odobalnim operacijama. Utiskivanje fluida s česticama tj. postupak utiskivanja kašastog otpada koji uključuje miješanje nabušenog materijala s različitim fluidima i aditivima i njihovo utiskivanje, postao je standardna praksa. Ovaj postupak omogućio je ekološki prihvatljivije zbrinjavanje otpada i smanjenje ekološkog otiska bušaćih operacija (Journal of Petroleum Technology, 1999).

Na svjetskoj razini, organizacije poput Međunarodne agencije za energiju (engl. *International Energy Agency*, IEA) kontinuirano potiču razvoj i primjenu naprednih tehnologija za zbrinjavanje otpada u naftnoj industriji. Ove inicijative uključivale su financiranje istraživanja, razvoj smjernica za najbolje prakse i promicanje međunarodne suradnje (IEA, 1999). Današnje tehnologije omogućuju sigurnije i učinkovitije zbrinjavanje otpada, uz minimalan utjecaj na okoliš. Strogi regulatorni okviri osiguravaju da se ove operacije provode na način koji štiti podzemne vode i okoliš. Propisi su postali još stroži i zahtijevaju detaljne analize i planove upravljanja prije odobravanja projekata utiskivanja.

3. UIC PROGRAM

U SAD-u, zakonodavni okvir za regulaciju utiskivanja otpada, posebice u kontekstu naftne i plinske industrije, detaljno je razvijen. Nakon uspostave SDWA, regulacija podzemnog utiskivanja postala je ključna za osiguranje zaštite podzemnih voda od kontaminacije industrijskim otpadnim fluidima. Kroz UIC program, kojeg nadzire EPA, uspostavljeni su standardi za kontrolu i nadzor bušotina, uključujući i provođenje ispitivanja koja se koriste kako bi se provjerio integritet bušotine (engl. *Mechanical Integrity Test*, MIT).

Pojedine vrste otpada nastale industrijskim procesima teško je ili gotovo nemoguće obraditi do razine koja bi ih učinila sigurnim za ispuštanje na površinu. Također, odloženi/utisnuti otpad može uzrokovati onečišćenje podzemnih voda, ako nije osigurana učinkovita izolacija (GWPC, 2021). Cilj UIC programa je učinkovita izolacija utisnutih fluida od podzemnog izvora pitke vode, definiranog kao: „vodonosnik ili njegov dio, koji (Code of Federal Regulations, 2014a):

- a) opskrbljuje bilo koji javni vodoopskrbni sustav,
- b) sadrži dovoljnu količinu podzemne vode za opskrbu javnog vodoopskrbnog sustava i:
 - I. trenutno opskrbljuje pitkom vodom za ljudsku potrošnju,
 - II. sadrži manje od 10 000 mg/L ukupno otopljenih krutih tvari,
 - III. nije izuzeti vodonosnik“.

UIC program može provoditi EPA, država, teritoriji ili plemena s primarnim tijelom za izdavanje dozvola i provedbu koje je odobrila EPA. Aktivnosti koje provodi UIC program uključuju (EPA, 2020):

- održavanje inventara bušotina,
- izdavanje dozvola za utisne bušotine,
- obavljanje inspekcija,
- osiguravanje usklađenosti sa zahtjevima dozvole.

UIC program nadzire rad operatera bušotina za utiskivanje tijekom cijelog životnog vijeka bušotine kako bi potvrdili da njihova praksa ne onečišćuje vodne resurse. Program uključuje provođenje nadzora i inspekcija kako bi se potvrdila sukladnost s UIC-om ili primjenjivim zakonskim zahtjevima. Tijekom pregleda, program provjerava sljedeće (EPA, 2020):

- ispravnu konstrukciju bušotine,
- istjecanje fluida iz bušotine u okoliš,
- aktivnosti monitoringa, evidenciju i izvještavanje koje provodi operater,
- poštivanje svih potrebnih radnih uvjeta,
- ispravnost postupka dekomisije bušotine kada operacije završe.

Program ocjenjuje periodična izvješća o praćenju koja podnose operateri, adresirajući probleme kada postupci operatera nisu usklađeni sa zahtjevima UIC-a. Njegova savjetodavna uloga usmjerena je na pomoći u vraćanju bušotina u stanje usklađenosti ili poduzimanju mjera za provedbu (EPA, 2020).

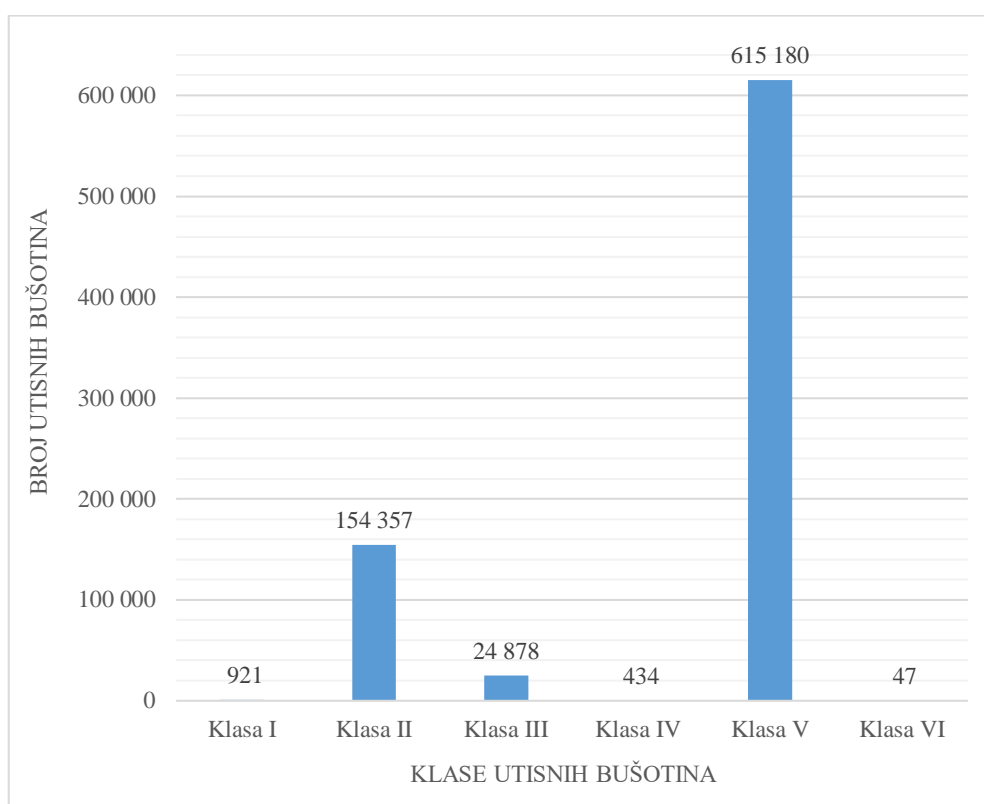
Prema EPA-i, na području SAD-a postoji više od 790 000 bušotina za utiskivanje koje se grupiraju u šest klasa bušotina (Tablica 3-1.). Broj bušotina klase I i II, koje se koriste za trajno odlaganje fluida iz istraživanja i proizvodnje nafte i plina u podzemne geološke formacije prelazi 150 000 bušotina. Bušotine klase V uključuju sve bušotine koje nisu klasificirane kao bušotine klase I-IV ili klase VI i kreću se od jednostavnih plitkih bušotina do složenih eksperimentalnih tehnologija utiskivanja (Slika 3-1.) (GWPC, 2021).

Tablica 3-1. Podaci o broju klasa utisnih bušotina po državama SAD-a (izrađeno prema EPA, 2022)

DRŽAVA	Klasa I	Klasa II	Klasa III	Klasa IV	Klasa V	Klasa VI
Alabama	0	246	5	0	1768	0
Aljaska	22	1620	0	0	2015	0
Američka Samoa	0	0	0	0	10	0
Arizona	0	0	3324	0	60 537	0
Arkansas	12	1034	0	0	247	0
Colorado	13	935	22	0	3007	0
Connecticut	0	0	0	0	980	0
Delaware	0	0	0	0	1016	0
Djevičanski otoci	0	0	0	0	44	0
Florida	343	70	0	0	18 026	0
Fort Peck (indijanski rezervat)	0	33	0	0	0	0
Georgia	0	0	0	0	18 063	0
Guam (teritorij)	0	0	0	0	508	0
Havaji	0	0	0	0	6911	0
Idaho	0	0	0	0	21 530	0
Illinois	7	7356	0	0	34 940	10
Indiana	17	1138	0	0	17 528	3
Iowa	0	5	0	0	5633	0
Južna Dakota	0	109	28	0	727	0
Južna Karolina	0	0	0	0	13 333	0
Kalifornija	52	36123	630	0	24 006	16
Kansas	65	16 311	180	0	9883	0
Kentucky	2	3493	0	0	14 427	0
Kolumbijski okrug	0	0	0	0	236	0
Louisiana	35	3380	104	0	1107	15

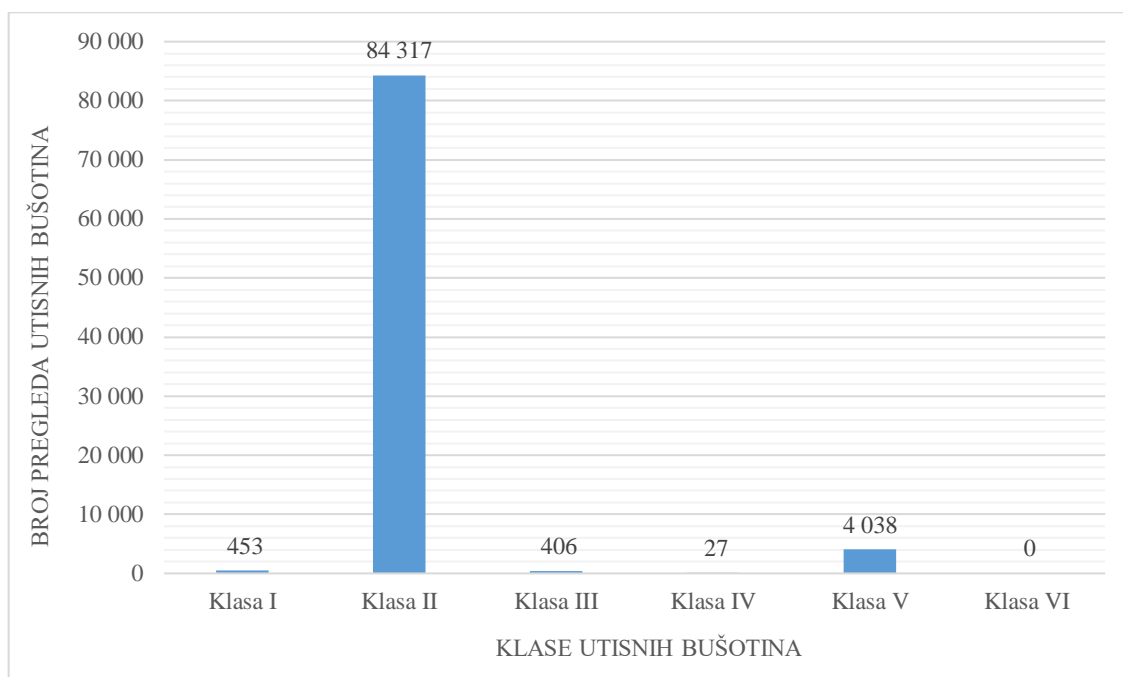
DRŽAVA	Klasa I	Klasa II	Klasa III	Klasa IV	Klasa V	Klasa VI
Maine	0	0	0	39	2229	0
Maryland	0	0	0	0	13 636	0
Massachusetts	0	0	0	0	2755	0
Michigan	47	1103	65	0	8588	0
Minnesota	0	0	0	0	3726	0
Mississippi	8	1253	0	0	7520	0
Missouri	0	427	0	0	10 304	0
Montana	0	1268	0	0	7350	0
Navajo (indijanski rezervat)	0	351	0	0	0	0
Nebraska	11	588	4772	0	1736	0
Nevada	0	19	0	0	2622	0
New Hampshire	0	0	0	0	12 514	0
New Jersey	0	0	0	0	2822	0
New Mexico	6	3873	14	0	2682	0
New York	0	298	167	0	20 035	0
Ohio	18	2161	58	56	24 354	1
Oklahoma	6	10 638	0	30	2925	0
Oregon	0	9	0	86	33 708	0
Portoriko	0	0	0	0	3140	0
Pennsylvania	0	1585	0	0	16 642	0
Rhode Island	0	0	0	0	44	0
Sjeverna Dakota	8	1387	0	0	946	1
Sjeverna Karolina	0	0	0	0	22 570	0
Sjeverni Marijanski otoci	0	0	0	0	24	0
Tennessee	0	35	0	0	5395	0
Teksas	160	51 436	4855	106	57 029	1
Utah	0	752	30	19	5300	0
Vermont	0	0	0	0	1833	0

DRŽAVA	Klasa I	Klasa II	Klasa III	Klasa IV	Klasa V	Klasa VI
Virginija	0	14	18	0	12393	0
Washington	0	1	0	98	67 839	0
Wisconsin	0	0	0	0	1909	0
Wyoming	89	4793	10 585	0	3002	0
Zapadna Virginija	0	513	21	0	1126	0
UKUPNO	921	15 4357	24 878	434	615 180	47



Slika 3-1. Broj utisnih bušotina po klasama za 2022. godinu (izrađeno prema EPA, 2022)

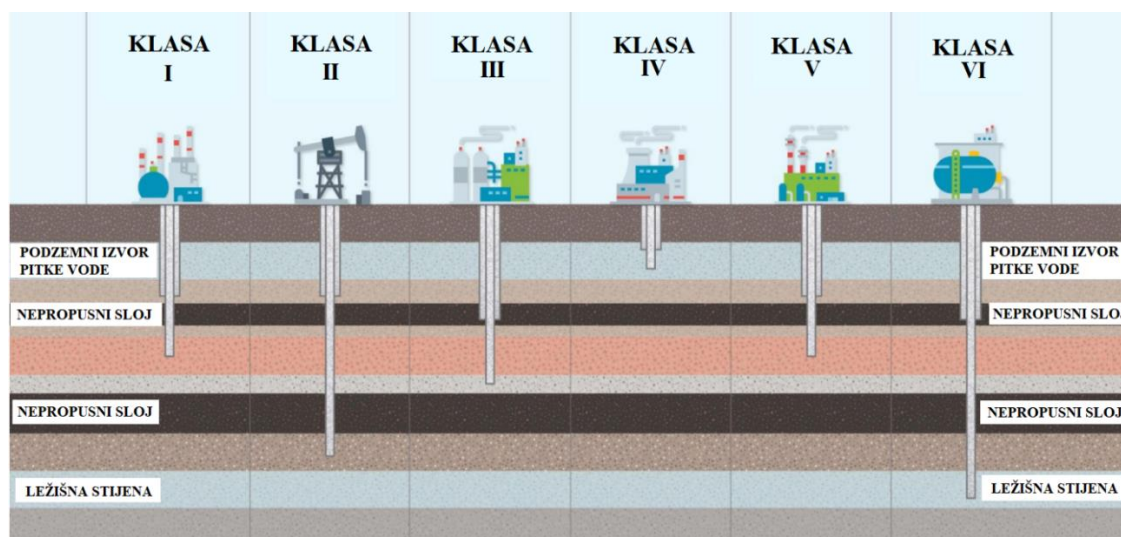
Unatoč tome što je najveći broj bušotina klase V, najveći broj pregleda obavljen je na bušotinama klase II. Bušotine klase II obično su tehnološki sofisticirane, dok je konstrukcija bušotina klase V uglavnom jednostavnija i oslanja se na gravitacijsko deponiranje. Učestalost inspeksijskih nadzora manja je kod jednostavnih bušotina klase V, koje se inspeksijski nadziru nekoliko puta tijekom radnog vijeka, dok se kod bušotina klase II inspeksijski nadzori provode u dinamici jednom godišnje ili svakih nekoliko godina. U 2018. godini, inspeksijski nadzor proveden je nad gotovo 90 000 utisnih bušotina (Slika 3-2.) (EPA, 2020).



Slika 3-2. Broj pregleda utisnih bušotina po klasama za 2018. godinu (izrađeno prema EPA, 2020)

3.1. Klase utisnih bušotina

Klase utisnih bušotina (Slika 3-3.) općenito se temelje na vrsti fluida koji se utiskuje i dubini utiskivanja fluida u usporedbi s dubinom najnižeg podzemnog izvora pitke vode.



