

Utiskivanje otpadnih fluida pri tlaku frakturiranja

Kolarek, Borna

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:095868>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**



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 OTPADNIH FLUIDA PRI TLAKU FRAKTURIRANJA

Diplomski rad

Borna Kolarek

N299

Zagreb, 2020.

UTISKIVANJE OTPADNIH FLUIDA PRI TLAKU FRAKTURIRANJA

BORNA KOLAREK

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

SAŽETAK

Utiskivanje otpadnih fluida u podzemlje jedna je od metoda zbrinjavanja otpada koji nastaje u procesima istraživanja i proizvodnje ugljikovodika. Postupak utiskivanja s frakturiranjem stijena podrazumijeva odlaganje kašastog otpada u umjetno stvorene pukotine u slabo propusnim formacijama. U radu je obrađen cijeli proces utiskivanja, počevši od odabira utisne formacije, preko pripreme otpada za utiskivanje i analize tlakova koji se javljaju prilikom utiskivanja, do monitoringa. Na početku samog procesa vrlo je važno pravilno odabrati utisnu formaciju kako bi se spriječila migracija utisnutog otpada prema podzemnim izvorima pitke vode. Također, važno je napraviti kvalitetnu strategiju monitoringa kako bi se na vrijeme mogli uočiti eventualni problemi u procesu. Najvažniji dio ovog rada predstavlja analiza 19 članaka koja je obuhvatila utiskivanja kašastog otpada koja su provedena u posljednjih 30 godina. U toj analizi obrađeni su uvjeti u formacijama u koje se utiskuje otpad, svojstva kašastog otpada i parametri utiskivanja. Zaključeno je da utiskivanje otpada u podzemlje predstavlja najbolju metodu za trajno zbrinjavanje otpada iz naftnog rudarstva s obzirom na brojne ekološke prednosti u odnosu na druge metode zbrinjavanja.

Ključne riječi: utiskivanje, kašasti otpad, fraktura

Diplomski rad sadrži: 68 stranica, 13 slika, 7 tablica i 41 referencu

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: dr.sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNf-a

Ocjenjivači: 1. dr.sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redoviti profesor RGNf-a
2. dr.sc. Borivoje Pašić, docent RGNf-a
3. dr.sc. Vladislav Brkić, docent RGNf-a

Datum obrane: 14.02.2020.

FRACTURE INJECTION OF WASTE FLUIDS

BORNA KOLAREK

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Waste injection is one of the methods of managing waste created while drilling for and producing hydrocarbons. Slurry fracture injection encompasses the disposal of slurry into artificially created fractures within low-permeability formations. This thesis analyses the entirety of the injection process – from methods of selecting adequate formations for injection and preparing waste for injection, to analysing various pressures and general monitoring. It is of paramount importance to correctly choose the adequate formation to avoid upward migration of injected waste which is dangerous for shallow water sources. Also, it is of highest importance to define a good monitoring strategy, so that any possible problems might be prevented. The core of this thesis is the analysis of 19 different articles, which deal with the utilization of slurry fracture injection in the last 30 years. This analysis addresses the conditions in the formations chosen for injection, slurry properties and injection parameters. Finally, the conclusion presents all the advantages of waste injection.

Keywords: injection, slurry, fracture

Thesis contains: 68 pages, 13 figures, 7 tables and 41 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Reviewers: 1. Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD
2. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD
3. Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

Date of defense: February 14, 2020

Sadržaj

POPIS TABLICA	I
POPIS SLIKA	I
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA	II
POPIS KORIŠTENIH KRATICA	II
1. UVOD	1
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	3
3. OPĆENITI OPIS PROCESA UTISKIVANJA KAŠASTOG OTPADA	6
3.1. UTISKIVANJE KROZ PRSTENASTI PROSTOR (ANULARNO UTISKIVANJE)	9
3.2. UTISKIVANJE KROZ TUBING	11
4. ODABIR UTISNE FORMACIJE	13
4.1. MODEL GEOLOŠKE PROCJENE ZONE UTISKIVANJA OTPADA	18
4.1.1. Stablo odlučivanja	18
4.1.2. Polu-kvantitativno rangiranje	20
4.2. KLASA UTISNIH BUŠOTINA	22
4.3. KONSTRUKCIJA I ODABIR UTISNE BUŠOTINE	23
4.4. RIZICI POVEZANI S UTISKIVANJEM	26
5. PRIPREMA OTPADA ZA UTISKIVANJE	30
6. TLAKOVI PRILIKOM UTISKIVANJA	33
7. ANALIZA PODATAKA O DOSADAŠNJIM UTISKIVANJIMA	38
8. PRAĆENJE PROCESA UTISKIVANJA (MONITORING)	52
8.1. METODE PRAĆENJA ODLAGANJA OTPADA	54
8.1.1. Tiltmetri	54
8.1.2. Radioaktivni obilježivači	56
8.1.3. Mikro-seizmički monitoring	56
9. PRIMJERI IZ PRAKSE	59
9.1. UTISKIVANJE KRHOTINA STIJENA NA NAFTNOM POLJU MANIFA, SAUDIJSKA ARABIJA	59
9.2. ZBRINJAVANJE RADIOATIVNOG MATERIJALA (NORM) U ZALJEVU MARCHAND, LOUISIANA	61
10. ZAKLJUČAK	63
11. LITERATURA	64

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Čimbenici i njihov utjecaj na parametre koji se koriste u okviru planiranja procesa utiskivanja otpada.....	16
Tablica 4-2. Međuovisnost parametara, njihovog prioriteta i faktora ponderiranja.....	22
Tablica 5-1. Neopasni otpad (engl. <i>Non-hazardous oilfield wastes</i> - NOW) iz naftne industrije koji se može utiskivati u podzemlje	30
Tablica 7-1. Podaci o kompaniji koja izvodi utiskivanje, lokaciji i utisnoj formaciji.....	38
Tablica 7-2. Podaci o prethodnoj obradi i svojstvima kašastog otpada.....	44
Tablica 7-3. Podaci o parametrima utiskivanja kašastog otpada.....	48
Tablica 8-1. Preporučena strategija monitoringa prilikom utiskivanja otpada u podzemlje	57

POPIS SLIKA

Slika 3-1. Shematski prikaz područja odlaganja otpada.....	8
Slika 3-2. Shematski prikaz anularnog utiskivanja otpadnog fluida u bušotinu s dvije i više kolona zaštitnih cijevi.....	10
Slika 3-3. Prikaz utiskivanja kašastog otpada kroz tubing na primjeru bušotine Kal-6.....	12
Slika 4-1. Idealni stratigrafski uvjeti za utiskivanje kašastog otpada.....	17
Slika 4-2. Stablo odlučivanja kao prvi dio opsežnog geološkog modela	19
Slika 4-3. Odnos između ranga i brojčanih vrijednosti važnijih parametara kod odabira utisne formacije	21
Slika 4-4. Tipična konstrukcija utisne bušotine klase II.....	26
Slika 4-5. Taloženje čestica (engl. <i>sagging</i>).....	27
Slika 4-6. Skupljanje kašastog otpada zbog izdvajanja tekuće faze (engl. <i>syneresis</i>).....	28
Slika 4-7. Mogući putevi migracije fluida u aktivnoj (a) i napuštenoj (b) bušotini	29
Slika 5-1. Površinski sustav za pripremu kaše za utiskivanje	32
Slika 6-1. Tipično kretanje tlakova prilikom utiskivanja otpadne kaše	33
Slika 8-1. Shematski prikaz djelovanja frakture i razmještaj tiltmetara na površini i u susjednoj bušotini	55

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

p – tlak (Pa)

σ_v – vertikalno naprezanje uslijed djelovanja tlaka pokrovnih stijena (Pa)

V – volumen (m^3)

L – duljina (m)

t – vrijeme (h)

k – propusnost (μm^2)

ϕ – poroznost (-)

Q – protok, tj. dobava (m^3/d)

ρ – gustoća (kg/m^3)

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

Δp_{batch} – porast tlaka između prvog i zadnjeg obroka utiskivanja (engl. *Pressure increase from first to last batch*)

DCRI – utiskivanje krhotina razrušenih stijena (engl. *Drill Cuttings Re-Injection*)

LCM – materijali za čepljenje mjesta gubljenja isplake (engl. *Lost circulation material*)

MD – mjerena dubina (engl. *Measured Depth*)

NORM – radioaktivni materijali koji se javljaju u prirodi (engl. *Naturally Occurring Radioactive Materials*)

$p_{closure}$ – početni tlak zatvaranja frakture (engl. *Initial fracture closure pressure*)

p_d – tlak na dnu bušotine (engl. *BHP-Bottomhole Pressure*)

p_f – gradijent tlaka frakturiranja (engl. *Fracture gradient*)

p_{fric} – pad tlaka uslijed trenja zbog protjecanja kroz prstenasti prostor ili tubing (engl. *Friction pressure drop along annulus/tubing*)

p_H – statički tlak stupca fluida na razini utisne zone (engl. *Hydrostatic head at the injection zone*)

p_{net} – tlak unutar frakture (engl. *Net pressure within the fracture*)

p_{nozzle} – pad tlaka kroz mlaznice, zglobove i iskrivljenja (engl. *Pressure drop across nozzles and bends*)

p_{perf} – pad tlaka uslijed trenja u perforacijama (engl. *Perforation friction pressure drop*)

p_u – tlak utiskivanja (engl. *Injection Pressure*)

1. UVOD

Tijekom izvođenja operacija bušenja i tijekom proizvodnje nafte i plina dolazi do stvaranja velikih količina otpada (krhotine razrušenih stijena, otpadna isplaka, proizvedena slojna voda, talozi iz spremnika, ugljikovodicima zagađena zemlja, itd.) koji je potrebno zbrinuti na ekološki i ekonomski prihvatljiv način. U počecima razvoja naftne industrije ekološki prihvatljivo zbrinjavanje otpada nije se smatralo pretjerano bitnim aspektom naftne djelatnosti, međutim, s razvojem sve strožih ekoloških regulatornih zahtjeva, došlo je i do razvoja metoda postupanja s otpadom. Postupanje s otpadom treba općenito slijediti red prvenstva gospodarenja otpadom prema kojemu najprihvatljiviji oblik postupanja s otpadom predstavlja sprječavanje njegovog nastanka, dok se zbrinjavanje otpada odlaganjem u okoliš smatra najmanje poželjnim rješenjem. Međutim, bez izrade bušotine ne bi bilo moguće proizvesti naftu i plin, pa se utiskivanje otpada iz procesa bušenja i proizvodnje nafte i plina natrag u podzemlje nameće kao najprihvatljivija metoda njegovog trajnog zbrinjavanja.

Utiskivanje slojne vode započelo je još 20-ih godina prošlog stoljeća, dok se utiskivanje otpadne isplake s krhotinama razrušenih stijena (tj. kašastog otpada) počelo razvijati 1980-ih godina. Duboko utiskivanje otpada iz naftnog rudarstva pokazalo se najprihvatljivijom metodom zbrinjavanja jer u odnosu na ostale metode posjeduje niz prednosti kao što su (Abou-Sayed i Guo, 2001; Gaurina-Međimurec, 2018):

- 1) ne uzrokuje stvaranje emisija i sprječava ispuštanje otpada u okoliš,
- 2) potreban je manji prostor za površinsku opremu i manja je mogućnost zagađenja okolnog tla,
- 3) smanjuju se dugoročne obveze za kompaniju,
- 4) eliminira se potreba za transportom otpada, a time i rizik od izlivanja u ekološki osjetljivim područjima (posebno izraženo kod bušenja na moru),
- 5) manja su kapitalna ulaganja i manji su operativni troškovi.

Zbog navedenih prednosti, utiskivanje otpadnih fluida postalo je rutinska metoda zbrinjavanja otpada od bušenja koja je u skladu sa zakonodavstvom vezanim uz zaštitu okoliša i politikom naftnih kompanija (Abou-Sayed i Guo, 2001).

Unatoč navedenim prednostima, postoje i brojni izazovi s kojima se treba suočiti prilikom utiskivanja bušačkog otpada, kao što su npr. (Gaurina-Međimurec, 2015):

regulatorni zahtjevi, mogućnost čepjenje utisne zone i smanjenje injektivnosti, odabir reoloških svojstava kašastog otpada, odabir metode utiskivanja, trajno zbrinjavanje utisnutog otpada, integritet bušotine, kvar opreme, nedovoljan kapacitet opreme za pripremu otpada, planirani i iznenadni prekidi utiskivanja, praćenje procesa utiskivanja (monitoring), itd. Ovi rizici moraju biti određeni prilikom planiranja izvodljivosti projekta, te istovremeno moraju biti definirane metode za smanjenje njihovog utjecaja sa specifičnim operativnim postupcima (Gaurina-Međimurec, 2015).

U ovom radu biti će obrađeno utiskivanje otpadnih fluida iznad tlaka frakturiranja, te svi postupci koji su potrebni kako bi se pravilno odabrala formacija za utiskivanje, otpad pripremio za utiskivanje, te pravilno odabrao program praćenja i provjere izvođenja operacija i osiguralo trajno zbrinjavanje utisnutog otpada bez mogućnosti njegovog utjecaja na podzemne izvore pitke vode ili na atmosferu u slučaju migracije do površine.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Tehnologija utiskivanja krhotina razrušenih stijena (engl. *Drill Cuttings Re-Injection* - DCRI) prvi put je primijenjena kasnih 1980-ih godina na polju Prudhoe Bay, Aljaska, za utiskivanje zauljenog otpada (zagađena sirova nafta, kiseline, neiskorišteni pijesak za frakturiranje, isplaka, talozi s dna spremnika, itd.) u podzemlje ispod zone vječnog leda (engl. *Permafrost*) (Majidaie i Shadizadeh, 2009). Od tada ova se tehnologija naveliko koristila u Meksičkom zaljevu, Zapadnoj Kanadi, Sjevernom moru, Zapadnoj Africi, Južnoj Americi i na području Kaspijskog mora. Danas u britanskom dijelu Sjevernog mora približno 30% bušaćih postrojenja i platformi koristi ovu metodu za zbrinjavanje otpadne uljne isplake s krhotinama razrušenih stijena, dok je u Norveškom sektoru ova brojka blizu 60% (Majidaie i Shadizadeh, 2009).