Slika 3-3. Klase utisnih bušotina (Utah Division of Oil, Gas and Mining, 2022)

Bušotine klase I obuhvaćaju bušotine koje se koriste za utiskivanje komunalnog ili industrijskog otpada (uključujući i opasni otpad) ispod najdubljih zona podzemnih izvora pitke vode, kako bi se osigurala maksimalna zaštita podzemnih voda. Primjeri industrija koje

koriste bušotine klase I su rafinerijska, metalurška, kemijska te farmaceutska proizvodnja, proizvodnja hrane i komunalno gospodarstvo (EPA, 2024b).

Bušotine klase II koriste se za utiskivanje otpada iz istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Ove bušotine su ključne za zbrinjavanje otpadnih voda koje nastaju u procesu frakturiranja i drugih bušotinskih operacija. Utiskivanje se također provodi u svrhu održavanja ležišnog tlaka, čime se poboljšava proizvodnja. Bušotine klase II spadaju u jednu od tri kategorije (EPA, 2024c):

- bušotine za odlaganje otpadnih voda,
- bušotine za EOR,
- bušotine za skladištenje ugljikovodika.

Bušotine klase III obuhvaćaju bušotine koje se koriste za utiskivanje fluida za pridobivanje minerala, poput soli urana, bakra i sumpora. Ove bušotine su često smještene u rudarskim područjima i koriste se za procese poput izluživanja. Ovaj postupak, poznat kao ili in-situ izluživanje, posebno je pogodan za minerale koji su raspršeni u podzemnim formacijama. Primjena ove metode smanjuje potrebu za tradicionalnim rudarskim tehnikama koje uključuju iskopavanje, čime se smanjuje negativan utjecaj na okoliš i potencijalni utjecaj na površinske vode (EPA, 2024d).

Bušotine klase IV prvotno su razvijene za utiskivanje opasnog ili radioaktivnog otpada u/ili iznad slojeva koji sadrže pitku vodu, što je s vremenom dovelo do ozbiljnih zabrinutosti zbog mogućnosti kontaminacije vodnih resursa. Takve su bušotine koristile su industrije koje su proizvodile značajne količine opasnog otpada, poput kemijske i nuklearne industrije. Godine 1984., EPA je zabranila korištenje utisnih bušotina klase IV zbog visokog rizika kontaminacije pitke vode, s ciljem osiguranja zaštite javnog zdravlja i sigurnost vodnih resursa. Trenutno je korištenje ograničeno na ovlaštena mjesta kao dio aktivnosti remedijacije onečišćenih lokacija ili izvora podzemne vode, odobrene od strane EPA-e ili pojedinih država (EPA, 2024e).

Bušotine klase V koriste se za utiskivanje neopasnih fluida i uključuju sve bušotine koje nisu klasificirane kao bušotine klase I – IV, odnosno klase VI. Ova raznolika skupina kreće se od jednostavnih, plitkih bušotina do složenih eksperimentalnih tehnologija utiskivanja. Primjere jednostavnih plitkih bušotina koje rade na principu gravitacijskog odlaganja fluida izravno ispod površine zemlje moguće je pronaći kod stambenih kompleksa koji koriste septičke sustave za zbrinjavanje sanitarnog otpada ili npr. u trgovačkim centrima, u kojima

određene tvrtke poput kemijskih čistionica ili autopraonica ispuštaju otpadne fluide i sanitarni otpad. Sofisticiranije bušotine klase V koriste tlačne sustave za utiskivanje fluida. Neki sofisticirani sustavi uključuju napredne sustave odvodnje otpadnih industrijskih voda, kao što su bušotine za utiskivanje otpadnih voda iz rudarskih operacija, otpadnih voda iz kanalizacijskih sustava, kao i bušotine za deponiranje otpadnih voda iz industrijskih postrojenja, eksperimentalne bušotine koje se koriste za testiranje novih tehnologija i sustave koji se koriste za utiskivanje i skladištenje vode za kasniju ponovnu upotrebu (EPA, 2024f). Jedan od ključnih aspekata korištenja utisnih bušotina klase V je njihova ekološka sigurnost. Iako ove bušotine omogućavaju sigurno odlaganje tekućeg otpada, postoji zabrinutost zbog potencijalnog rizika od onečišćenja podzemnih voda. Zbog toga je ključno da se striktno poštuju regulative i da se primjenjuju najbolje prakse u dizajnu i upravljanju bušotinama.

Bušotine klase VI se koriste za utiskivanje CO₂ u različite geološke uvjete, prvenstveno u sedimente, no CO₂ se može utiskivati u (National Energy Technology Laboratory, 2024):

- dobrim dijelom iscrpljena naftna i plinska ležišta,
- naftna i plinska ležišta u proizvodnji, kada se CO₂ koristi kao utisni plin radi povećanja iscrpka plina (engl. *Enhanced gas recovery*, EGR) i nafte, tj. EOR-a,
- slojeve nepridobivog ugljena, pri čemu se iz ugljena može dodatno crpiti metan,
- duboke slane vodonosnike,
- solne dome,
- bazalte,
- šejlove bogate organskom tvari.

Ovo dugoročno podzemno skladištenje naziva se geološka sekvestracija koja se, kao dio tehnologije hvatanja i skladištenja ugljika (CCS), može koristiti za smanjenje emisija stakleničkih plinova u atmosferi. To je posebno važno u kontekstu svjetskih napora za smanjenje emisija CO₂ i borbu protiv klimatskih promjena. Izvori CO₂ za geološku sekvestraciju uključuju CO₂ uhvaćen iz emisija točkastih izvora, kao što su industrijski pogoni (npr. postrojenja za proizvodnju čelika i cementa) ili postrojenja za proizvodnju energije (npr. proizvodnja vodika parnim reformiranjem ili elektrane na fosilna goriva), kao i CO₂ uhvaćen izravno iz atmosfere (EPA, 2024g).

3.2. UIC program po državama

EPA je razvila zahtjeve UIC programa koji su dizajnirani da ih prihvate države, teritoriji i plemena SAD-a. Podnositelji zahtjeva mogu podnijeti zahtjeve za primarne provedbene ovlasti za:

- sve klase utisnih bušotina,
- klase I – V,
- klasu VI.

Od ranih 1980-ih, EPA je rutinski delegirala primarne provedbene ovlasti nad programima podzemnog utiskivanja onim državama koje su dokazale sposobnost provedbe UIC programa ispunjavajući zakonske zahtjeve EPA-e. U državama kojima nije odobren ovlast nad cijelim ili dijelom UIC programa, EPA ostaje odgovorna regulatorna agencija za taj dio UIC programa (GWPC, 2021).

Svaka država koja želi preuzeti primarne provedbene ovlasti mora razviti i putem zahtjeva za odobrenje podnijeti svoj UIC program, koji obuhvaća ključne elemente potrebne za uspješno upravljanje bušotinama za utiskivanje. Zahtjev mora uključivati pregled zakonskih i regulatornih odredbi koje omogućuju državi provedbu programa u skladu s federalnim standardima. Također, potrebno je dostaviti opis pravne ovlasti na temelju koje država može provoditi regulaciju i sankcionirati nepoštivanje zakona. Ovaj dio zahtjeva osigurava da država posjeduje odgovarajuće alate za provođenje zakona koji su neophodni za zaštitu podzemnih voda (Code of Federal Regulations, 2014b). Osim pravnog okvira, država mora prikazati i operativni plan koji uključuje organizacijske strukture, postupke za izdavanje dozvola, te sustave za praćenje i izvješćivanje o stanju bušotina i njihovom radu. Uz navedeno, od države se zahtijeva osiguravanje financijskih resursa i tehničkih sposobnosti za provođenje programa, što je od ključne važnosti za njegovo uspješno funkcioniranje (Code of Federal Regulations, 2014b).

Javna rasprava igra važnu ulogu u procesu odobravanja primarne provedbene ovlasti. Nakon podnošenja zahtjeva, EPA organizira javnu raspravu kako bi osigurala transparentnost i omogućila sudjelovanje javnosti. Svi zainteresirani mogu iznijeti svoje mišljenje o predloženom programu, a EPA te komentare uzima u obzir prije donošenja konačne odluke. Ova faza je važna jer osigurava da program zadovoljava ne samo tehničke i pravne standarde, već i širi interes zajednice (Code of Federal Regulations, 2014b).

EPA donosi konačnu odluku na temelju utvrđenih kriterija koji propisuju da predloženi UIC program mora biti barem jednako strog kao savezni program. To znači da državne regulative moraju pružiti istu ili višu razinu zaštite podzemnih izvora pitke vode. EPA također ocjenjuje tehničku sposobnost države da upravlja različitim klasama bušotina, provodi inspekcije i izdaje odgovarajuće dozvole. Ako se svi uvjeti zadovolje, EPA može odobriti primarne provedbene ovlasti (Code of Federal Regulations, 2014b).

Nakon što država dobije primarne provedbene ovlasti, ona preuzima punu odgovornost za provedbu programa, dok EPA zadržava nadzornu ulogu. Država mora nastaviti poštovati savezne standarde te redovito izvještavati EPA-u o provođenju programa. Ako država ne uspijeva ispuniti svoje obveze ili prilagoditi program promjenama u saveznom zakonodavstvu, EPA može povući odluku o dodjeli ovlasti i preuzeti kontrolu nad UIC programom u toj državi (Code of Federal Regulations, 2014b).

Ovaj cjelokupan postupak osigurava da UIC programi, bez obzira na to provode li ih savezne ili državne vlasti (Tablica 3-2.), uvijek zadovoljavaju najviše standarde zaštite podzemnih voda, čime se osigurava zaštita ključnih resursa pitke vode za buduće generacije (Code of Federal Regulations, 2014b).

EPA je odobrila UIC primarne provedbene ovlasti za više klasa bušotina (I, II, III, IV i V) u trideset država i tri teritorija, te zadržava implementaciju bušotina klase II u Floridi i Idahu. Osam država i dva plemena odobrena je primarna provedbena ovlast samo za bušotine klase II. Louisiana, Sjeverna Dakota i Wyoming jedine su države s primarnom provedbenom ovlasti za sve klase (I, II, III, IV, V i VI). EPA provodi program klase VI u svim drugim državama, teritorijima i plemenima. Osim toga, EPA izravno provodi potpuni UIC program u sedam država, dva teritorija, Kolumbijskom okrugu i ostalim indijanskim plemenima (osim bušotina klase II u Navaju i Fort Pecku).

Također, u mnogim državama, ovlast za jednu ili više klasa bušotina za utiskivanje posjeduje više od jedne državne agencije. Na primjer, jedna agencija može imati ovlasti nad bušotinama klase II, dok druga može imati ovlasti nad bušotinama klase I, III, V ili VI (GWPC, 2021).

Konačno, moglo bi se reći da, ako se uspjeh programa zaštite okoliša mjeri količinom izbjegnute kontaminacije, UIC program bi mogao biti jedan od najuspješnijih programa ikada osmišljenih za zaštitu zdravlja, ljudi i okoliša (GWPC, 2021).

Tablica 3-2. Primarne provedbene ovlasti klasa utisnih bušotina UIC programa po državama, teritorijima i plemenima SAD-a (izrađeno prema EPA, 2024h)

	PRIMARNA PROVEDBENA OVLAŠT	
DRŽAVA	EPA	DRŽAVA
Alabama	VI	I, II, III, IV, V
Aljaska	I, III, IV, V, VI	II
Američka Samoa	I, II, III, IV, V, VI	-
Arizona	I, II, III, IV, V, VI	-
Arkansas	VI	I, II, III, IV, V
Colorado	I, III, IV, V, VI	II
Connecticut	VI	I, II, III, IV, V
Delaware	VI	I, II, III, IV, V
Djevičanski otoci	I, II, III, IV, V, VI	-
Florida	II, VI	I, III, IV, V
Fort Peck (indijanski rezervat)	VI	II
Georgia	VI	I, II, III, IV, V
Guam (teritorij)	VI	I, II, III, IV, V
Havaji	I, II, III, IV, V, VI	-
Idaho	II, VI	I, III, IV, V
Illinois	VI	I, II, III, IV, V
Indiana	I, III, IV, V, VI	II
Iowa	I, II, III, IV, V, VI	-
Južna Dakota	I, II, III, IV, V	II
Južna Karolina	VI	I, II, III, IV, V
Kalifornija	I, III, IV, V, VI	II
Kansas	VI	I, II, III, IV, V
Kentucky	I, III, IV, V, VI	II
Kolumbijski okrug	I, II, III, IV, V, VI	-
Louisiana	-	I, II, III, IV, V, VI
Maine	VI	I, II, III, IV, V
Maryland	VI	I, II, III, IV, V

	PRIMARNA PROVEDBENA OVLAST	
DRŽAVA	EPA	DRŽAVA
Massachusetts	VI	I, II, III, IV, V
Michigan	I, III, IV, V, VI	II
Minnesota	I, II, III, IV, V, VI	-
Mississippi	VI	I, II, III, IV, V
Missouri	VI	I, II, III, IV, V
Montana	I, III, IV, V, VI	II
Navajo (indijanski rezervat)	I, III, IV, V, VI	II
Nebraska	VI	I, II, III, IV, V
Nevada	VI	I, II, III, IV, V
New Hampshire	VI	I, II, III, IV, V
New Jersey	VI	I, II, III, IV, V
New Mexico	VI	I, II, III, IV, V
New York	I, II, III, IV, V, VI	-
Ohio	VI	I, II, III, IV, V
Oklahoma	VI	I, II, III, IV, V
Oregon	VI	I, II, III, IV, V
Ostali indijanski rezervati	I, II, III, IV, V, VI	-
Portoriko	VI	I, II, III, IV, V
Pennsylvania	I, II, III, IV, V, VI	-
Rhode Island	VI	I, II, III, IV, V
Sjeverna Dakota	-	I, II, III, IV, V, VI
Sjeverna Karolina	VI	I, II, III, IV, V
Sjeverni Marijanski otoci	VI	I, II, III, IV, V
Tennessee	VI	I, II, III, IV, V
Teksas	VI	I, II, III, IV, V
Utah	VI	I, II, III, IV, V
Vermont	VI	I, II, III, IV, V
Virginija	I, II, III, IV, V, VI	-

	PRIMARNA PROVEDBENA OVLAŠT	
DRŽAVA	EPA	DRŽAVA
Washington	VI	I, II, III, IV, V
Wisconsin	VI	I, II, III, IV, V
Wyoming	-	I, II, III, IV, V, VI
Zapadna Virginija	VI	I, II, III, IV, V

3.3. Mehanički integritet utisne bušotine

Testiranje mehaničkog integriteta (MIT) mora se provesti nakon svakog remonta bušotine i nakon završnog opremanja novo izbušene ili prenamijenjene utisne bušotine. Provođenje ovih testova ključno je za identifikaciju eventualnih problema unutar bušotine te za sprečavanje potencijalnih rizika po okoliš i podzemne izvore pitke vode. Testiranje ove vrste potrebno je provoditi svake godine u slučaju bušotine za utiskivanje opasnog otpada, te najmanje jednom u 5 godina u slučaju bušotine za utiskivanje neopasnog otpada. Smatra se da utisna bušotina ima unutarnji mehanički integritet ako nema propuštanja kolone zaštitnih cijevi, tubinga ili pakera. Ako nema kretanja utisnutih fluida prema podzemnim izvorima pitke duž vanjske strane kolone zaštitnih cijevi, tada je postignut vanjski mehanički integritet. Oštećenje unutarnjeg mehaničkog integriteta posljedica je korozije ili mehaničkog oštećenja opreme, dok je oštećenje vanjskog mehaničkog integriteta posljedica oštećenja cementnog kamena ili loše cementacije. U slučaju otkrivanja oštećenja operater je obavezan odmah zaustaviti utiskivanje fluida i poduzeti korektivne mjere. Tek nakon popravka i ponovnog testiranja bušotine, utiskivanje se može nastaviti. (Code of Federal Regulations, 2014c).

Propuštanje kolone zaštitnih cijevi, tubinga i pakera utvrđuje se provođenjem sljedećih testiranja: ispitivanja hermetičnosti (tlačna proba), praćenje tlaka u prstenastom prostoru, snimanje temperature, snimanje šuma-buke i testiranja putem radioaktivnih obilježivača. Kretanje fluida iza kolone zaštitnih cijevi utvrđuje se sljedećim testiranjima: snimanje temperature, snimanje šuma-buke, CBL-zvučna karotaža (engl. *Cement Bond Log*) i putem radioaktivnih obilježivača (Osborne, 2002).