Abou-Sayed i drugi (1989) u svom su radu predstavili opsežnu studiju i terenske rezultate iz tri utisne bušotine s polja Prudhoe Bay u koje je utiskivan zauljeni otpad. Terenski rad predstavljao je dio sveukupne ekološke procjene čiji je cilj bio:

- 1) potvrditi prethodne rezultate prema kojima nije bilo komunikacije fluida sa zonom vječnog leda,
- 2) odrediti optimalne uvjete za utiskivanje otpada u prisustvu hidraulički izazvanih fraktura,
- 3) potvrditi sigurnost primjene povećanog tlaka utiskivanja.

Na polju je u 1973-oj godini izbušeno pet bušotina koje su kasnije prenamijenjene za utiskivanje otpada i odobrene kao bušotine klase II. Za utiskivanje su korištene samo tri bušotine, pri čemu su u svakoj izrađene perforacije na dubini od 46 m (150 ft) ispod zone vječnog leda koja završava na dubini od otprilike 600 m (2000 ft). Utiskivanje je izvođeno periodički, ovisno o brzini kojom je otpad dovožen na lokaciju. Približno 318 000 m³ (2 milijuna barela) otpada utisnuto je u formaciju koju čine debeli intervali pješčenjaka i šljunka proslojeni šejlom, siltom (engl. *siltstone*) i muljnjakom (engl. *mudstone*). Prosječan kapacitet utiskivanja otpada je iznosio 80 m³/d (500 bbl/d), a maksimalni kapacitet je iznosio 636 m³/d (4 000 bbl/d). Studija je na kraju potvrdila da je odabrana formacija pogodna za utiskivanje otpada. Smatra se da utiskivanje protokom od 10 l/s (4 bbl/min) neće predstavljati problem, a bušotine su opremljene tako da se površinski tlakovi do 9,65 MPa (1400 psi) mogu sigurno primijeniti. Također, povremeni porast kapaciteta

utiskivanja na 16-21 l/s (6-8 bbl/min) neće uzrokovati otjecanje fluida u nepropusne pokrovne stijene, niti će uzrokovati oštećenje zone vječnog leda.

Dusseault i drugi (1997) razvili su i primijenili sustav utiskivanja tekućeg otpada u nekonsolidirane formacije pješčenjaka u jugoistočnoj Alberti na dubini od 732 do 752 m. Pokrovne stijene čine šejlovi vrlo male propusnosti na dubini od 454 do 717 m, što predstavlja idealnu prepreku kretanju utisnutog otpada prema površini. Tekući otpad sastojao se od proizvedene slojne vode (30-50%), teške nafte gustoće 986 kg/m^3 (50-60%), te fino-zrnastog čvrstog materijala (3-9%) koji je razrijeđen i utisnut u formaciju pri tlaku frakturiranja. Ukupno je utisnuto $3\,911 \text{ m}^3$ tekućeg otpada, čija je gustoća na kraju bila između 1020 i 1080 kg/m^3 . Pokazali su da je u ovom slučaju omogućeno trajno zbrinjavanje utisnutog otpada. Također, naglasili su da pravilno planiranje i monitoring, te sistematična analiza razvoja tlakova predstavljaju ključ za sigurnost pri izvođenju procesa i uspješno praćenje stanja u ležištu.

Moschovidis i drugi (1998 i 2000) predstavili su terensko istraživanje koje je provedeno u Moundsu, Oklahoma. To istraživanje je bilo zajednički projekt više naftnih kompanija čiji je cilj bio poboljšati razumijevanje mehaničkih svojstava i modeliranja procesa primijenjenih kod utiskivanja krhotina stijena u podzemlje. U radu su date terenske postavke provedenog eksperimenta, formacije odabrane za utiskivanje, tehnički opseg posla, predstavljen je niz provedenih pokusa i prikupljenih podataka. Projekt je završen 1998. godine, a sastojao se je od tri faze: izrade jedne utisne bušotine i dvije opažačke bušotine, uz provođenje oko 20 periodičkih utiskivanja kašastog otpada u svaku od dvije formacije za odlaganje, te uz istovremeno praćenje stvorenih fraktura i bočno jezgrovanje utisnih zona u jednoj od opažačkih bušotina. Utiskivanje je vršeno u dvije formacije, prva je bila šejl na dubini od 620 m, a druga pješčenjak na dubini od 813 m. Obroci utiskivanja trajali su 10 do 20 min, bili su volumena 8 m^3 , a protok je iznosio između 915 i $1145 \text{ m}^3/\text{d}$ (4-5 bbl/min). Nakon svakog obroka utiskivanja uslijedilo je mirovanje u trajanju od 80 do 100 min. Od tehnika monitoringa koristili su radioaktivne obilježivače, tiltmetre i mikro-seizmički monitoring. Na temelju analize jezgara uočeno je stvaranje višestrukih fraktura. Zaključili su da je periodičko utiskivanje vrlo važno kako bi se spriječilo širenje fraktura izvan željenog područja, te da je općenito ovo testno utiskivanje ispunilo većinu ciljeva.

Abou-Sayed i Guo (2001) razmatrali su utiskivanje krhotina iznad tlaka frakturiranja s obzirom na dizajn i sigurnost. To je uključivalo planiranje procesa, podatke potrebne za

geološki opis utisne formacije i analizu rezultata provedenih karotažnih mjerenja, kriterije za odabir utisne bušotine i zone, te zahtjeve za kontrolu kvalitete geoloških svojstava kaše. Također, predstavili su smjernice za odabir strategije utiskivanja, te utisne parametre, kao što su npr. brzina utiskivanja, volumen obroka koji se utiskuje, vrijeme zatvaranja bušotine potrebno da se fraktura zatvori nad krhotinama, zahtjevi za utisnu opremu i procjene kapaciteta utiskivanja. Došli su do zaključka da je duboko utiskivanje otpada ekološki i ekonomski opravdana metoda zbrinjavanja otpada kada je pravilno isplanirana.

Veil i Dusseault (2003) u svom su radu opisali tehnologiju utiskivanja kašastog otpada iz procesa bušenja. Naveli su različite slučajeve utiskivanja s obzirom na tlakove i tip utiskivanja. U ovom izvještaju fokusirali su se na utiskivanje kašastog otpada iznad tlaka frakturiranja, njegovo provođenje, monitoring, geološke uvjete koji pogoduju utiskivanju kašastog otpada, te troškove. Na kraju su prikazali više od 330 stvarnih primjera utiskivanja kašastog otpada provedenih diljem svijeta.

Majidaie i Shadizadeh (2009) istraživali su mogućnost utiskivanja krhotina stijena na naftnom polju Ahwaz u Iranu. Ciljevi njihovog istraživanja bili su:

- 1) procijeniti volumen bušačkog otpada koji se stvara prilikom izrade svake bušotine na tom polju,
- 2) odabrati formaciju koja je najprikladnija za utiskivanje bušačkog otpada,
- 3) odrediti može li se otpad sigurno zbrinuti utiskivanjem kroz tubing ili kroz prstenasti prostor (anularno utiskivanje).

Razmotrene su brojne mogućnosti prilikom ove procjene kako bi se osiguralo sigurno zbrinjavanje bilo koje vrste bušačkog otpada. Korištenjem simulatora hidrauličkog frakturiranja određeno je lateralno i okomito prostiranje fraktura kako bi se osiguralo da te frakture ne presijecaju pokrovne izolatorske stijene, te da se ne sijeku s ostalim bušotinama, prirodnim frakturama, rasjedima ili akviferima. Za utiskivanje kroz tubing razmatrana je formacija Mishan (1550-1660 m dubine), a za anularno utiskivanje formacija Aghajari (peta kolone zaštitnih cijevi na dubini od 300 m). Ulazni podaci bili su sljedeći: gustoća kaše 1260 kg/m^3 , kontinuirano utiskivanje, 7950 m^3 (50 000 bbl) utisnute kaše pri utiskivanju kroz tubing, te 2385 m^3 (15 000 bbl) pri anularnom utiskivanju, uz maksimalni tlak utiskivanja do 13,8 MPa (2000 psi). Na kraju su došli do zaključka da se pri navedenim uvjetima otpadna kaša može sigurno utisnuti, bilo kroz tubing ili kroz prstenasti prostor.

3. OPĆENITI OPIS PROCESA UTISKIVANJA KAŠASTOG OTPADA

Utiskivanje otpadnih fluida u bušotine može se općenito podijeliti prema tipu fluida, prema tlaku utiskivanja i prema tipu utiskivanja.

Prema tipu fluida postoji utiskivanje fluida bez čestica (čisti fluidi; *engl. solids free fluids*) i utiskivanje fluida s česticama (kašasti otpad - suspenzija čvrstih čestica u vodi; *engl. waste slurry, solid laden liquid*).

Tlak utiskivanja može biti manji i veći od tlaka frakturiranja, dok prema tipu utiskivanja razlikujemo utiskivanje kroz tubing i perforacije u koloni, te utiskivanje kroz prstenasti prostor između dvije kolone (anularno utiskivanje).

Važni parametri koje treba uzeti u obzir prilikom planiranja utiskivanja (Gaurina-Međimurec i Durn, 2005):

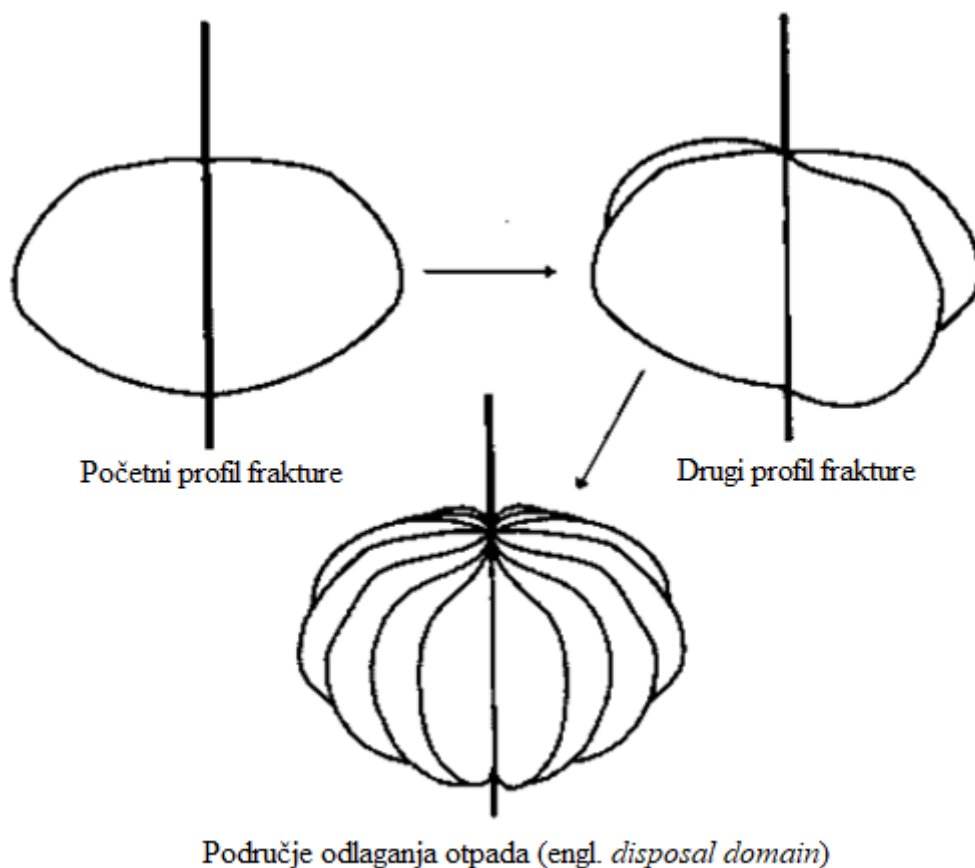
- količina otpada koji se namjerava utisnuti,
- pristupačnost bušotini ili blizina bušotine otpadu,
- integritet bušotinske glave,
- adekvatna izolacija zone pitke vode,
- karakteristike utisne zone,
- adekvatna zaštita proizvodne zone,
- analiza prethodnih projekata utiskivanja na tom području,
- ekonomska isplativost.

Postupak utiskivanja bez hidrauličkog frakturiranja naslaga prvenstveno se koristi za utiskivanje fluida bez čestica, radi trajnog i sigurnog zbrinjavanja tehnoloških otpadnih voda i proizvedene slojne vode. U nekim geološkim formacijama (prisutne zone gubljenja, velika propusnost, mali slojni tlak) kašasti otpad je također moguće utiskivati pri tlaku koji je manji od tlaka frakturiranja stijena (*engl. subfracture injection*), a nekad manji od slojnog tlaka ili čak manji od hidrostatskog tlaka. U tom slučaju utiskivanje se obavlja kao i bilo koje drugo utiskivanje kašastog otpada, samo što su tlakovi utiskivanja otpada znatno manji (Veil i Dusseault, 2003).

Postupak utiskivanja uz frakturiranje stijena (*engl. slurry fracture injection - SFI, Cuttings Re-Injection*) podrazumijeva odlaganje kašastog otpada u umjetno stvorene pukotine u slabo propusnim formacijama.