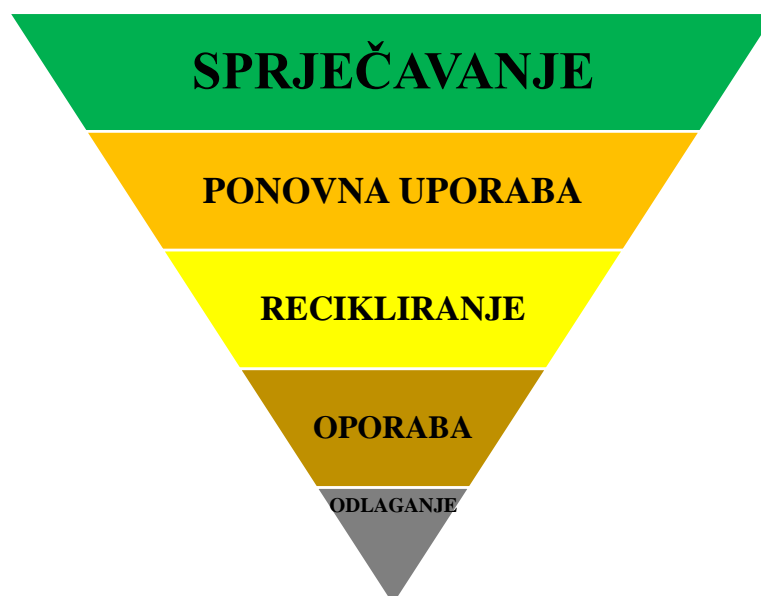
4. UTISKIVANJE OTPADA U EUROPI

Utiskivanje otpada u podzemlje postaje sve značajnija tema u Europi zbog potrebe za sigurnim zbrinjavanjem opasnog otpada i smanjenjem emisija stakleničkih plinova. Ova tehnologija omogućava dugoročno skladištenje otpada, osobito u industrijskim regijama gdje alternative nisu praktične, i to duboko ispod površine Zemlje, što pomaže u smanjenju rizika od zagađenja okoliša i podržava svjetske napore za ublažavanje klimatskih promjena.

EU i države članice razvile su sveobuhvatan pravni i regulatorni okvir kako bi se osiguralo da proces utiskivanja bude proveden na siguran i ekološki prihvatljiv način.

4.1. Zakonska regulativa EU-a iz područja utiskivanja otpada u pogodne stijene

Okvirna direktiva o otpadu, poznata i kao Direktiva 2008/98/EC, predstavlja temeljni zakonodavni akt koji uređuje gospodarenje otpadom u EU. Ova direktiva uspostavlja temeljne principe upravljanja otpadom, kao što su hijerarhija otpada (Slika 4-1.), načelo "onečišćivač plaća" i odgovornost proizvođača otpada. Hijerarhija otpada postavlja prioritete mjere u upravljanju otpadom, gdje prevencija i smanjenje otpada imaju najveću važnost, dok se odlaganje otpada na odlagališta koristi kao posljednja opcija. Direktiva također zahtijeva od država članica da izrade nacionalne planove upravljanja otpadom i programe prevencije otpada, koji trebaju obuhvatiti cjelokupni životni ciklus otpada, od njegovog nastanka do konačnog zbrinjavanja, s posebnim naglaskom na recikliranje i ponovnu uporabu (EUR-Lex, 2008).



Slika 4-1. Hijerarhija gospodarenja otpadom (izrađeno prema European Commission, 2023)

Direktiva o odlagalištima otpada (Direktiva 1999/31/EC) uspostavlja tehničke zahtjeve za odlagališta otpada kako bi se smanjio negativan utjecaj na okoliš, posebno na podzemne vode, tlo i zrak. Također, postavlja kriterije za prihvatanje otpada, odabir lokacija za odlagališta i njihov rad, kao i za praćenje i kontrolu nakon zatvaranja odlagališta (EUR-Lex, 1999).

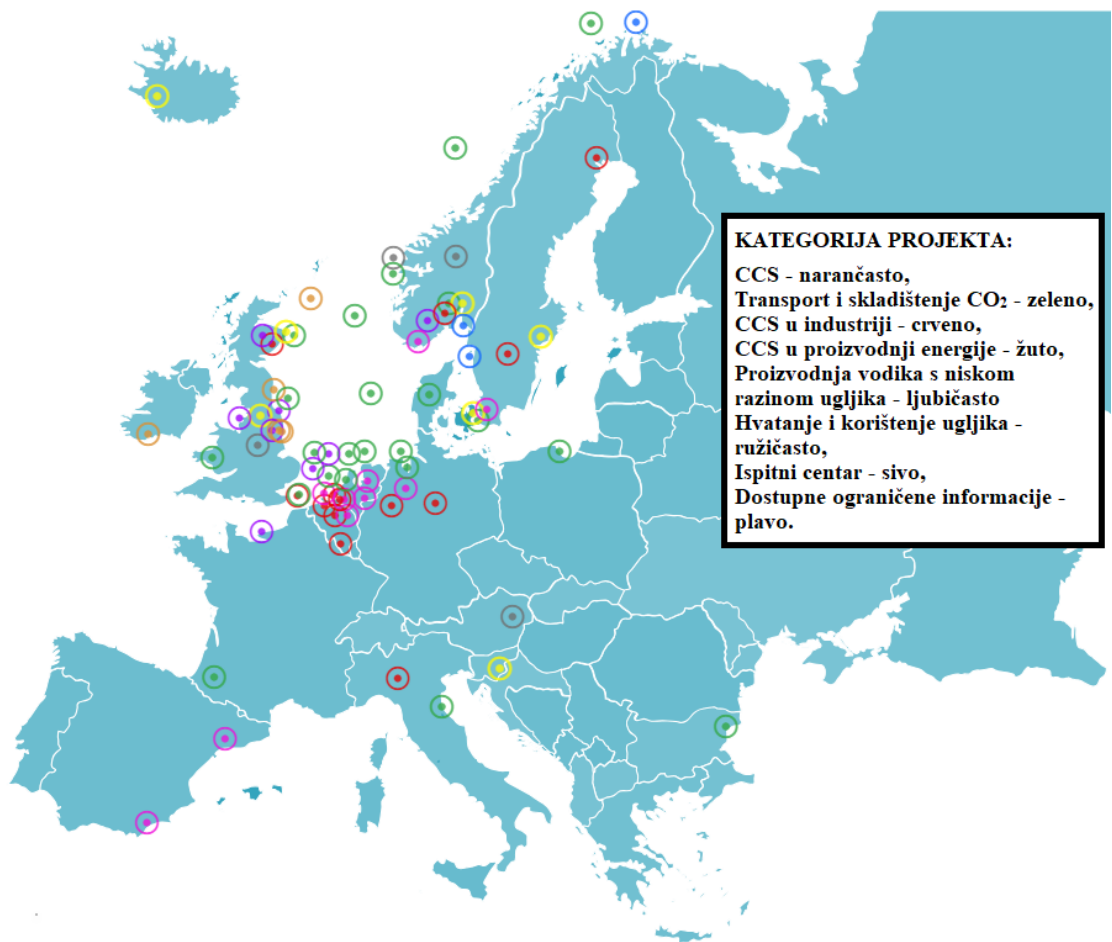
Direktiva o industrijskim emisijama (Direktiva 2010/75/EU) jedna je od najvažnijih direktiva koja se odnosi na kontrolu emisija iz industrijskih postrojenja u EU. Ova direktiva integrira nekoliko prethodnih direktiva koje su regulirale emisije u zrak, vodu i tlo, a njome se uvode strogi standardi za industrijske aktivnosti koje uključuju upravljanje otpadom. Propisuje obvezu primjene najboljih raspoloživih tehnika kod industrijskih postrojenja kako bi se minimizirale emisije štetnih tvari u okoliš. Također, direktiva zahtijeva od država članica uspostavu sustava za izdavanje integriranih dozvola za rad industrijskih postrojenja, koje obuhvaćaju sve aspekte utjecaja na okoliš, uključujući upravljanje otpadom. Kroz ovu direktivu, EU osigurava da upravljanje otpadom iz industrijskih izvora bude provedeno na ekološki održiv način (EUR-Lex, 2010).

Direktiva o gospodarenju otpadom od industrija eksploatacije mineralnih sirovina (Direktiva 2006/21/EC) regulira upravljanje otpadom koji nastaje tijekom aktivnosti rudarenja mineralnih sirovina. Ova direktiva propisuje posebne mjere za upravljanje i odlaganje otpada iz industrije eksploatacije mineralnih sirovina također u svrhu smanjenja rizika od onečišćenja tla i voda. Jedan od ključnih aspekata ove direktive je postavljanje zahtjeva za izradu planova upravljanja otpadom, koji moraju sadržavati sveobuhvatne informacije o vrsti i količini otpada, kao i mjerama koje je potrebno poduzeti kako bi se spriječile štetne posljedice za okoliš i zdravlje ljudi. Direktiva također predviđa obvezu monitoringa i izvještavanja o stanju odlagališta nakon njihovog zatvaranja, čime se osigurava dugoročna sigurnost ovih lokacija (EUR-Lex, 2006).

Direktiva o geološkom skladištenju CO₂ (Direktiva 2009/31/EC) usmjerena je na regulaciju skladištenja ugljikovog dioksida u dubokim geološkim formacijama kao dijela strategije za smanjenje emisija stakleničkih plinova. Ova direktiva postavlja pravni okvir za sigurno skladištenje CO₂ s ciljem sprječavanja njegovog utjecaja na okoliš i ljudsko zdravlje. Direktiva propisuje stroge kriterije za odabir lokacija podzemnog skladišta, procjenu rizika, nadzor i praćenje skladišta, te postupke za zatvaranje i dugoročno održavanje skladišta. Osim toga, državama članicama je naloženo da uspostave sustave odgovornosti i osiguranja kako bi se pokrili potencijalni troškovi u slučaju istjecanja utisnutog fluida ili drugih problema povezanih s geološkim skladištenjem CO₂ (EUR-Lex, 2009).

Okvirna direktiva o vodama (Direktiva 2000/60/EC) usmjerena je na regulaciju zaštite i održivog upravljanja vodnim resursima unutar EU. Ova direktiva postavlja pravni okvir za očuvanje i poboljšanje stanja vodnih tijela, uključujući rijeke, jezera, podzemne vode i obalne vode, s ciljem sprječavanja daljnjeg pogoršanja kvalitete vode te zaštite ekosustava ovisnih o vodi. Direktiva propisuje stroge kriterije za postizanje "dobrog stanja voda", uključujući ekološke i kemijske standarde, kao i zahtjeve za monitoring i praćenje kvalitete voda. Države članice obvezne su izraditi planove upravljanja riječnim slivovima, koji definiraju mjere za poboljšanje i očuvanje kvalitete voda, a posebna pažnja posvećuje se smanjenju zagađenja iz industrijskih, poljoprivrednih i urbanih izvora. Osim toga, direktiva nalaže uspostavu sustava za praćenje, procjenu rizika i sankcije u slučaju nepoštivanja regulacija, čime se osigurava dugoročna zaštita vodnih resursa i očuvanje bioraznolikosti (EUR-Lex, 2000).

Na nacionalnim razinama pojedinih država članica EU-a, utiskivanje otpada regulirano je nizom zakona, direktiva, pravilnika, uredbi i strategija. Svaka država članica EU-a pa i one države koje to nisu, imaju dodatne nacionalne regulative koje upravljaju utiskivanjem otpada. Utiskivanje otpada u Europi kontinuirano se razvija i koristi za zbrinjavanje različitih vrsta otpada, uključujući industrijski otpad, otpadne vode iz energetskeg sektora, te otpadne vode nastale tijekom istraživanja i proizvodnje ugljikovodika. Ova praksa je dobro utemeljena u nekoliko europskih zemalja, ali također izaziva zabrinutost u vezi s ekološkim i sigurnosnim rizicima. Različite zemlje unutar EU-a pristupaju ovoj tehnologiji s varijabilnim stupnjem prihvaćanja, a regulative koje prate ovu praksu su među najstrožima u svijetu. U Europi postoji aktivan broj bušotina za utiskivanje otpada, posebno u regijama bogatim naftom i plinom, poput Sjevernog mora, Norveške, Nizozemske i Velike Britanije. Osim toga, sve veći broj utisnih bušotina koristi se za utiskivanje CO₂ kao dio CCS tehnologije. Na primjer, Norveška je predvodnik u ovom području s projektima poput Sleipner i Snøhvit, gdje se CO₂ utiskuje u slani vodonosnik ispod plinskog ležišta. U bliskoj budućnosti predviđa se rast i šira implementacija CCS tehnologija, zahvaljujući strogim klimatskim ciljevima, napretku u tehnologiji i povećanom financiranju. Međutim, uspjeh CCS-a ovisit će o smanjenju troškova, osiguravanju političke i javne podrške te stvaranju potrebne infrastrukture. Postoji mnogo CCS projekata spremnih za tržište koji su na putu da postanu operativni prije 2030. godine (Slika 4-2.), pod uvjetom da postoje financijski okviri (ZEP, 2023).



Slika 4-2. Karta trenutno aktivnih i budućih CCS projekata u Europi (ZEP, 2023)

5. TEHNOLOGIJA UTISKIVANJA OTPADA

Tehnologija zbrinjavanja otpada utiskivanjem u bušotine temelji se na procesu utiskivanja tekuće i krute faze otpada u nepropusne stijene u Zemljinoj kori, koje se nalaze na dubinama od nekoliko kilometara i odvojene su od ostalih geoloških slojeva nepropusnim naslagama stijena. Postupak utiskivanja otpada može se klasificirati prema sljedećim kriterijima (Šabović i Isabegović, 2012):

1. Tip fluida koji se utiskuje:

- Utiskivanje fluida bez čestica (čisti fluid),
- Utiskivanje fluida s česticama (kašasti otpad).

2. Tlak utiskivanja:

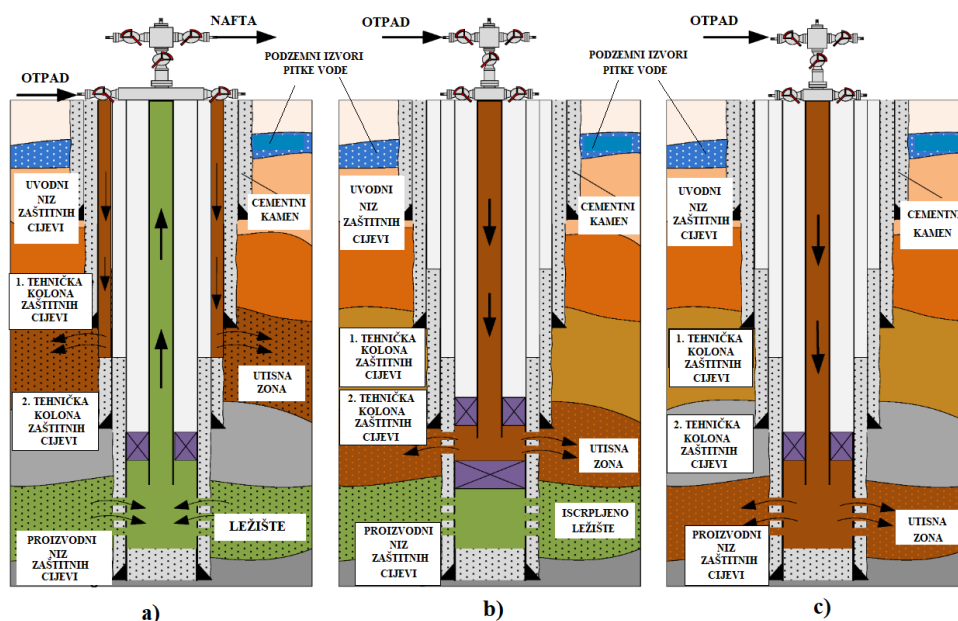
- Utiskivanje pri tlaku manjem od tlaka frakturiranja stijena,
- Utiskivanje pri tlaku većem od tlaka frakturiranja stijena.

3. Tip utiskivanja:

- Utiskivanje kroz prstenasti prostor između dvije kolone tzv. anularno utiskivanje (Slika 5-1., a),
- Utiskivanje kroz tubing i perforaciju u koloni (Slika 5-1., b) i c)).

Važni parametri na koje treba obratiti pažnju prilikom utiskivanja otpada u duboke bušotine su (Gaurina-Međimurec i Durn, 2005):

- količina otpada koji se namjerava utisnuti,
- pristupačnost bušotini ili blizina bušotine otpadu,
- integritet bušotinske glave (opreme na ušću),
- adekvatna izolacija zone pitke vode,
- karakteristike utisne zone,
- adekvatna zaštita proizvodne zone,
- analiza prethodnih projekata utiskivanja na tom području,
- ekonomska isplativost - usporedba predloženog projekta utiskivanja s drugim metodama.