Utiskivanje kašastog otpada može se provoditi kao kontinuirani postupak ili kao serija isprekidanih ciklusa utiskivanjem manjih volumena otpada (periodički). Na nekim odobalnim postrojenjima gdje se bušenje odvija kontinuirano i gdje skladišni prostor ne omogućuje utiskivanje u obrocima, utiskivanje se mora odvijati kontinuirano s izradom novih bušotina. U tim slučajevima, tlakovi utiskivanja se pažljivo prate kako bi se promjene u injektivnosti formacije mogle na vrijeme uočiti. U većini drugih slučajeva utiskivanje se dizajnira tako da se utiskuje periodički (tj. utiskivanje se vrši nekoliko sati dnevno, zatim se formaciju pusti da miruje nekoliko sati ili čak nekoliko dana kako bi se utisnuti fluidi raspršili u formaciji, nakon čega se ciklus ponavlja). Učestalost ciklusa utiskivanja ovisi o brzini stvaranja bušaćeg otpada. Periodičko utiskivanje može izazvati svakodnevno stvaranje novih fraktura, što je bolje od produživanja prvotno stvorene frakture. Ovaj pristup smanjuje mogućnost širenja frakture izvan ciljane utisne formacije, te omogućuje odlaganje većeg volumena čvrstih čestica (Veil i Dusseault, 2003).

Dakle, kontinuirano utiskivanje podrazumijeva da se fraktura ne zatvara tijekom procesa utiskivanja. Pojam kontinuirano ne odnosi se nužno na neprekidnost utiskivanja, nego označava operacije koje dovode do kontinuiranog širenja prvotno stvorene frakture tijekom utiskivanja. S druge strane, kod periodičkog utiskivanja obroci istog volumena utiskuju se u bušotinu, te se ona zatvara nakon svakog obroka kako bi se frakture mogle zatvoriti (čvrste čestice ostaju unutar frakture, dok tekući otpad otječe u propusne slojeve). Pri periodičkom utiskivanju dolazi do stvaranja višestrukih fraktura različite orijentacije na malom području oko bušotine, koje se često naziva područjem (domenom) odlaganja (engl. *disposal domain*) (Moschovidis i dr., 1998). Shematski prikaz područja odlaganja otpada može se vidjeti na slici 3-1.



Slika 3-1. Shematski prikaz područja odlaganja otpada (Moschovidis i dr., 1998)

Proces utiskivanja suspenzije krhotina razrušenih stijena (tj. kašastog otpada) sastoji se od mljevenja i usitnjavanja krhotina do odgovarajuće veličine (najčešće do veličine manje od 300 μm) i njihovog miješanja s fluidom (morska voda, sakupljena oborinska voda, neka druga slatka voda, iskorištena isplaka ili proizvedena slojna voda) kako bi se formirala kaša. Ta kaša se zatim utiskuje u pogodnu formaciju pri tlaku koji je dovoljno visok kako bi se kontinuirano frakturirala stijena koja prima utisnuti otpad. Kada se utiskivanje zaustavi, tekuća faza utisnute kaše otječe u okolne stijene pri čemu dolazi do smanjenja tlaka, a utisnute krhotine ostaju zarobljene na mjestu u novonastalim frakturama (Abou-Sayed i dr., 2002; Veil i Dusseault, 2003; Gaurina-Međimurec, 2018).

3.1. UTISKIVANJE KROZ PRSTENASTI PROSTOR (ANULARNO UTISKIVANJE)

Utiskivanje kroz prstenasti prostor ili anularno utiskivanje (*engl. annular injection*) koristi se za utiskivanje kašastog otpada kroz prstenasti prostor između dvije kolone zaštitnih cijevi. Kod ovog tipa utiskivanja kašasti otpad ulazi u formaciju ispod Pete vanjske kolone zaštitnih cijevi. Za anularno utiskivanje otpada, osim namjenske utisne bušotine, mogu se koristiti i postojeće aktivne bušotine ili bušotine u fazi njihove izrade (npr. bušenje na moru).

Na primjer, utiskivanje kašastog otpada kroz prstenasti prostor proizvodne bušotine može se odvijati istovremeno s pridobivanjem ugljikovodika ili se može utiskivati kroz prstenasti prostor bušotine za vrijeme njezine izrade. Ovaj tip utiskivanja moguć je jedino u slučaju kada je prstenasti prostor tehničke kolone zaštitnih cijevi otvoren prema prikladnoj utisnoj formaciji. Kako bi utiskivanje bilo uspješno, svi rizici povezani s utiskivanjem otpada moraju biti definirani prije početka procesa. Tako su npr. dopušteni tlakovi pri anularnom utiskivanju često manji nego u slučaju utiskivanja kroz tubing zbog ograničenja s obzirom na gnječenje i rasprskavanje kolona zaštitnih cijevi tijekom utiskivanja. Također je važno naglasiti da je prilikom izrade bušotine koja će se koristiti za anularno utiskivanje potrebno ostaviti prstenasti prostor ispunjen slojnom vodom bez čvrstih čestica koja je kompatibilna s formacijom u području Pete kolone zaštitnih cijevi (Abou-Sayed i Guo, 2001).

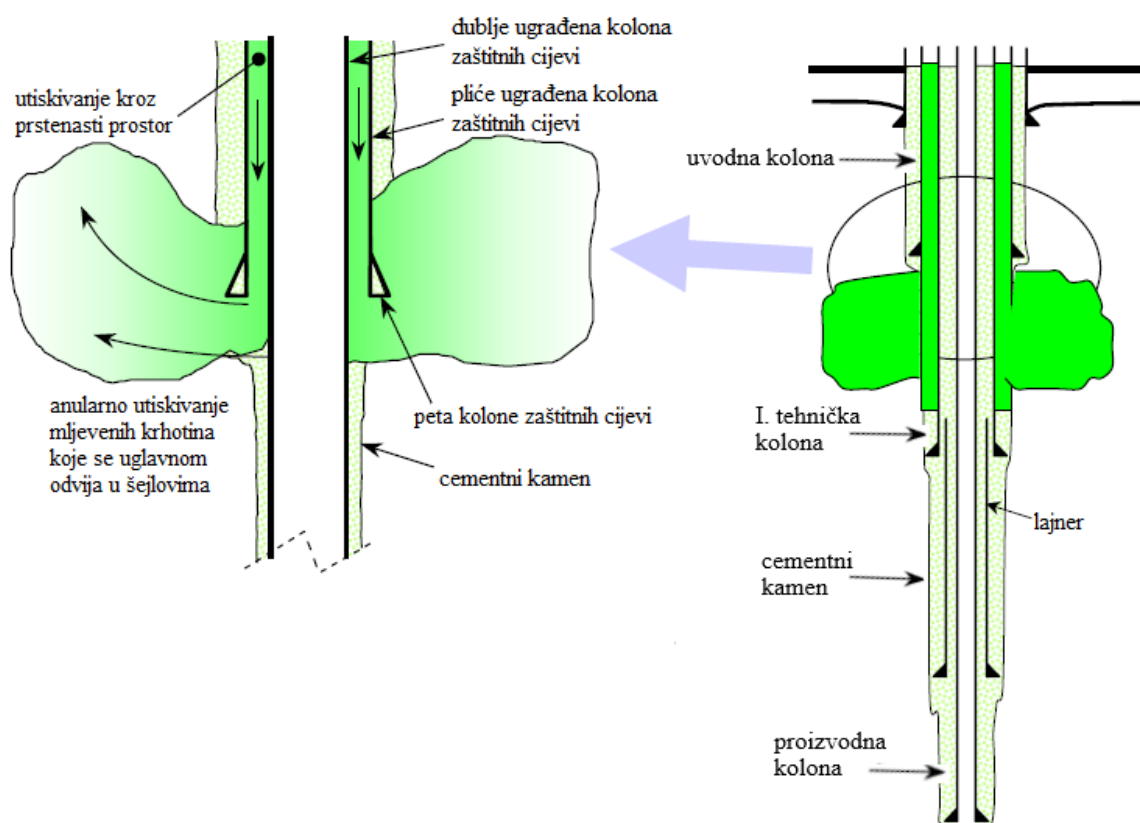
Glavna prednost anularnog utiskivanja u odnosu na utiskivanje kroz tubing je u tome što je ono ekonomičnije ako je trajanje projekta kratko, te ako volumen otpada koji se planira utisnuti nije prevelik. Tada su troškovi bušenja i opremanja u potpunosti eliminirani.