Slika 5-1. a) Utiskivanje kroz prstenasti prostor, b) utiskivanje kroz tubing napuštene bušotine, c) utiskivanje kroz tubing utisne bušotine (Gaurina-Međimurec et al., 2020)

Prednosti utiskivanja otpadnih fluida u podzemlje u odnosu na njegovo odlaganje na površini:

- manja kapitalna ulaganja i operativni troškovi,
- manja površina koja je potrebna za postrojenje,
- manji utjecaj sezonskih promjena temperature na sastav,
- minimalna kemijska obrada fluida.

Za odlaganje otpada putem utisnih bušotina su pogodne ove vrste otpada:

- otpadne vode,
- zagađena tla,
- pepeo iz spalionica otpada i termo-elektrana,
- talozi nastali u procesu odsumporavanja dimnih plinova,
- otpadne vode (mulj) iz pročištača,
- tekući i fino usitnjeni otpad iz postupka površinskog iskapanja čvrstih mineralnih sirovina,
- građevinski materijal koji sadrži azbest ili druge oblike onečišćivača.

5.1. Izbor pogodnih lokacija za utiskivanje otpada

Odabir geološke strukture pogodne za utiskivanje otpada na temelju detaljnih geoloških i hidrogeoloških studija, predstavlja prvi korak u procesu planiranja utiskivanja otpada u podzemlje. Odabrane strukture moraju biti izuzetno stabilne, nepropusne i izolirane slojevima koji sprječavaju migraciju otpadnih materijala u pitke vodonosnike.

Prije konačnog izbora lokacije potrebno je razmotriti niz pitanja, među kojima je svakako i najvažnije hoće li odabrana formacija za utiskivanje otpadnog fluida biti sposobna prihvatiti ga, te potom zadržati i izolirati. Važno je uzeti u obzir seizmičnost područja prilikom odabira. Prvenstveno bušotine, a samim time i utiskivanje se ne smije izvoditi u tektonski nestabilnim područjima, gdje postoje rasjedi koji bi omogućili komunikaciju otpadne tekućine s površinom ili slojevima koji sadrže pitku vodu. Ključnu ulogu imaju i podinske i krovinske stijene, čija je uloga da prostorno ograniče kretanje fluida iz odabrane formacije za utiskivanje (Šabović i Isabegović, 2012).

Proces provjere odgovarajućih metoda utiskivanja otpada ključni je dio svakog uspješnog projekta utiskivanja otpada, a temelji se na količini i kvaliteti dostupnih informacija o parametarima za određivanje prikladne lokacije utiskivanja, poput propusnosti, poroznosti, debljini ležišta, dubini i strukturnim geološkim karakteristikama područja (Gaurina-Međimurec et al., 2020).

Različite stijene imaju različite propusnosti, a propusnost igra ključnu ulogu u raspršivanju tlaka jer visoka propusnost omogućuje brzo otjecanje tekuće faze utisnutog otpada, što dovodi do naglog pada tlaka (Nadeem et al., 2005). Dakle, stijene su izgrađene od zrna ili čestica koje su međusobno vezane kemijskim ili fizičkim silama. Glina, npr. sastoji se od vrlo malih čestica, a porni prostori između istih je tako mali da se fluidi ne mogu lako kretati, te se takve stijene mogu smatrati nepropusnim. Suprotno tome, pješčenjak, karakteriziran relativno velikim pornim prostorom, dozvoljava lakše protjecanje fluida pa su je pogodan za utiskivanje otpada (Šabović i Isabegović, 2012).

Općenito, čvrste stijene (npr. šejl i vapnenac itd.) imaju tendenciju stvarati tanke i duge pukotine, dok porozne i propusne stijene manje čvrstoće (npr. konsolidirani pješčenjaci itd.) stvaraju kratke pukotine, širih otvora koje mogu zbrinuti veće količine utisnutog otpada. Razlike u geometriji pukotina djelomično su rezultat različitih brzina istjecanja fluida koje su povezane s propusnošću. Visoka propusnost može otežati proces utiskivanja uslijed nakupljanja čvrstih čestica na vrhovima pukotina, što dovodi do stvaranja širokog područja za odlaganje otpada kroz višestruke pukotine. Ova područja s višestrukim pukotinama

omogućuju smještaj velikog volumena čvrste faze otpada blizu bušotine. Zbog toga se visoka propusnost smatra povoljnom za utiskivanje većih količina otpada, unatoč potencijalno većim poteškoćama u stvaranju i održavanju pukotina tijekom utiskivanja. U slučaju malih volumena otpada, visoka propusnost nije tako kritičan čimbenik jer jedna ravnina hidrauličkog loma može imati dovoljan volumen skladištenja (Nadeem et al., 2005).

Poroznost je mjera količine pora, odnosno šupljina prisutnih u stijeni. Što je više pora prisutno, to je veća sposobnost stijene da zadrži fluid, te se stijene sa velikom poroznosti uz veliku stlačivost, smatraju izuzetno povoljnim za duboko utiskivanje otpada. S druge strane, u slučaju niske poroznosti, kapacitet skladištenja je manji, a da bi se stvorile pukotine željene veličine, potrebni su veći tlakovi.

Dubina ležišta za utiskivanje utječe na odabir lokacije na nekoliko načina. Prvo, odabrano ležište treba biti izolirano od vodonosnika pitke vode i udaljeno od bilo kojeg mjesta gospodarskog interesa kao što su aktivna naftna ležišta ili rudnici. Dubina utječe i na kapitalne i na operativne troškove. U slučaju dubljih bušotina, cijena raste s dubinom bušotine, kao i potreba za robusnijim postrojenjem i to spada pod kapitalne troškove, dok operativni troškovi uključuju troškove održavanja i rastu zbog potrebe za korištenjem opreme (pumpi) veće snage (Nadeem et al., 2005).

Odlaganjem otpada u propusne formacije veće dubine, smanjuje se šansa migracije utisnutog fluida do površine, a dubina je također povezana i s količinom i vrstom otpada koji se utiskuje. U slučaju neopasnog otpada, na primjer netoksičnog komunalnog otpada, mala dubina ne predstavlja nikakvu ozbiljnu opasnost za okoliš, dok s druge strane, opasni otpad zahtijeva veću razinu sigurnosti, pa bi odlaganja takve vrste otpada trebalo biti na većim dubinama s višestruko nepropusnim do polupropusnim slojevima između ležišta i vodonosnika (Nadeem et al., 2005).

Volumen otpada koji se može zbrinuti hidrauličkim frakturiranjem ovisi o kapacitetu skladištenja ležišne stijene uključujući debljinu, prostiranje i poroznost susjednih slojeva. Idealno ležište trebalo bi biti velike debljine i širokog prostiranja kako bi moglo primiti značajne količine tekućeg i krutog otpada bez porasta tlaka, te kako bi se omogućio smještaj više utisnih bušotina (Nadeem et al., 2005).

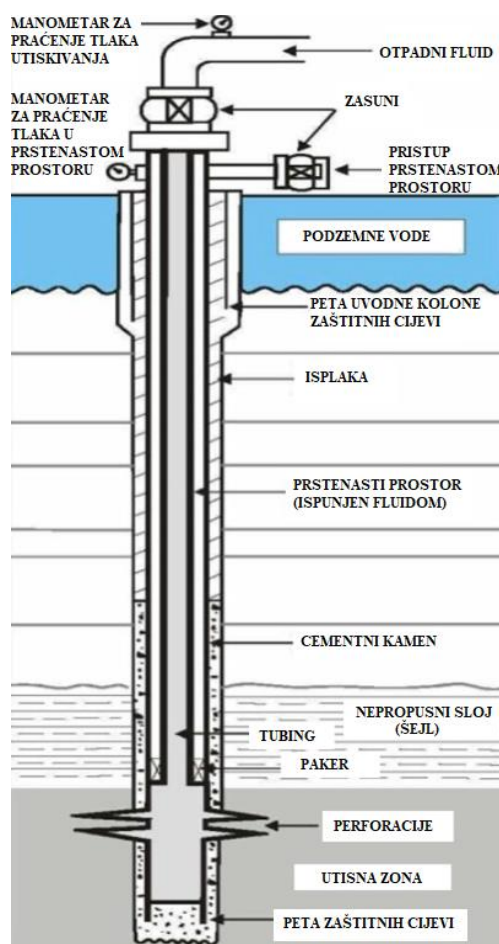
5.2. Kriterij za odabir utisne bušotine

Kriteriji za odabir utisne bušotine u naftnom rudarstvu uključuju nekoliko ključnih aspekata, koji se odnose na karakteristike otpada, konstrukciju bušotine i tehnološke postupke utiskivanja. Bušotine moraju biti konstruirane tako da mogu podnijeti tlak i

kemijsku agresivnost otpada. Otpornost materijala, integritet cementa i cijevi, te dubina bušotine ključni su za osiguranje sigurnog i dugotrajnog utiskivanja. Uvjet kod konstrukcije utisnih bušotina je postojanje najmanje tri koncentrična niza cijevi (Slika 5-2.) izrađenih od materijala otpornih na koroziju:

1. uvodna kolona - proteže se od površine do ispod najdubljeg vodonosnika pitke vode,
2. tehnička kolona (jedna ili više njih) – proteže se od površine do utisne zone ili prolazi kroz utisnu zonu, te sprječava zagađenje,
3. tubing – dovodi otpad do utisne zone.

Važnu funkciju ima i paker koji se ugrađuje iznad zone utiskivanja, brtvi prostor između tubinga i zadnje ugrađene kolone, te omogućava održavanje konstantnog tlaka u prstenastom prostoru.



Slika 5-2. Tipična utisna bušotina klase II (North Dakota Department of Mineral Resources, n.d.)

Cementiranje zaštitnih cijevi je ključan proces u konstrukciji bušotina. Ovaj proces osigurava stabilnost bušotine i sprječava migraciju fluida između različitih podzemnih slojeva. Cementiranje također štiti bušotinu od vanjskih čimbenika, čime se osigurava dugovječnost i sigurnost. Ispravna cementacija je ključna jer se greške kasnije teško

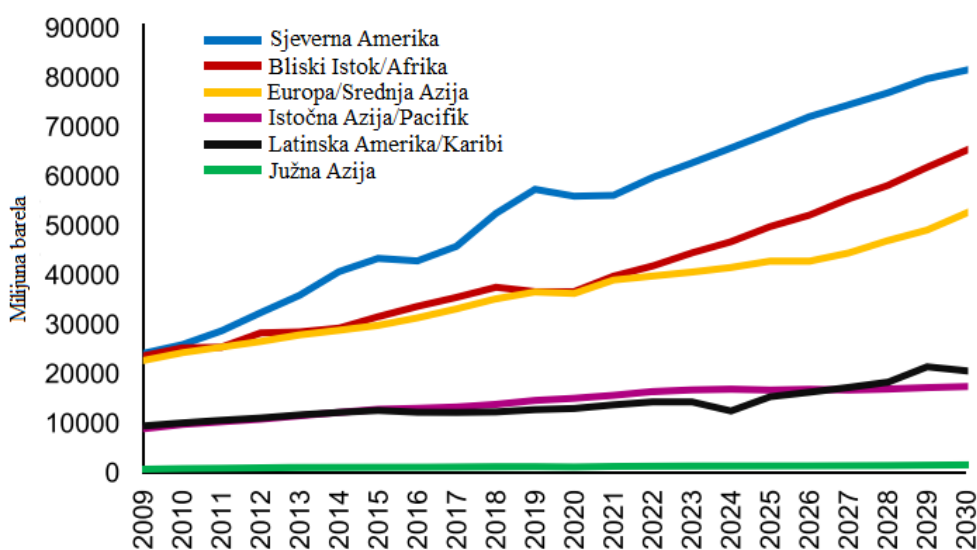
ispravljaju. U procesu cementiranja ispunjavaju se prostori između vanjskih stijenki kolone i stijenki kanala bušotine, te između dvije kolone, čime se osigurava čvrstoća i stabilnost strukture (Gaurina-Međimurec i Pašić, 2011).

Portland cement je najčešće korišten cement u industriji zbog svoje odlične čvrstoće, stabilnosti, niske cijene i učinkovitosti, te je pogodan za opće cementiranje zaštitnih cijevi. Međutim, poznato je da je termodinamički nestabilan u okolišima bogatim CO₂, što može dovesti do njegove degradacije (Barlet-Gouédard et al., 2009). U takvim okolnostima, potrebno je koristiti cimente otporne na CO₂ koji osigurava dugoročnu stabilnost i sigurnost bušotine u takvim agresivnim uvjetima (Barlet-Gouédard et al., 2007).

6. UTISKIVANJE SLOJNE VODE

Slojna voda se tijekom radnog vijeka ležišta ugljikovodika pridobiva zajedno s naftom i/ili plinom. Zbog štetnog utjecaja na okoliš i javno zdravlje, razvila se metoda utiskivanja slojne vode natrag u podzemlje. S obzirom na volumen, proizvedena slojna voda čini najviše otpada u industriji nafte i plina. Uzimajući u obzir svjetsku proizvodnju nafte i povezane vode, omjer iznosi otprilike 3:1 (Jimenez et al., 2018). Volumen ukupno proizvedene slojne vode u svijetu iznosi 39,5 milijuna metara kubičnih dnevno (Jimenez et al., 2018).

Obzirom na starost eksploatacijskih polja ugljikovodika i pojavom novih polja, proizvedena slojna voda kao neizbježan nusproizvod pridobivanja ugljikovodika ima tendenciju povećanja na godišnjoj razini. Očekuje se da će se proizvodnja slojne vode povećati zbog povećane potražnje za naftom i plinom, zajedno s povećanom svjetskom proizvodnom aktivnošću. Sjeverna Amerika, Bliski Istok/Afrika i Europa/Srednja Azija predstavljaju regije s najvećom količinom slojne vode u sastavu pridobivenog fluida (Slika 6-1.) (Amakiri, 2022).



Slika 6-1. Volumen proizvedene slojne vode po regijama (Amakiri, 2022)

S obzirom na zabrinutost za okoliš oko ispuštanja proizvedene slojne vode, zemlje proizvođači nafte i plina u različitim regijama (Slika 6-1.), uspostavile su regulatorne smjernice, koje definiraju razumne, odnosno maksimalno dopuštene koncentracije ili ograničenja pojedinih komponenata u ispuštima, podupirući sigurnu praksu za zaštitu zdravlja ljudi, životinja, usjeva i morskog okoliša. Druge zemlje su uvele ograničenje, tzv. nulto ispuštanje fluida u okoliš (engl. *zero liquid discharge*), koje podrazumijeva strateško

upravljanje otpadnim vodama na način da se industrijske otpadne vode ne ispuštaju u okoliš (Iggunu i Chen, 2012). Okvirna direktiva EU-a o vodama uvela je takvo ograničenje 2000. godine, kao odgovor na potrebu rješavanja onečišćenja vode (EUR-Lex, 2000). Na tragu toga, Konvencijom o suradnji u zaštiti, upravljanju i razvoju morskog i obalnog okoliša atlantske obale regije zapadne i središnje Afrike (engl. *The Convention for Cooperation in the Protection, Management and Development of the Marine and Coastal Environment of the Atlantic Coast of the West and Central Africa Region*) (UN Environment Programme, 2024), te Konvencijom za zaštitu morskog okoliša Sjeveroistočnog Atlantika (engl. *The Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic*, OSPAR) (OSPAR Commision, 2024), pokriveno je 18 regija svijeta gdje je također zabranjeno ispuštanje kemikalija u morski okoliš (Slika 6-2.) (Amakiri, 2022).



Slika 6-2. Svjetske regulatorne regije (Amakiri, 2022)

6.1. Postupanje s proizvedenom slojnom vodom

Nakon što se nafta i plin izdvoje, proizvedena slojna voda se odvaja i obrađuje prije ispuštanja u površinske vode (uključujući mora, rijeke, jezera itd.) ili na kopno (uključujući bazene za isparavanje). Proizvedena voda također se može utisnuti ili u proizvodno ležište u svrhu EOR-a ili u drugu odgovarajuću bušotinu za odlaganje (IOGP, 2021).

S obzirom na to da sastav proizvedene slojne vode čine otopljene i dispergirane čestice nafte, otopljene čestice minerala iz formacije, proizvedene čvrste čestice, kemijski aditivi i otopljeni plinovi (Tablica 6-1.) (Jimenez et al., 2018), njezino ispuštanje u okoliš bez odgovarajućeg tretmana predstavlja ozbiljnu prijetnju za okoliš, posebno za podzemne i površinske vodne resurse.