Međutim, anularno utiskivanje nije uvijek moguće provesti, a najčešći razlozi za to su sljedeći (Abou-Sayed i Guo, 2001):

- ne postoji raspoloživi prstenasti prostor prije prve sekcije ispunjene isplakom, što sprječava istovremeno bušenje i utiskivanje;
- srednja kolona zaštitnih cijevi ne omogućuje pristup ciljanoj utisnoj formaciji zbog cementnog kamena ili pakera koji sprječavaju protok kroz prstenasti prostor;
- začepljenje prstenastog prostora zbog taloženja čestica ili produkata korozije zaštitnih cijevi;

- zazor između dva niza zaštitnih cijevi je premalen za uspješno izvođenje utiskivanja ili zaštitne cijevi nisu dovoljne čvrstoće da izdrže naprezanja tijekom anularnog utiskivanja;
- osim navedenog, anularno utiskivanje mogu spriječiti: budući plan razvoja polja, tehnički zahtjevi ili logistička ograničenja.

Na slici 3-2. shematski je prikazano anularno utiskivanje otpada u bušotinu s dvije i više kolona zaštitnih cijevi.



Slika 3-2. Shematski prikaz anularnog utiskivanja otpadnog fluida u bušotinu s dvije i više kolona zaštitnih cijevi (Veil i Dusseault, 2003)

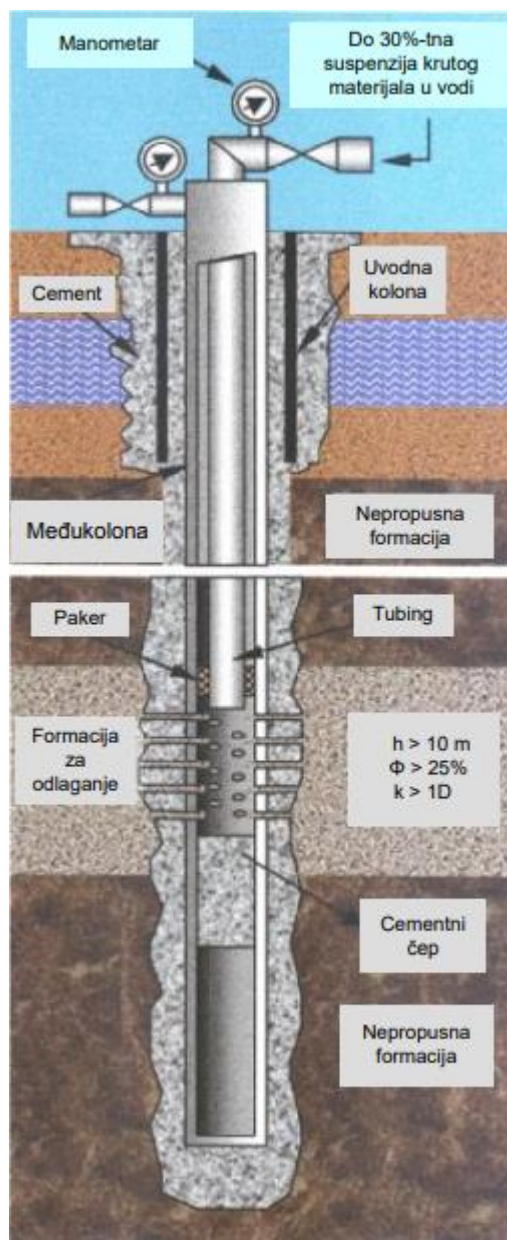
3.2. UTISKIVANJE KROZ TUBING

Utiskivanje otpada kroz tubing uključuje utiskivanje u postojeću bušotinu koja je prenamijenjena u utisnu, i utiskivanje u bušotinu izrađenu isključivo za utiskivanje otpada (*engl. dedicated injection well*). Obuhvaća utiskivanje otpada u nezacijevljeni dio formacije koji se nalazi ispod svih kolona zaštitnih cijevi ili utiskivanje kroz perforacije koje su izrađene u zaštitnim cijevima u području utisne formacije.

Općenito, s operativnog aspekta, utiskivanje kroz tubing je fleksibilnije, a ostale prednosti u odnosu na anularno utiskivanje su sljedeće (Abou-Sayed i Guo, 2001):

- takve bušotine mogu biti ciljano izrađene za utiskivanje u prikladnu utisnu formaciju;
- često mogu omogućiti utiskivanje velikih volumena otpada;
- ako litološki sastav pokrovnih stijena to dopušta, moguće je imati više utisnih zona u jednoj bušotini, što otvara mogućnost utiskivanja krhotina stijena i proizvedene vode u različite formacije unutar iste bušotine;
- ukoliko dođe do čepljenja stijena utisne zone, pribušotinsku zonu je lakše očistiti;
- nakon prestanka potrebe za daljnjim utiskivanjem otpadnog fluida, takvu bušotinu je moguće produbiti i prenamijeniti u proizvodnu bušotinu ili u bušotinu za utiskivanje pridobivene slojne vode.

Na slici 3-3. može se vidjeti prikaz utiskivanja otpadnog fluida kroz tubing na primjeru bušotine Kal-6. Kod utiskivanja kroz tubing otpadni fluid se u većini slučajeva utiskuje u visoko propusne slojeve pješčenjaka, dok se kod anularnog utiskivanja u većini slučajeva utiskuje u šejlove i ostale slabo propusne formacije. Utiskivanje kroz tubing odvija se u 81% operacija u svijetu, dok se anularno utiskivanje koristi u 19% slučajeva. Od ukupnog volumena utisnutog otpada, 81% je utisnuto na odobalnim postrojenjima, a 19% na postrojenjima na kopnu (Maliardi i dr., 2014).