Tablica 6-1. Glavne komponente vode proizvedene u naftnim poljima (izrađeno prema Amakiri, 2022)

SASTAV SLOJNE VODE	OPIS
Otopljeni organski spojevi	Policiklički aromatski ugljikovodici, organske kiseline, BTEX (benzen, toluen, etilbenzen i ksileni), fenoli.
Otopljeni minerali i teški metali	Općenito visoka koncentracija ovisno o geološkoj formaciji. Neki otopljeni minerali mogu učiniti vodu izrazito slanom.
Proizvedene čvrste čestice	Prirodne čvrste tvari i umjetne čvrste tvari dvije su klase proizvedenih čvrstih tvari povezanih s proizvodnjom nafte i plina.
Kemijski aditivi	Kemijski aditivi primijenjeni u radu bušotine za poboljšanje proizvodnje mogu izazvati toksičnost.
Ulja i masti	Ulja i masti mogu nastati uslijed kontakta s formacijom koja nosi ugljikovodike.
Otopljeni plinovi	Sumporovodik, ugljikov dioksid, kisik.

Fizikalna i kemijska svojstva slojne vode variraju ovisno o lokaciji polja, sastavu ležišnih stijena, metodi pridobivanja i tipu ugljikovodika koji se proizvodi. Svojstva i volumen vode variraju kroz radni vijek bušotine (Jimenez et al., 2018). Dopuštene granice ispuštanja variraju među različitim regulatornim agencijama. Prema EPA-inim smjernicama, i prikazanim u Tablici 6-2., najviša dopuštena koncentracija određenih onečišćujućih tvari u vodi (izražena u $\mu\text{g/L}$) ne bi trebala predstavljati značajan rizik za većinu vrsta u određenom ekosustavu. U Nigeriji, međutim, Odjel za naftne resurse (engl. *Department of Petroleum Resources*, DPR) postavlja drugačije granice ispuštanja (i uglavnom se mjere u mg/L). Razlog leži u tome što su zemlje predložile različite standardne metode za mjerenje nafte u proizvedenoj vodi ili koncentracije proizvedene vode (Amakiri, 2022).

Tablica 6-2. Dopuštene granice koje su utvrdile različite regulatorne agencije (izrađeno prema Amakiri, 2022)

KEMIKALIJA	EPA (µg/L)	DPR (µg/L)
Fenol	4	50
Benzen	0,00058-0,0021	10
Toluen	0,52	20
Nikal	0,61	20
Antracen	0,3	Nema podataka
Etilbenzen	0,13	20
Živa	0,0004	Nema podataka
Olovo	0,000015	50
Kadmij	0,000005	Nema podataka
Krom	0,0001	30
Bakar	1,3	1000
Natrij	20,2	Nema podataka
Barij	1,0	30
Mangan	0,1	400
Cink	7,4	1500
Kalij	Nema podataka	300
Ukupno otopljene tvari	250	5 000 000
Željezo	2,0	200
Klorid	0,25	1 050 000
Kalcij	Nema podataka	400 000

6.2. IOGP izvješća o proizvedenoj slojnoj vodi

Međunarodna udruga proizvođača nafte i plina (engl. *The International Association of Oil and Gas Producers*, IOGP) prikuplja i objavljuje podatke o okolišu od svojih kompanija članica svake godine, počevši od 2001. Krajnji cilj ovog nastojanja je pružiti reprezentativnu izjavu o ekološkoj učinkovitosti kompanija članica IOGP-a. Godine 2021., 40 kompanija članica IOGP-a prijavilo je podatke o okolišu, a podaci su pokrivali operacije u ukupno 72 zemlje.

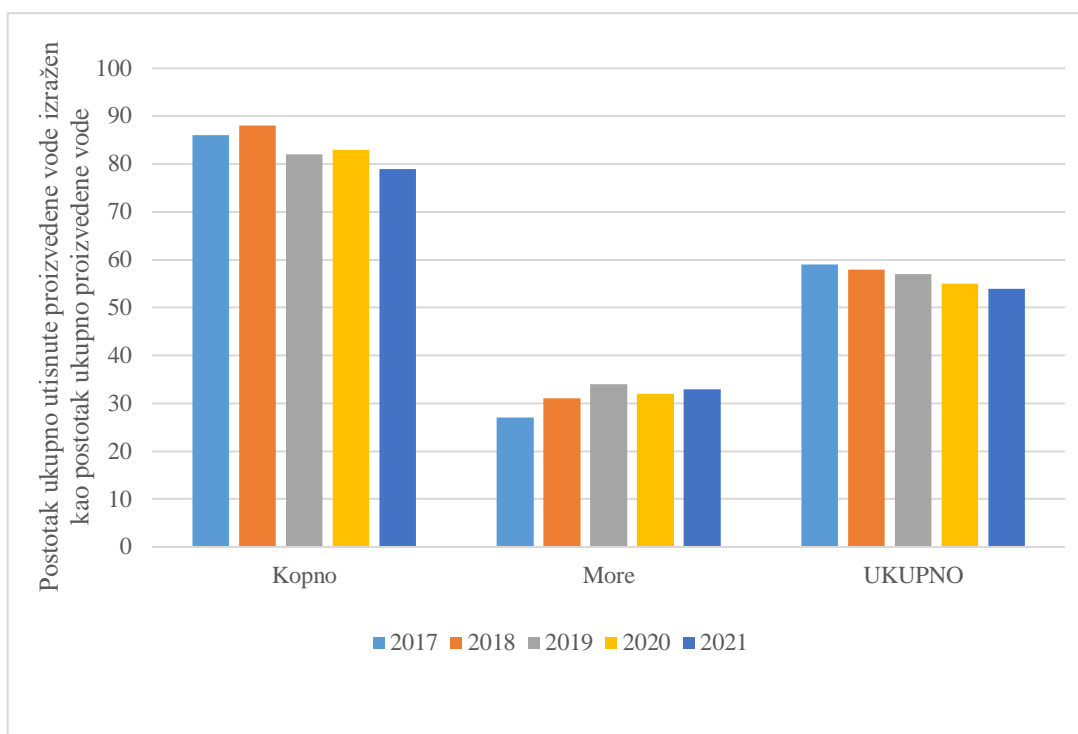
6.2.1. Kopno

Na kopnu, gdje je odlaganje na površinu često ograničeno regulatornim i okolišnim zahtjevima, utiskivanje proizvedene slojne vode za potrebe EOR-a ili u svrhu konačnog odlaganje su najčešće metode postupanja. U 2021. godini, prema podacima iz izvještaja koje su podnijele kompanije, 79 % proizvedene slojne vode iz kopnenih postrojenja za obradu vraćeno je u duboka geološka ležišta (Slika 6-3.) (IOGP, 2021).

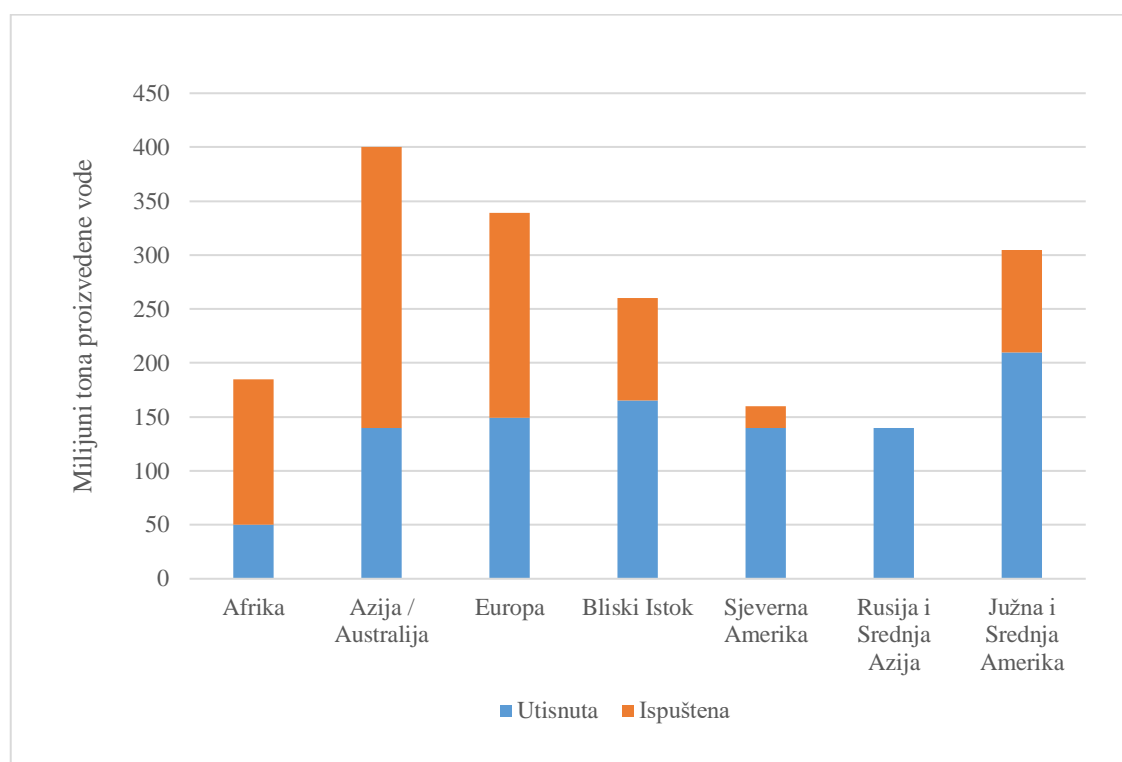
6.2.2. More

Na odobalnim postrojenjima, obrađena proizvedena slojna voda obično se može ispuštati u more (uz postojeći ograničeni utjecaj), stoga je postotak ponovno utisnute slojne vode iznosio tek 33 % u 2021. godini, što je znatno manje nego u slučaju postupanja s proizvedenom slojnom vodom na kopnu. Utiskivanje slojne vode u podzemlje se također provodi u svrhu održavanja ležišnog tlaka, kada sastav vode dopušta ponovno utiskivanje ili gdje osjetljivost okoliša zahtijeva takav pristup (IOGP, 2021).

Iako je ukupan postotak ponovno utisnute proizvedene slojne vode nizak, postoje velike razlike po regijama između utisnute i ispuštene proizvedene sloje vode (Slika 6-4.). Na primjer, tvrtke članice IOGP-a, koje posluju u regiji Rusija i središnja Azija, izvijestile su o 100%-tnom utiskivanju proizvedenih količina slojne vode na odobalnim postrojenjima, dok primjerice u Africi taj postotak iznosi tek 21 % (IOGP, 2021).



Slika 6-3. Postotak ponovno utisnute slojne vode, izražen kao postotak ukupno proizvedene slojne vode u periodu 2017. - 2021. (izrađeno prema IOGP, 2021)

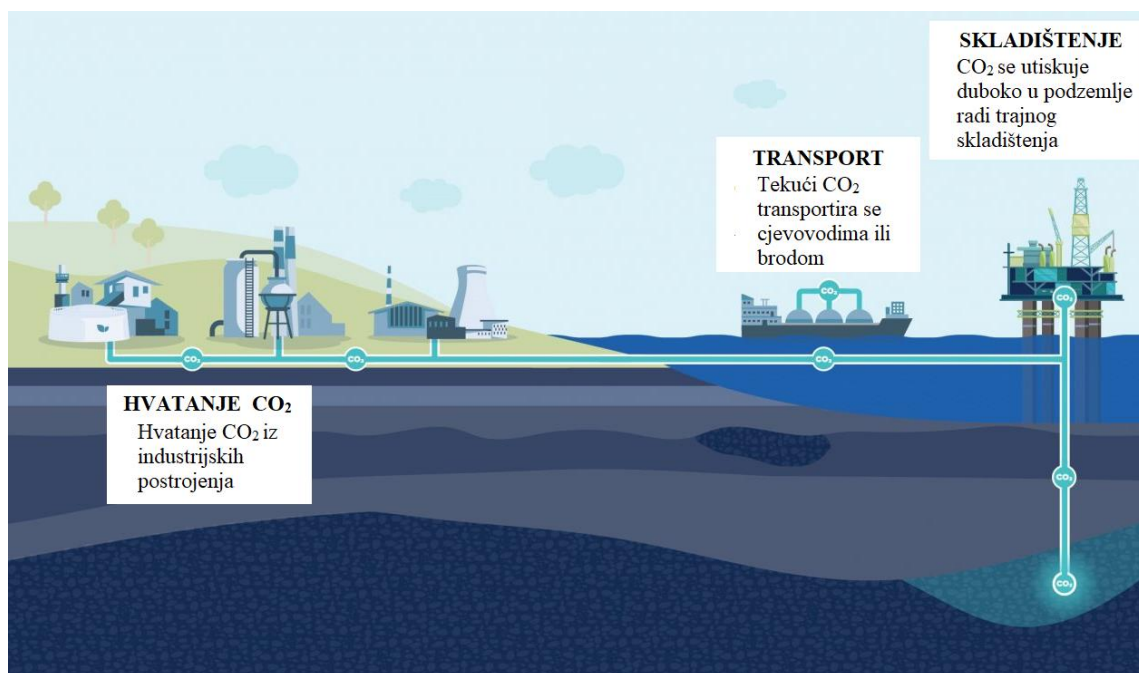


Slika 6-4. Odnos utisnute i ispuštene proizvedene slojne vode po regijama u periodu 2019. – 2021. (izrađeno prema IOGP, 2021)

7. HVATANJE I SKLADIŠTENJE CO₂

S ciljem smanjenja emisija ugljikovog dioksida razvijen je koncept hvatanja i skladištenja ugljika, CCS, koji obuhvaća (Slika 7-1.):

- hvatanje ugljikovog dioksida na njegovom izvoru,
- transport ugljikovog dioksida od izvora do odgovarajućeg mjesta skladištenja,
- skladištenje ugljikovog dioksida u podzemne formacije.



Slika 7-1. Faze procesa hvatanja i trajnog skladištenja ugljikovog dioksida (Global CCS Institute, 2024)

Tijekom hvatanja, CO₂ se odvaja od ostalih plinova proizvedenih u velikim industrijskim postrojenjima, kao što su čeličane, cementare, petrokemijska postrojenja, elektrane na ugljen i plin ili iz atmosfere. Ovisno o vrsti goriva koje izgara, koncentraciji CO₂ u struji plina i tlaku, primjenjuje se jedan od sustava za hvatanje (Gaurina-Međimurec et al., 2018):

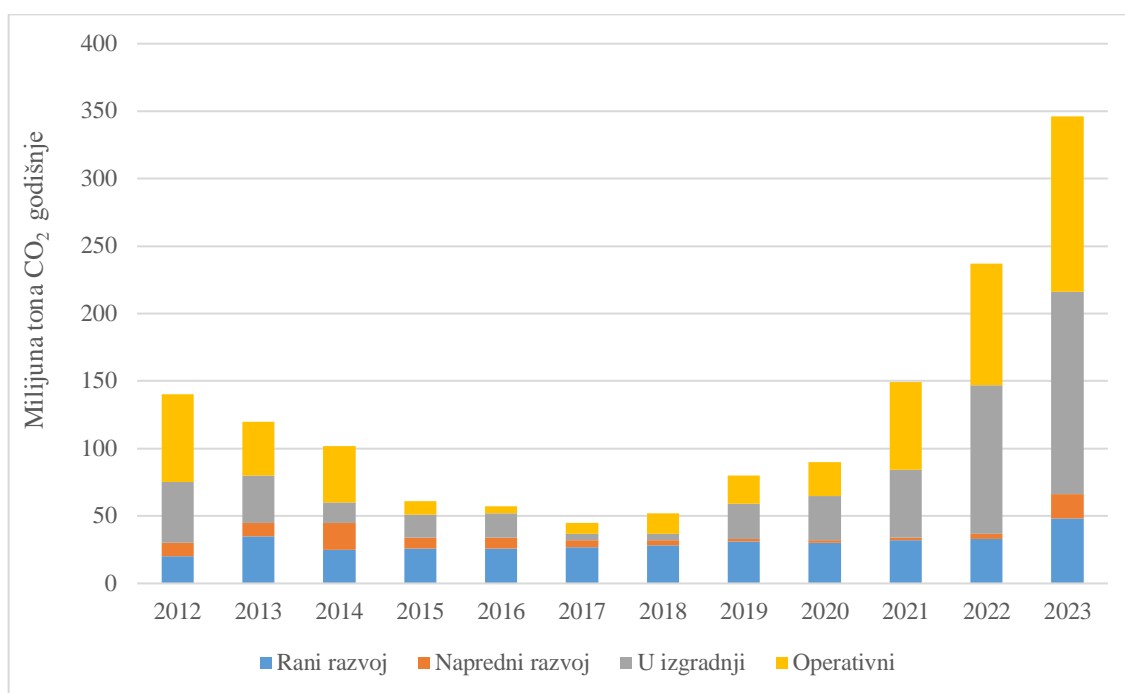
- sustav za hvatanje prije izgaranja (engl. *Pre-Combustion Capture System*),
- sustav za hvatanje nakon izgaranja (engl. *Post Combustion Capture System*),
- sustav za izgaranje goriva u struji kisika (engl. *Oxyfuel Combustion System*),
- industrijsko izdvajanje CO₂ (engl. *Industrial Separation*).