Slika 3-3. Prikaz utiskivanja kašastog otpada kroz tubing na primjeru bušotine Kal-6 (Gaurina-Međimurec, 2018)

4. ODABIR UTISNE FORMACIJE

Odabir utisne formacije (*engl. injection zone, injection formation, disposal zone, disposal formation, candidate zone, injection interval*), predstavlja prvi korak u procesu planiranja utiskivanja otpada u podzemlje. Pravilan odabir stijena pogodnih za utiskivanje izuzetno je važan kako bi se osiguralo trajno zbrinjavanje otpada u podzemlju i spriječila migracija otpadnih fluida prema podzemnim izvorima pitke vode.

Formacija odabrana za utiskivanje tehnološkog fluida mora biti sposobna prihvatiti utiskivani fluid, a isto tako mora biti i dovoljno velika da se u nju može odložiti planirani volumen otpadnog fluida. Odabrana formacija ne smije posjedovati frakture ili rasjede po kojima fluid može komunicirati do površine ili do formacija koje sadrže pitku vodu. Osim toga, formacija odabrana za utiskivanje tehnološkog fluida treba biti povezana s nekim tipom izolatora koji će je prostorno ograničiti (npr. nepropusne podinske i krovinske stijene) (Gaurina-Međimurec i dr., 1998).

Također, potrebno je prikupiti podatke o seizmičkoj aktivnosti promatranog područja, kako bi se utvrdilo da utisna bušotina nije smještena na geološki nestabilnom području. Važno je utvrditi i postojanje napuštenih bušotina, rezervi mineralnih sirovina i pitke vode. Geološka formacija za odlaganje utisnutog otpada ne smije sadržavati ekonomski isplative zalihe ugljikovodika.

Parametri prepoznati kao najvažniji za pravilan odabir utisne formacije su: propusnost, poroznost, debljina ležišta, dubina ležišta i geološke karakteristike strukture na promatranom području. Dodatni faktori koje je potrebno razmotriti su: detalji o litostratigrafskom stupcu koji prekriva ciljano ležište, vrsta i debljina pokrovne stijene, prisutnost izmjenjujućih slojeva pješčenjaka i šejla koji prekrivaju utisnu zonu, vlačna čvrstoća i stlačivost ležišta, te geografska udaljenost između izvora otpada i lokacije za odlaganje (Nadeem i dr., 2005).

Propusnost igra ključnu ulogu u raspršivanju tlaka; visoka propusnost omogućuje brzo otjecanje tekuće faze utisnutog otpada, što dovodi do naglog pada tlaka. To je vrlo važno iz razloga što pri utiskivanju kašastog otpada pri visokom tlaku može nastati *in-situ* zona abnormalno visokog tlaka. Ta zona visokog tlaka i njezino širenje može utjecati na postojeće rasjede ili uzrokovati klizanje duž ploha slojevitosti (*engl. bedding planes*); zbog

toga je vrlo važno da se tlak na nekoj udaljenosti od bušotine rasprši brzo nakon svakog obroka utiskivanja (Nadeem i dr., 2005).

U čvrstim stijenama kao što su šejlovi i vapnenci nastaju tanke i duge frakture, dok u poroznim i propusnim stijenama male čvrstoće (npr. slabo konsolidirani pješčenjaci) nastaju šire, ali kraće frakture. Te razlike u geometriji fraktura nastaju zbog različitih brzina otjecanja fluida, što je opet povezano s propusnošću. Šire i kraće frakture mogu zbrinuti znatno veće količine čvrste faze utisnutog otpada. Međutim, visoka propusnost otežava utiskivanje zbog naglog nakupljanja čvrstih čestica pri vrhovima fraktura (engl. *solids screen-out*), tj. procesa filtracije koji limitira daljnji rast fraktura, te dovodi do nastanka širokog područja odlaganja otpada u ležištu kroz stvaranje višestrukih fraktura. Takvo područje odlaganja s višestrukim frakturama omogućuje smještanje velikog volumena čvrste faze otpada u blizini bušotine, te se zbog toga visoka propusnost smatra povoljnom pri utiskivanju većih količina otpada, unatoč tome što je ponekad teško stvoriti i održavati frakture otvorenima tijekom utiskivanja (Nadeem i dr., 2005).

Poroznost je često povezana sa stlačivosti, te se stijene koje imaju veliku poroznost i veliku stlačivost smatraju izuzetno povoljnim za duboko utiskivanje otpada. Na temelju terenskih iskustava zaključeno je da tlakovi utiskivanja moraju biti 15-30% veći od vertikalnog naprezanja kako bi bilo moguće kontinuirano utiskivati kašasti otpad. Visoki tlak u blizini frakture smanjuje efektivna naprezanja, što vodi do male ekspanzije stijene, te do smanjenog efektivnog ograničenja u ležištu (engl. *confinement*) i otpora smicanju. U slučaju pješčenjaka male čvrstoće, smična dilatacija događa se u slučaju visokog tlaka; čak i slabo konsolidirani pješčenjaci s poroznošću od 30% pokazuju smičnu dilataciju. Jednom kada se utiskivanje zaustavi i otjecanje završi, čvrste čestice unutar fraktura ostaju zbijene i zarobljene zbog velikog efektivnog naprezanja u području odlaganja (Nadeem i dr., 2005).

Za istu vrstu stijene u većini slučajeva vrijedi da što je veća poroznost, to će biti veća i propusnost. Međutim, tijekom utiskivanja kašastog otpada, fino zrnate čestice mogu zbog filtracije blokirati ulaze pora, čime se značajno smanjuje lokalna propusnost. Mala poroznost automatski ukazuje na manji kapacitet skladištenja (engl. *storativity*) i potrebu za većim tlakovima kako bi se stvorile frakture željene veličine. Također, stvaranje stabilnog područja odlaganja je puno kompliciranije u čvrstim stijenama male poroznosti (Nadeem i dr., 2005).

Dubina ležišta odabranog za utiskivanje kašastog otpada utječe na kapitalne i operativne troškove. Kapitalni troškovi uključuju veću cijenu dubokih bušotina i potrebu za robusnijim postrojenjem. Operativni troškovi su u slučaju dubljih bušotina također veći zbog većih troškova održavanja i zbog potrebe za pumpama veće snage. Prilikom odabira dubine ležišta najvažnije je osigurati izoliranost od podzemnih izvora pitke vode, te od naftnih ležišta i rudnika (Nadeem i dr., 2005).

S ekološkog gledišta bolje je imati bušotine veće dubine, jer je tada nemoguće da utisnuti fluid migrira do površine budući da gradijenti tlakova potrebni za njegovu migraciju ne mogu biti održani. Vrsta otpada također utječe na dubinu koja će biti odabrana; za opasni otpad su potrebne veće dubine i višestruki slabo propusni slojevi između ležišta i akvifera, dok se neopasni otpad može utiskivati i na manjim dubinama (Nadeem i dr., 2005).