Nakon što se ugljikov dioksid izdvoji, komprimira se i dehidrira prije slanja u transportni sustav (Global CCS Institute, 2024). Transport CO₂ najčešće se obavlja cjevovodima, ali u

nekim regijama svijeta alternativa je transport brodom. Fleksibilnost transporta također može olakšati početni razvoj čvorišta za hvatanje CO₂, koja bi se kasnije mogla povezivati ili pretvarati u trajniju cjevovodnu mrežu kako količine uhvaćenog CO₂ rastu. U nekim slučajevima, transport brodovima može biti opcija prijevoza, posebno za prijevoz na velike udaljenosti, koji bi mogao biti opcija zemljama s ograničenim skladišnim kapacitetima. Na određenim lokacijama CO₂ je moguće transportirati cestovnim putem (kamionski prijevoz) ili željeznicom od mjesta hvatanja do najbližeg mjesta skladištenja (IEA, 2019).

Nakon transporta, CO₂ se utiskuje u duboke podzemne slojeve i geološke strukture, često na dubinama od jednog kilometra ili više, gdje se sigurno i trajno skladišti. Gotovo 300 milijuna tona CO₂ do danas je sigurno i uspješno utisnuto u podzemlje (Global CCS Institute, 2024). Srećom, diljem svijeta postoji obilje prostora za odlaganje, a postupak utiskivanja može se odvijati na kopnu ili na moru, u iscrpljenim naftnim i plinskim ležištima ili dubokim slanim akviferima, s time da duboki slani akviferi nude veći skladišni prostor. U Europi se skladištenje CO₂ uglavnom odvija na moru, a najčešće se radi o Sjevernom moru (Global CCS Institute, 2024).

Općenito, implementacija CCS-a još je uvijek u začecima, a kako bi tehnologija doista postigla cilj, postojeća postrojenja potrebno je dalje razvijati, učiniti ih mnogo učinkovitijima i postaviti ih za serijsku primjenu. Sredinom 2023. godine, broj komercijalnih, velikih CCS projekata koji su bili u pogonu u cijelom svijetu bio je 41, od čega se njih 29 odnosilo na EOR projekte. Velik broj projekata (njih 392) je u pripremi, dok je u fazi realizacije 26 projekata (Slika 7-2.). Također, može se primijetiti da 78 % CCS postrojenja, koja su trenutno u fazi izgradnje ili razvoja, planira koristiti namjensko geološko skladište, naglašavajući sve veći odmak od skladištenja CO₂ kroz EOR projekte (Global CCS Institute, 2023).



Slika 7-2. Kapaciteti CCS postrojenja (izrađeno prema Global CCS Institute, 2023)

7.1. Primjeri operativnih CCS projekata

Prema bazi podataka Svjetskog instituta za hvatanje i skladištenje CO₂ (engl. *Global Carbon Capture and Storage Institute, GCCSI*) iz 2023. godine, trenutno je u funkciji 41 veliko CCS postrojenje. U Tablici 7-1. prikazana su sva trenutno aktivna postrojenja s kapacitetom većim od 1 Mt/god.

U nastavku poglavlja dan je pregled projekta Sleipner gdje se gotovo 30 godina CO₂ uspješno skladišti, te predstavlja pionirski korak u tehnologiji CCS-a i služi kao model za slične inicijative širom svijeta.

Tablica 7-1. Popis operativnih CCS projekata s kapacitetom hvatanja, transporta i/ili skladištenja većim od 1 Mt/god (izrađeno prema Global CCS Institute, 2023)

POSTROJENJE	DRŽAVA	POČETAK RADA	KAPACITET (Mt/god)	SVRHA
Projekt Sleipner	Norveška	1996.	1	CCS
SaskPower termoelektrana na ugljen	Kanada	2014.	1	EOR
Industrijski CCS projekt Illinoisu	SAD	2017.	1	CCS
Sinopec Qilu-Shengli	Kina	2022.	1	EOR
Naftno polje Clive	Kanada	2020.	1,12	EOR
Quest	Kanada	2015.	1,3	CCS
Rafinerija NWR Sturgeon	Kanada	2020.	1,6	EOR
Qatargas Qatar LNG	Katar	2019.	2,2	CCS
Tvornica sintetičkih goriva Great Plains i Weyburn-Midale	SAD	2000.	3	EOR
Chevron Gorgon	Australija	2019.	4	CCS
Longfellow WTO Century postrojenje	SAD	2010.	5	EOR
Postrojenje za preradu plina Shute Creek	SAD	1986.	7	EOR
Petrobras naftno polje bazena Santos	Brazil	2008.	10,6	EOR
Cjevovod Wolf Alberta Carbon Trunk Line	Kanada	2020.	14,6	EOR

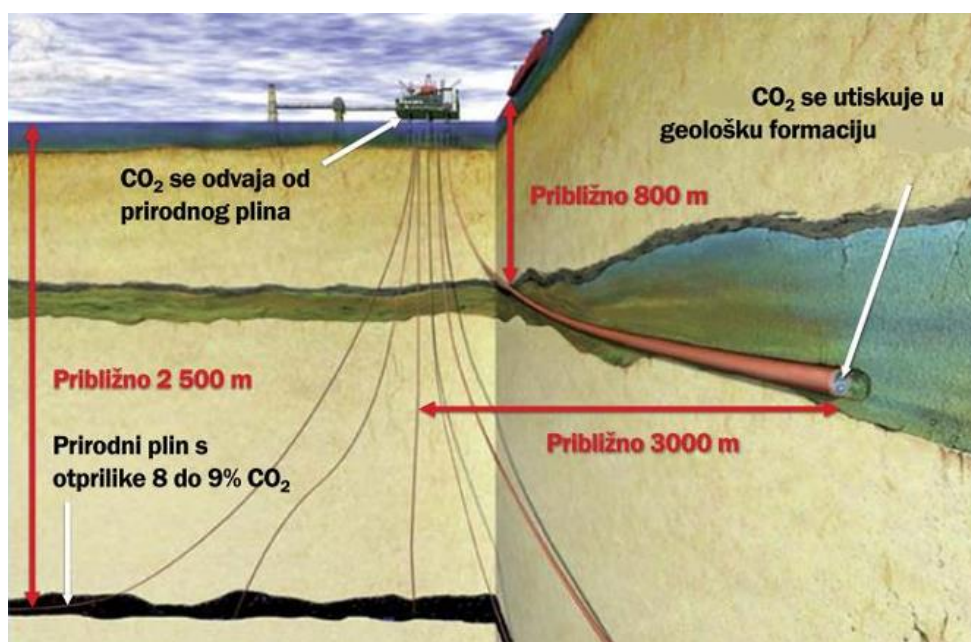
7.1.1. Projekt Sleipner, Norveška

Projekt Sleipner, kojeg provodi Equinor (bivši Statoil), smješten u norveškom dijelu Sjevernog mora, prvi je komercijalni i jedan od najvažnijih CCS projekata u svijetu. Glavni razlog za odluku o pokretanju projekta davne 1996. godine bili su nacionalni porezi na CO₂ koji su uvedeni nekoliko godina ranije. Umjesto da plati visoke poreze za emisije,

Statoil je odlučio razviti tehnologiju koja bi omogućila skladištenje CO₂ pod zemljom (Vattenfall, 2024).

Prirodni plin, proizveden s dubine od oko 3400 do 3600 metara iz ležišta plinskog polja Sleipner Vest sadrži oko 9 % CO₂, dok tržišne specifikacije zahtijevaju manje od 2,5 %. Izdvojeni CO₂ sadrži 1 – 2 % metana i utiskuje se u formaciju Utsira na dubini od oko 800 metara ispod morskog dna. Utiskivanje se vrši putem horizontalne bušotine (Slika 7-3.) (Chadwick i Eiken, 2013).

Projektom Sleipner emisije CO₂ iz norveške industrije smanjuju se za oko 1 milijun tona godišnje, što značajno doprinosi naporima zemlje u borbi protiv klimatskih promjena. Ukupno gledano, projektom je do sada uskladišteno više od 20 milijuna tona CO₂ (Equinor, 2024).



Slika 7-3. Ilustracija tehnologije CCS na polju Sleipner (CO₂GeoNet, 2009)

8. AKCIDENTI I RIZICI UTISKIVANJA OTPADA

Ključni problemi koji mogu nastati kod provođenja projekata utiskivanja otpadnih fluida u podzemlje uključuju akcidente istjecanja manjih količina otpadnog fluida iz sustava, ali i ozbiljnije akcidente koji mogu predstavljati ozbiljne rizike za ljudsko zdravlje i okoliš te potencijalno rezultirati ekološkom katastrofom.

Glavni čimbenici sigurnog rada utisne bušotine su karakteristike lokacije, dizajn, konstrukcija, karakteristike otpada i operativni postupci. Iako su mnogi od ovih faktora regulirani različitim mjerama i dalje postoji rizik od nepredviđenih kvarova. Razumijevanje geologije i hidrologije područja ključno je za određivanje lokacije podzemnog skladišta. Informacije o debljini, veličini, položaju formacija u zemljinoj kori i karakteristikama stijena, poput poroznosti, propusnosti i strukturalne stabilnosti, predstavljaju ključne informacije za osiguranje potrebnih uvjeta (Simpson i Lester, 2009).

Jedan od glavnih problema je interakcija između utisnutih otpadnih fluida i stijena u formaciji utiskivanja. Kemijske reakcije između utisnutog fluida i stijena mogu uzrokovati formiranje taloga koji mogu začepiti bušotinu ili utisnu formaciju (Simpson i Lester, 2009). Korozivni otpad, poput kiselina, može također negativno djelovati na stijene proširujući šupljine u utisnim formacijama i uzrokujući nestabilnost u pokrovnim slojevima. Na primjer, u okrugu Polk na Floridi, kiseli industrijski otpad stvorio je šupljinu visoku 30 metara i široku 7 metara, što je predstavljalo rizik od urušavanja gornjih slojeva stijena (Simpson i Lester, 2009).

Prema Simpson i Lester (2009), primjeri potencijalnih rizika uključuju:

- neodgovarajući dizajn i/ili konstrukcija rezultiraju oštećenjima i istjecanju CO₂,
- loša cementacija uzrokuje dotok otpada u bušotinu,
- propuštanje opreme (zaštinih cijevi, tubinga, pakera) uslijed korozije ili drugim načinom utvrđene neispravnosti,
- neispravna kontrola tlaka ili neispravni mjerači koji dovode do prekomjernog povećanja tlaka i naknadnog kvara opreme za utiskivanje, lomljenja utisne formacije ili eventualno inducirane seizmičnosti, tj. potresa,
- migracija utisnutog fluida kroz obližnje napuštene ili nepropisno likvidirane bušotine (bušotine za naftu, plin, vodu ili druge utisne bušotine),
- nepravilno izveden postupak napuštanja bušotine može dovesti do migracije utisnutog fluida,

- kemijske reakcije među komponentama otpada i/ili otpada i formacije, koje uzrokuju koroziju, migraciju utisnutog fluida, čepljenje zone utiskivanja itd.,
- loše upravljanje/rad koji dovodi do pogrešaka i kršenja dozvola izdanih za rad bušotine (uporabna, dozvola za gospodarenje otpadom).

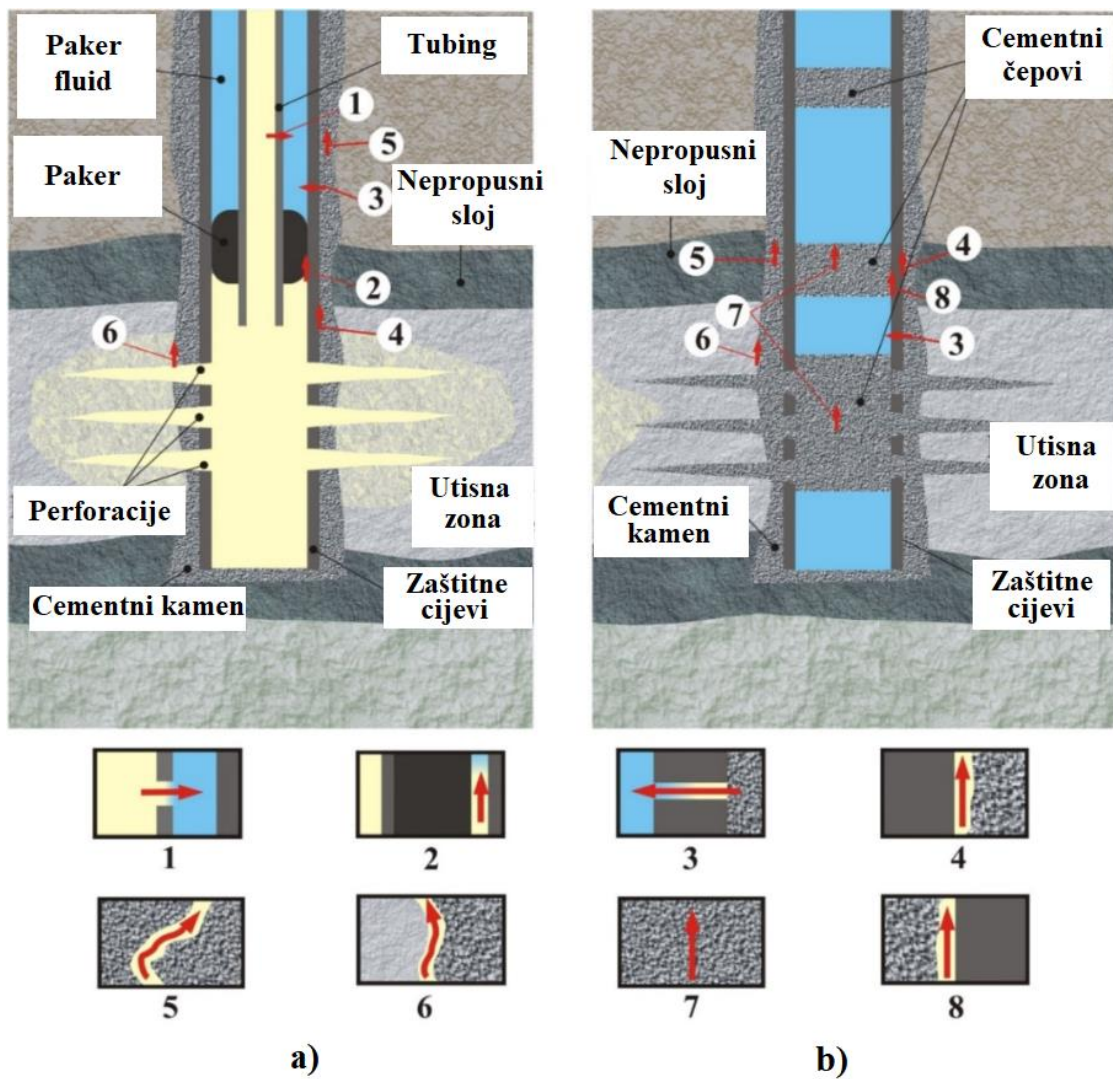
8.1. Rizici povezani s utiskivanjem

Mogući putevi migracije utisnutog otpada prema podzemnim izvorima pitke vode i prema površini su (Nelson et al., 2005):

- propuštanje tubinga ili kolone zaštitnih cijevi,
- loše cementirana ili opremljena bušotina,
- rasjedi ili pukotine u pokrovnim stijenama,
- napuštene bušotine.

Mogući putevi migracije fluida u aktivnoj i napuštenoj bušotini (Slika 8-1.) (Gaurina-Međimurec i Pašić, 2011):

1. propuštanje tubinga,
2. propuštanje pakera,
3. propuštanje kolone zaštitnih cijevi,
4. migracija fluida na kontaktu između kolone zaštitnih cijevi i cementnog kamena,
5. migracija fluida kroz cementni kamen,
6. migracija fluida na kontaktu između cementnog kamena i probušenih stijena,
7. migracija fluida kroz cementne čepove,
8. migracija fluida na kontaktu između cementnog čepa i kolone zaštitnih cijevi.



Slika 8-1. Mogući putevi migracije fluida u a) aktivnoj i b) napuštenoj bušotini (Gaurina-Međimurec et al., 2020)

8.2. Primjeri akcidenata utisnih bušotina i njihove posljedice u različitim regijama SAD-a

Sljedeći primjeri u Tablici 8-1., predstavljaju incidente vezane za kršenje propisanog u dozvolama utiskivanja otpada, koji su registrirani u SAD-u u zadnjih pedesetak godina. Zbog intenzivne industrijske aktivnosti, incidenti su najčešće zabilježeni u državama poput Kalifornije, Floride i Teksasa, gdje su koncentrirana industrijska postrojenja, uključujući rafinerije i naftne bušotine. Otpadne slane vode, koje su nusproizvod ovih industrijskih procesa, osobito u naftnoj i plinskoj industriji, glavni su uzrok onečišćenja podzemnih voda. Također, incidenti često uključuju i kiseline poput klorovodične i dušične, kao i razne organske spojeve i pesticide, uključujući benzen i druge opasne tvari. Veliki udio otpada dolazi iz kemijske industrije, uključujući teške metale, cijanid i različita otapala.

Naftna i petrokemijska industrija prednjače u broju incidenata, dok poljoprivredna industrija također značajno doprinosi zagađenju zbog upotrebe pesticida i kemikalija.

Najčešći uzrok ovih incidenata je propuštanje zaštitnih cijevi, što omogućava migraciju otpadnih tvari u podzemne vode ili njihovo izlivanje na površinu. U mnogim slučajevima dolazi i do hidrauličkog frakturiranja ili migracije fluida, pri čemu otpadni fluidi zagađuju podzemne vodonosnike i rijeke, ugrožavajući izvore pitke vode. Pored tehničkih kvarova, čest uzrok incidenata je nezakonito odlaganje otpada ili kršenje regulativa, što je posebno izraženo u slučajevima gdje su opasne tvari nepropisno odlagane u neprikladne bušotine.

Upravljanje otpadnim vodama predstavlja značajan izazov, osobito u južnoj Floridi, gdje se utiskivanje koristi kao metoda zbrinjavanja komunalnih otpadnih voda. Iako se često smatra sigurnom opcijom, incidenti u Miami-Dadeu i drugim regijama poput Michigana i Ohija otkrivaju potencijalne rizike, uključujući kontaminaciju podzemnih voda. U ovom poglavlju detaljnije su opisani slučajevi iz Miami-Dadea, Romulusa i Vickeryja, kako bi se prikazali razni aspekti problema i naglasila važnost regulacije i nadzora u procesu odlaganja otpada.

Iako su neki podaci prisutni u relevantnim bazama, često su bili jako šturi i nedovoljno detaljni za sveobuhvatnu analizu, kao podaci korišteni u ovom slučaju, što predstavlja poteškoće s dostupnošću podataka. Ova ograničenja dodatno naglašavaju potrebu za poboljšanjem prikupljanja i objavljivanja podataka o incidentima vezanim uz zbrinjavanje otpada.

Tablica 8-1. Popis incidenata prilikom utiskivanja po SAD-u (izrađeno prema Simpson i Lester, 2009)

LOKACIJA	VRSTA OTPADA	INCIDENT	GODINA
Bucks (Stauffer Chem. Inc.), Alabama	Natrijev klorid (NaCl) i natrijev hidroksid (NaOH) slana otopina; tragovi fosfata i organskih spojeva; nusproizvodi poljoprivrednih kemikalija	Propuštanje zaštitnih cijevi.	1963. i 1985.
Fairfield (U.S. Steel Corp.), Alabama	Otpadna tekućina prehrambene industrije, klorovodična kiselina	Propuštanje zaštitnih cijevi; čepljenje formacije čvrstim česticama; došlo je do hidrauličkog frakturiranja, propuštanje prstenastog prostora.	Nema podataka.
Baldwin Hills, Kalifornija	Nema podataka	Propuštanje ležišta uslijed seizmičkih aktivnosti.	1973.
Rio Bravo, Kalifornija	Pesticidi i otapala (klasa I)	Propuštanje zaštitnih cijevi.	1985.
Santa Maria (Greka Integrated, Inc), Kalifornija	Otpad iz rafinerije nafte u bušotini klase II, benzen	Kršenje SDWA ilegalnim odlaganjem otpada generiranog u rafinerijama nafte u bušotinu klase II, umjesto u obaveznu bušotinu klase I. Odlaganje vode kontaminirane benzenom u bušotine koje nisu dopuštene za takvo odlaganje.	2006.
Rijeka Tuolumne, Kalifornija	Otpadne slane vode (klasa II)	Neispravno proveden postupak likvidirane plinske bušotine.	1973.
Okruzi Adams i Wade, Colorado	Otpad od odlaganja slane vode (klasa II)	Onečišćeni bunari.	1973.
Denver (Rocky Mountain Arsenal), Colorado	Pesticidi iz petrokemijske tvornice	Inducirana seizmička aktivnost.	1984.

LOKACIJA	VRSTA OTPADA	INCIDENT	GODINA
Belle Glade (mlin za šećernu trsku), Florida	Vruće kiseline i visokoorganski otpad	Otpad je migrirao u duboke i plitke mjerne bušotine; Migracijom otpada došlo do onečišćenja vodonosnika pitke vode.	1984.
Okrug Dade (3500 plitnih drenažnih bušotina), Florida	Povratna voda za hlađenje, otpadne vode bazena, otpad iz klaonica, kruti otpad od baterija, metalni otpad, otpad iz praonica rublja	Onečišćenje vodonosnika pitke vode Biscayne.	1973.
Okrug Dade (Postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda), Florida	Komunalne otpadne vode: povišene razine amonijaka, kloridi; fekalni koliform	Uzlazna migracija utisnute otpadne vode, zagađen podzemni izvor pitke vode; sumnja na mehanički kvar najmanje jedne od 17 bušotina.	2002.
Fort Lauderdale (Hollingsworth Solderless terminal), Florida	Trikloretilenski talog, bakar, ulja i masti	Onečišćenje vodonosnika migracijom otpada iz utisne bušotine.	1983.
Fort Meyers, Florida	Fenolni otpad	Onečišćenje vodonosnika pitke vode.	1983.
Live Oak i Gainesville, Florida	Nema podataka	Komunalni otpad koji se utiskuje u plitke bušotine povezane s vodonosnikom pitke vode.	1973.
Melbourne, Florida	Neobrađena kanalizacija, pročišćena komunalna otpadna voda	Pogreškom utisnuta neobrađena otpadna voda; migracija otpadne vode udaljena 365-460 metara; uzrokovano propuštanjem u zaštitnim cijevima.	1989.
Mulberry, Florida	Kiseli otpad	Otapanje karbonatnih stijena u zoni utiskivanja i propuštanje kroz nepropusni sloj.	1984.

LOKACIJA	VRSTA OTPADA	INCIDENT	GODINA
Okrug Palm Beach, Florida	Organski otpad	Onečišćenje plitkog vodonosnika; Potvrđena migracija fluida u podzemnim izvorima pitke vode iz duboke komunalne bušotine.	1973. i 2002.
Tvornica najlona Pensacola, Florida	Dušična kiselina, soli i brojne organske tvari	Porast tlaka i migracija otpada na udaljenosti od preko 1600 metara u svim smjerovima – vjerojatno stvaranje velike podzemne šupljine.	1984.
Okrug Pinellas (objekti grada St. Petersburga), Florida	Amonijak	Vjerojatna i potvrđena vertikalna migracija fluida; značajna promjena kvalitete vode.	2002.
Okrug Polk, Florida	Kiseli industrijski otpad	Oko bušotine stvorena šupljina visoka 30 i široka 7 metara.	1985.
Camilla, Georgia	Bušotina za odlaganje kreozota	Onečišćenje vodonosnika pitke vode.	1973.
Grandview, Idaho	Otrovne kemikalije	Onečišćenje podzemnih voda i rijeke Snake.	1977. i 1985.
Marshall (Velsicol Chemical Corp.), Illinois	Spojevi slični klordanu, otpad iz različitih procesnih postrojenja; neobrađeni otpad.	Propuštanje kolona zaštitnih cijevi. Onečišćenje podzemnih izvora pitke vode – onečišćenje pronađeno u Mill Creeku, njegovim pritokama i rijeci Wabash.	1984. i 2001.
Furley (Vulcan Chemical), Kansas	Organska otapala, pesticidi i PCB	Prisutnost kemikalija utvrđene na piježometrima i u privatnim bunarima pitke vode.	1985.
Lake Charles Willow Springs Site (Browning-Ferris Companies, Inc.), Louisiana	Komercijalni otpad	Radioaktivna i kemijska onečišćenja podzemnih voda i plitkih vodonosnika.	1984.

LOKACIJA	VRSTA OTPADA	INCIDENT	GODINA
Plaquemine (Rollings Environmental Services Inc.), Louisiana	Opasni i neopasni industrijski otpad i otpadne vode s naftnih polja	Dopušteno ispuštanje otrovnih i opasnih tvari u jarak uz cestu.	1985.
Sumpor (Tvrtke Browning-Ferris, Inc.), Louisiana	Tekući otpad od proizvođača industrijskog otpada	UIC pronašao propuštanje zaštitnih cijevi, onečišćenje podzemnih voda.	1984.
Yermilion Parrish (Quintena Petroleum Corp.), Louisiana	Opasni otpad naftnih polja	Dopušteno ispuštanje otrovnih i opasnih tvari u jarak uz cestu.	1984.
Okrug Newaygo, Michigan	Ukapljeni naftni plin (klasa III)	Onečišćenje vodonosnika pitke vode.	1973.
Midland (Kemijaska industrija Dow), Michigan	60 % opasnog otpada zemlje - dioksini, PCB- i, benzen, anilin, agent orange, 2,4,5-T, srebro, voda za ispiranje klase I.	Onečišćenje podzemnih voda.	1984. i 1967. – 1979.
Romulus, Michigan	Komercijalni otpad	Propuštanje u površinskom cjevovodu jedne od dvije bušotine; brojna kršenja UIC dozvola, uključujući utiskivanje bez prisutnosti operatera.	2007.
Indijanski rezervat Fort Peck u okrugu Daniels (Naftna kompanija Summer-night LLC i Miocene Oil and Gas Ltd.), Montana	Slana voda (klasa II)	Kršenje SDWA-a, uključujući propust u provođenju potrebnih ispitivanja bušotina; utiskivanje bez dozvole.	2007.
Wilmington (Hercules, Inc.), Sjeverna Karolina	Dimetil tetra ftalat, pH 4.0	Vertikalna migracija otpada u gornji vodonosnik.	1977. i 1985.

LOKACIJA	VRSTA OTPADA	INCIDENT	GODINA
Okrug Adams, Nebraska	Fenolni otpad	Onečišćenje plitkog vodonosnika.	1973.
Rudnik bakra, Nevada	Pomoćna sredstva za utiskivanje u ležišta rude (klasa III)	Onečišćenje plitkog vodonosnika.	1973.
Aurora (tvornica sira), New York	Tekući otpad	Propuštanje, otpad se pojavo na udaljenosti od 1600 metara.	1973.
Buffalo, New York	Cijanid	Erupcija bušotine za odlaganje, onečišćenje pitke vode.	1973.
Okrug Medena, Ohio	Otpad od slane vode (klasa II)	Propuštanje onečišćenog vodonosnika kroz napuštenu, neispravno likvidiranu bušotinu.	1973.
Vickery (6 bušotina - upravljanje kemijskim otpadom), Ohio	Dioksin, PCB, teški metali; komercijalni otpad	Propuštanja bušotinske opreme i ilegalno nadzemno odlaganje PCB-a i dioksina.	1984.
Elk City (Southern Management, Inc.), Oklahoma	Aceton, metiletilketon, metilizobutylketon, benzen, ksileni, toluen, metali (olovo, barij)	Bušotine klase I i II pretrpjele nekoliko erupcija zbog propuštanja tubinga i rada bez pakera (krivotvoreni UIC dokumenti); onečišćeno 9000 metara zemlje, vjerojatno izvor pitke vode i obližnji potok. Kontejneri za skladištenje onečistili obližnje zemljište.	1992.
Okruzi Okmulgee, Rogers, Muskogee,	Slana voda (klasa II)	Onečišćenje plitkog vodonosnika.	1973. i 1985.

LOKACIJA	VRSTA OTPADA	INCIDENT	GODINA
Nowata, Oklahoma			
Tulsa (Chemical Resource Inc.), Oklahoma	Cijanid, klorirani ugljikovodici i sulfidi	Onečišćenje podzemnih voda.	1985.
Erie (Tvornica papira Hammermill), Pennsylvania	Sulfitne tekućine, pH 5.3	Korozija na zaštitnim cijevima uzrokovala erupciju, koja je onečistila površinu tla na nekoliko dana i uzrokovala utok onečišćene vode u jezero Erie; 7200 metara dalje neadekvatno napuštena plinska bušotina ispuštala je velike količine otpada u periodu od dvije godine.	1984.
Okrug McKean, Pennsylvania	Sirova nafta i slana voda (klasa II)	Onečišćen vodonosnik pitke vode kroz napuštenu bušotinu.	1973.
Državni park Presque Isle (Presque Isle Wells), Pennsylvania	Karcinogeni, fenantren, fluoranten, ftalna kiselina, dietil eter	Podzemna voda onečišćena vodom loše kvalitete koja dolazi iz napuštene plinske bušotine.	1980.
Okrug Lawrence, Južna Dakota	Otpad iz rudarske industrije	Onečišćenje vodonosnika pitke vode.	1973.
Mt. Pleasant (Kemijska tvrtka Stauffer, kasnije Zeneca Holding, Inc.), Tennessee	Organofosfat, klorovodična kiselina, slana otopina, sumporov dioksid; onečišćene otpadne vode	Pukotine na zaštitnim cijevima od 7 inča, na dubinama između 600 i 900 metara.	1984. i 1998.

LOKACIJA	VRSTA OTPADA	INCIDENT	GODINA
Oak Ridge, Tennessee	Radioaktivni otpad	Utvrđena radijacija na obližnjim mjernim bušotinama.	1984.
Beaumont (Velsical Chemical Corp.), Teksas	Otpad herbicida, dioksin	U izvore pitke vode isteklo 19 milijuna litara herbicida; korozija unutarnje i vanjske stijenke kolone zaštitnih cijevi i okolnih slojeva cementa; onečišćenje podzemnih voda.	1983. i 1985.
Corpus Christie, Teksas	Petrokemijski otpad	Otpad iscurio u gornji vodonosnik.	1984.
Područje DeBerry, okrug Panola (Basic Energy Services, Inc.), Teksas	Otpad ulja; benzen, barij, klorid i naftni ugljikovodici (klasa II)	Propuštanje zaštitnih cijevi; onečišćenje podzemnih voda.	2005. i 2006.
Deer Park (EMPAX, Inc.), Teksas	Pesticidi, kaustici, istrošene kiseline, otpadna ulja, otpadna otapala iz raznih industrijskih izvora	Onečišćenje podzemnih voda; neovlašteno povećanje maksimalnog tlaka utiskivanja koje uzrokuje propuštanje tubinga.	1984. i 1985.
Uslužna tvrtka Malone, Teksas	Aluminijev klorid	Rasprostranjeno onečišćenje jezera Swan.	1982. i 1983.
Odessa (Browning-Ferris Industries), Teksas	Dva nekompatibilna toka otpada – bez međuspremnik	Prestanak rada bušotine zbog utiskivanja otpada iznad dopuštenih granica.	1985.
Okrug Orange (4 bušotine - EI dupont de Nemours Co., Inc.), Teksas	Nema podataka	Kvar opreme.	1977. i 1985.

LOKACIJA	VRSTA OTPADA	INCIDENT	GODINA
Ranger, Eastland okrug (Sonics International, Inc.), Teksas	Korozivne kemijske otpadne kiseline, bazne organske tvari	Neispravan tubing, paker i zaštitne cijevi bušotine; erupcije i propuštanja cijevi uzrokovala su onečišćenje podzemnih voda.	1984.
Wilbarger, Hockley i okrug Hutchinson, Teksas	Slana voda/plin (klasa II)	Onečišćenje vodonosnika pitke vode.	1973.
Winona (Gibraltar Chemical Company, kasnije preimenovana u American Ecology Environmental Services, Inc.), Texas	Opasni otpad	Tijekom 14 godina rada, prikupljeno više od 740 detekcija emisija i 400 obavijesti o prekršajima; slučajna ispuštanja/izlivanje kemikalija; detektirani zdravstveni problemi radnika.	1999.
Utah	Otopina kalijevog karbonata (klasa III)	Onečišćenje potoka i podzemnih voda.	1973.
Kanawa i okrug Roane, Zapadna Virginija	Otpadne slane vode (klasa II)	Onečišćenje vodonosnika pitke vode kroz napuštene bušotine.	1973.
Rudarstvo kiselom otopinom, Wyoming	Utiskivanje kiseline u ležišta rude (klasa III)	Onečišćenje vodonosnika pitke vode.	1973.

8.2.1. Miami-Dade, Florida

Utiskivanje otpada u južnoj Floridi je specifično jer se na tom prostoru odlažu komunalne otpadne vode u duboke bušotine. Ova metoda odlaganja razvijena je zbog problema uzrokovanih ispuštanjem otpadnih voda u površinske vodene tokove. Površinsko ispuštanje također može kontaminirati i podzemne izvore vode zbog miješanja površinskih i podzemnih voda unutar hidrološkog ciklusa. Iako se duboko utiskivanje uglavnom smatra najmanje problematičnom opcijom za zbrinjavanje otpadnih voda, zabilježeno je nekoliko akcidenata na Floridi, tokom više godina. U Miami-Dadeu, tijekom 1973. i 2002. u gornjem

vodonosniku koji je korišten kao izvor pitke vode, utvrđena je prisutnost tretiranih otpadnih voda s povišenim razinama amonijaka, klorida i fekalnih koliforma. Cjelokupno izvješće iz 2002. godine sugeriralo je da postoji velika neizvjesnost oko opsega kontaminacije, što je dovelo do mišljenja javnosti da utiskivanje otpada nije prikladna opcija. Unatoč tome, postrojenje za utiskivanje otpada u okrugu Dade nastavilo je s radom, ali uz strože standarde obrade koje je EPA naknadno postavila, 2005. godine (Simpson i Lester, 2009).

8.2.2. Romulus, Michigan

Tvrtka Environmental Disposal Systems ishodila je dozvolu za utiskivanje komercijalnog otpada od strane EPA-e u rujnu 2005. godine. Međutim, samo deset mjeseci nakon početka rada, bušotine i operativna tvrtka pokazivali su znakove neuspjeha. U listopadu 2006. godine, tijekom inspekcija mehaničkog integriteta bušotina, otkrivena su istjecanja na utisnim cjevovodima jedne od dviju bušotina, što je dovelo do obustave rada od strane EPA-e. Naknadne istrage otkrile su brojna kršenja uvjeta dozvole, uključujući nedostavljanje evidencije o praćenju, propušteno testiranje sigurnosnih sustava, nepopunjavanje dokaza o financijskoj odgovornosti pa čak i utiskivanje otpada bez prisutnosti operatera (Simpson i Lester, 2009).

8.2.3. Vickery, Ohio

Tvrtka Ohio Liquid Disposal, podružnica Waste Management-a, poznata pod imenom Vickery Environmental Inc. koja djeluje u Ohiju, počela je svoj rad kao postrojenje za odlaganje otpadnog ulja 1976., a kasnije je ishodila dozvole za komercijalno utiskivanje otpada putem šest utisnih bušotina. Otpad koji se utiskuje uključuje otpadne vode iz procesa proizvodnje željeza i čelika, procesne vode iz reciklažnih operacija, otpadne vode iz pročišćivača zraka iz spalionica, oborinske vode s kontaminiranih lokacija, te procjedne vode s odlagališta otpada. Ovaj opasni otpad koji se utiskuje uključuju dioksine. Krajem 1970-ih i početkom 1980-ih, zbog kvarova na opremi svih bušotina koje se koriste za odlaganje otpada, došlo je do istjecanja otpada izvan nepropusnih zona, a procijenjeno je da je u okoliš isteklo najmanje 170 milijuna litara fluida. Više bušotina pokazivalo je oštećenja cementnog kamena, dok su zaštitne cijevi drugih bušotina korodirale. Tvrtka Waste Management penalizirana je s preko 12,5 milijuna dolara zbog nepropisnog upravljanja otpadom, uključujući ilegalno odlaganje 3,8 milijuna litara PCB-a (*polikloriranih bifenila*) i dioksina. Nakon ovog incidenta, više bušotina je zatvoreno, a preostale su obnovljene, te se utiskivanje nastavlja u četiri preostale bušotine (Simpson i Lester, 2009).

9. ZAKLJUČAK

Tijekom razvoja tehnologije utiskivanja, postignut je značajan napredak u povećanju sigurnosti samog utiskivanja, posebno kroz razvoj sofisticiranih sustava nadzora i kontrole koji osiguravaju integritet bušotina i sprečavaju kontaminaciju podzemnih voda. Međutim, rizici i dalje postoje i kroz primjere incidenata opisanih u diplomskom radu, ukazano je koliko je važno pravilno upravljanje ovim procesima. Posebna pažnja posvećena je američkom UIC programu, koji postavlja visoke standarde za konstrukciju i održavanje bušotina, dok europske regulative, poput Direktive o skladištenju CO₂ (Direktiva 2009/31/EC) i Okvirne direktive o vodama (Direktiva 2000/60/EC), postavljaju čvrste temelje za zaštitu okoliša na vlastitoj, ali i globalnoj razini.

Potrebno je istaknuti važnost pravilnog odabira lokacije za utiskivanje otpada, uzimajući u obzir geološke i hidrogeološke karakteristike terena kako bi se osigurala dugotrajna stabilnost i sigurnost i izbjegle opasnosti kao što su migracija fluida ili kontaminacija slojeva podzemnih voda.

Jedan od važnih aspekata je analiza hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida (CCS) kao tehnike za smanjenje emisija stakleničkih plinova, što je od ključnog značaja u borbi protiv klimatskih promjena. Projekti u Norveškoj, poput projekta Sleipner, gdje se CO₂ uspješno skladišti u podzemnim formacijama, služe kao dokaz da je ova tehnologija izvediva i ekološki učinkovita, te da ima značajan potencijal za širu primjenu u budućnosti.

Na svjetskoj razini, zakonski okviri i rastuća svijest o zaštiti okoliša potiču razne grane industrije na usvajanje ekološki prihvatljivijih tehnologija i metoda zbrinjavanja otpada. Inovacije poput hvatanja i skladištenja CO₂ te naprednijih tehnika obrade slojne vode ključne su za smanjenje negativnih utjecaja.

Kao alternative utiskivanju otpada pojavljuju se i druge mogućnosti, kao npr. smanjenje korištenja opasnih kemikalija, ponovna upotreba materijala ili korištenje otpada za proizvodnju energije, te biološka, kemijska ili fizička obrada otpada. Iako je na taj način moguće smanjiti količinu generiranog otpada i njegov negativan utjecaj na okoliš, utiskivanje otpada i dalje ostaje jedna od tehnologija, koja će igrati važnu ulogu za industrijski sektor. No, njezin uspjeh ovisit će o daljnjem razvoju tehnologije, primjeni najstrožih regulatornih standarda, poboljšanju sigurnosnih protokola te razvoju održivih alternativa koje će minimizirati rizike i maksimalizirati pozitivne utjecaje na okoliš.

10. LITERATURA

1. ACS. 2009. *Development of the Pennsylvania Oil Industry*. URL: <https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/pennsylvaniaoilindustry.html> (10.8.2024.)
2. AMAKIRI K.T., CANON A.R., MOLINARI M., ANGELIS-DIMAKIS A. 2022. *Review of oilfield produced water treatment technologies*.
3. BARLET-GOUÉDARD V., RIMMELÉ G., GOFFÉ B., PORCHERIE O. 2007. *Well Technologies for CO₂ Geological Storage: CO₂-Resistant Cement*.
4. BARLET-GOUÉDARD V., RIMMELÉ G., PORCHERIE O., QUISEL N., DESROCHES J. 2009. *A solution against well cement degradation under CO₂ geological storage environment*.
5. CHADWICK A. i EIKEN O. 2013. *Chapter 10: Offshore CO₂ Storage: Sleipner natural gas field beneath the North Sea*.
6. CLARK J.E., BONURA D.K., VAN VOORHEES R.F. 2005. *An Overview of Injection Well History in the United States of America*.
7. CO₂GeoNet. 2009. *Što zapravo znači geološko skladištenje CO₂?*. URL: <https://co2geonet.com/resources/> (28.8.2024.)
8. Code of Federal Regulations. 2014a. *Part 144 - Underground Injection Control Program*.
9. Code of Federal Regulations. 2014b. *Part 145 - State Uic Program Requirements*.
10. Code of Federal Regulations. 2014c. *Part 146 - Underground Injection Control Program: Criteria And Standards*.
11. EPA (Environmental Protection Agency). 1994. *Regulation and Technology for Underground Injection Control*.
12. EPA (Environmental Protection Agency). 2012. *History of the UIC Program - Injection Well Time Line*. URL: <http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/history.cfm> (12.8.2024.)
13. EPA (Environmental Protection Agency). 2020. *UIC Well Classes and Purposes including numbers of wells by class*. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-04/documents/uic_fact_sheet.pdf (12.8.2024.)
14. EPA (Environmental Protection Agency). 2022. *UIC Injection Well Inventory*. URL: <https://www.epa.gov/uic/uic-injection-well-inventory> (12.8.2024.)

15. EPA (Environmental Protection Agency). 2024a. *Underground Injection Control Regulations and Safe Drinking Water Act Provisions*. URL: <https://www.epa.gov/uic/underground-injection-control-regulations-and-safe-drinking-water-act-provisions> (10.8.2024.)
16. EPA (Environmental Protection Agency). 2024b. *Class I Industrial and Municipal Waste Disposal Wells*. URL: <https://www.epa.gov/uic/class-i-industrial-and-municipal-waste-disposal-wells> (12.8.2024.)
17. EPA (Environmental Protection Agency). 2024c. *Class II Oil and Gas Related Injection Wells*. URL: <https://www.epa.gov/uic/class-ii-oil-and-gas-related-injection-wells> (12.8.2024.)
18. EPA (Environmental Protection Agency). 2024d. *Class III Injection Wells for Solution Mining*. URL: <https://www.epa.gov/uic/class-iii-injection-wells-solution-mining> (12.8.2024.)
19. EPA (Environmental Protection Agency). 2024e. *Class IV Shallow Hazardous and Radioactive Injection Wells*. URL: <https://www.epa.gov/uic/class-iv-shallow-hazardous-and-radioactive-injection-wells> (12.8.2024.)
20. EPA (Environmental Protection Agency). 2024f. *Class V Wells for Injection of Non-Hazardous Fluids into or Above Underground Sources of Drinking Water*. URL: <https://www.epa.gov/uic/class-v-wells-injection-non-hazardous-fluids-or-above-underground-sources-drinking-water> (13.8.2024.)
21. EPA (Environmental Protection Agency). 2024g. *Class VI - Wells used for Geologic Sequestration of Carbon Dioxide*. URL: <https://www.epa.gov/uic/class-vi-wells-used-geologic-sequestration-carbon-dioxide> (13.8.2024.)
22. EPA (Environmental Protection Agency). 2024h. *Primary Enforcement Authority for the Underground Injection Control Program*. URL: <https://www.epa.gov/uic/primary-enforcement-authority-underground-injection-control-program-0> (13.8.2024.)
23. EUR-Lex. 1999. *Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0031> (19.8.2024.)
24. EUR-Lex. 2000. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060> (19.8.2024.)

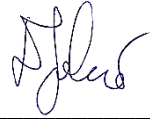
25. EUR-Lex. 2006. *Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC - Statement by the European Parliament, the Council and the Commission.* URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006L0021> (19.8.2024.)
26. EUR-Lex. 2008. *DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.* URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20240218> (20.8.2024.)
27. EUR-Lex. 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.* URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0031> (20.8.2024.)
28. EUR-Lex. 2010. *Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control).* URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj> (17.8.2024.)
29. European Commission. 2023. *Waste Framework Directive.* URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en (21.8.2024.)
30. Equinor. 2024. *CCS on Sleipner – back where it came from.* URL: <https://equinor.industriminne.no/en/ccs-on-sleipner-back-where-it-came-from/> (28.8.2024.)
31. GAURINA-MEĐIMUREC N. i DURN N. 2005. *Postupanje s tehnološkim otpadom u naftnoj industriji.*
32. GAURINA-MEĐIMUREC N., NOVAK MAVAR K., MAJIĆ M. 2018. *Carbon Capture and Storage (CCS): Technology, Projects and Monitoring Review.*
33. GAURINA-MEĐIMUREC N. i PAŠIĆ B. 2011. *Design and mechanical integrity of CO₂ injection wells.*
34. GAURINA-MEĐIMUREC N., PAŠIĆ B, MIJIĆ P., MEDVED I. 2020. *Deep Underground Injection of Waste from Drilling Activities - An Overview.*

35. Global CCS Institute. 2024. CCS Explained: The Basics. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-101-the-basics/> (27.8.2024.)
36. Global CCS Institute. 2023. *Global status of CCS 2023 – Scaling up through 2030*.
37. GWPC (Ground water protection council). 2021. *Injection Wells: A Guide to Their Use, Operation and Regulation*.
38. IEA (International Energy Agency). 1999. *Best Practices for Waste Disposal in the Oil Industry*.
39. IEA (International Energy Agency). 2019. *A new era for CCUS*. URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/a-new-era-for-ccus#growing-ccus-momentum> (27.8.2024.)
40. IGUNNU E.T. i CHEN G.Z. 2012. *Produced water treatment technologies*.
41. IOGP (The International Association of Oil and Gas Producers). 2021. *IOGP Environmental performance indicators - 2021 data*
42. JIMENEZ, S., MICO M. M., ARNALDOS M., MEDINA F., CONTRERAS S. 2018. *State of the art of produced water treatment*.
43. Journal of Petroleum Technology. 1999. *Technological Advances in Cuttings Reinjection*.
44. NADEEM, M., DUSSEAULT, M.B., BILAK, R.A., 2005. *Assessment Criteria for Deep Waste Disposal Sites*.
45. National Energy Technology Laboratory. 2024. *Carbon Storage FAQs* URL: <https://netl.doe.gov/carbon-management/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs> (2.9.2024.)
46. National Research Council. 1994. *Alternatives for Managing the Nation's Complex Contaminated Groundwater Sites*.
47. NELSON C.R., EVANS J.M., SORENSEN J.A., STEADMAN E.N., HARJU J.A. 2005. *Factors Affecting The Potential For CO₂ Leakage From Geologic Sinks*.
48. North Dakota Department of Mineral Resources. n.d. *Class II - Injection Wells*. URL: <https://www.dmr.nd.gov/dmr/oilgas/programs/ClassII> (25.8.2024.)
49. OSBORNE, P. 2002. *Tehcnical program overview: Underground injection control regulations, EPA- Environment protection agency, Office of water 4606*.
50. OSPAR Commission. 2024. *OSPAR Convention*. URL: <https://www.ospar.org/convention> (10.9.2024.)

51. SIMPSON H. i LESTER S. 2009. *Deep Well Injection an Explosive Issue*.
52. SMITH L. M. i SWANSON, V. E. 1978. *Underground Disposal of Industrial Waste*.
53. ŠABOVIĆ A. i ISABEGOVIĆ J. 2012. *Odlaganje otpada nastalog tokom istraživanja i eksploataciji nafte i plina pomoću bušotina utiskivanjem u podzemlje i mogućnost praćenja utiskivanja*.
54. Texas Department of Water Resources. 1984. *Underground Injection Operations in Texas*.
55. UN Environment Programme. 2024. *Abidjan Convention*. URL: <https://www.unep.org/abidjan-convention> (10.9.2024.)
56. Utah Division of Oil, Gas and Mining. 2022. *Underground Injection Control Class VI Primacy Update*. URL: <https://ogm.utah.gov/underground-injection-control-primacy-update-2/> (17.8.2024.)
57. Vattenfall. 2024. *Norway's Sleipner: Where CO₂ has been buried in the rock since 1996*. URL: <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2024/norways-sleipner-where-co2-has-been-buried-in-the-rock-since-1996> (25.8.2024.)
58. ZEP (Zero Emissions Platform) 2023. *CCS/CCU projects*. URL: <https://zeroemissionsplatform.eu/about-ccs-ccu/css-ccu-projects/> (26.8.2024.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



David Jakovljević



KLASA: 602-01/24-01/172
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 26. 9. 2024.

David Jakovljević, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/172, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 25.09.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

UTISKIVANJE OTPADA: TEHNOLOŠKI, REGULATORNI I OKOLIŠNI IZAZOVI I MOGUĆNOSTI

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv. prof. dr. sc. Karolina Novak Mavar nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentora dr. sc. Igor Medved.

Mentorica:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina Novak
Mavar

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Komentor:

(potpis)

dr. sc. Igor Medved

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)