Volumen tekuće faze otpada koji je moguće zbrinuti hidrauličkim frakturiranjem ovisi o kapacitetu skladištenja ležišnih stijena; tj. o **debljini ležišta**, njegovom prostiranju, te o poroznosti susjednih slojeva. Idealno ležište je velike debljine i širokog prostiranja, te sposobno primiti veliki volumen otpada (tekuća i čvrsta faza) bez porasta tlaka, uz mogućnost povoljnog smještaja više utisnih bušotina (Nadeem i dr., 2005).

U tablici 4-1. navedeni su čimbenici koji utječu na parametre koji se koriste u okviru planiranja procesa utiskivanja otpada (Abou-Sayed i Guo (2001).

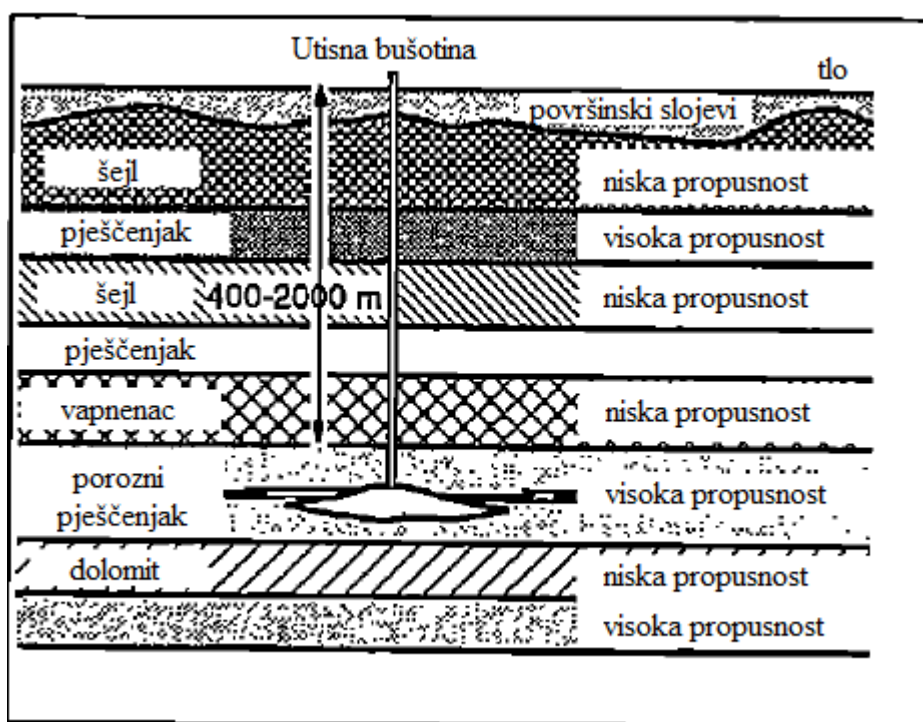
Tablica 4-1. Čimbenici i njihov utjecaj na parametre koji se koriste u okviru planiranja procesa utiskivanja otpada (Abou-Sayed i Guo, 2001)

Čimbenici	Parametri na koje utječu
Litološki stupac	odabir utisne zone, veličina frakture, volumen utisnutog obroka (<i>engl. batch size</i>), kapacitet utiskivanja (<i>engl. injection rate</i>)
Dubina utisne zone	vrijednost tlaka sisaljki, bušotinske glave, zaštitnih cijevi i rajzer cijevi
Debljina utisne zone	volumen utisnutog obroka, veličina frakture
Svojstva formacije	kapacitet utiskivanja, zatvorenost frakture (<i>engl. fracture containment</i>), volumen utisnutog obroka
Propusnost, poroznost, filtracijska svojstva	kapacitet utiskivanja, veličina frakture, volumen utisnutog obroka, reološka svojstva kašastog otpada, stvaranje jedne ili više fraktura
Slojni tlak	vrijednost tlaka (<i>engl. pressure rating</i>), reološka svojstva kašastog otpada i zahtijevana gustoća
Zone koje sadrže ugljikovodike	kapacitet utiskivanja, volumen utisnutog obroka i zatvorenost frakture
Prirodne frakture i kaverne	odabir utisne zone, protok (<i>engl. rate</i>), zatvorenost
Rasjedi	odabir utisne zone, protok, zatvorenost

Iako se bušaći otpad utiskuje u različite formacije kao što su npr. šejl i pješčenjak, utiskivanje u visoko propusne formacije ne smatra se dobrom praksom ukoliko je brzina stvaranja otpada mala, zato što utiskivanje kaše s velikom koncentracijom čvrstih čestica pri malim brzinama može uzrokovati nakupljanje čvrstih čestica pri vrhu frakture i čepljenje utisne zone. S druge strane, u slučaju da je brzina stvaranja otpada ili ukupni volumen otpada velik, utiskivanje u formacije šejla također se ne smatra dobrom praksom

iz razloga što velike brzine i volumeni utiskivanja u slabo propusnim formacijama mogu stvoriti velike frakture i mogu se proširiti iznad gornje granice sloja šejla. Bez obzira na to, planiranje izrade bušotine i dizajn kolone zaštitnih cijevi mogu ponekad biti ključni pri odabiru utisne zone (Abou-Sayed i Guo, 2001).

Bez obzira na to koja vrsta stijene je odabrana kao utisna formacija, poželjno je odabrati zone koje su prekrivene formacijama suprotnih karakteristika propusnosti (visoka naspram niske). Kada je to moguće, poželjno je odabrati zonu u kojoj se izmjenjuju slojevi pješčenjaka i šejla (slika 4-1.), pri čemu se utiskivanje vrši u jednom od donjih slojeva, tako da gornji slojevi služe istovremeno kao zaštitne barijere (slojevi niske propusnosti) i kao zone brzog prodora fluida u formaciju (slojevi visoke propusnosti), kako bi se zaustavilo širenje frakture prema gore, tj. prema podzemnim izvorima pitke vode. Optimalna formacija za utiskivanje velikog volumena kaše je ona koja je velike debljine, relativno ravna, a lateralno se proteže na veliku udaljenost (Veil i Dusseault, 2003).



Slika 4-1. Idealni stratigrafski uvjeti za utiskivanje kašastog otpada (Dusseault i Bilak, 1993)

Izmjenjujući slojevi stijena niske i visoke propusnosti prikazani na slici 4-1. omogućuju horizontalni režim strujanja fluida, te sprječavaju vertikalni tok budući da su

propusni slojevi horizontalno orijentirani, te odvojeni jedni od drugih nepropusnim barijerama šejla (Dusseault i Bilak, 1993).

U nastavku će biti prikazan i opisan geološki model koji su razvili Nadeem i drugi, a koji služi za procjenu prikladnosti ležišta za utiskivanje otpada s obzirom na najvažnije geološke parametre.

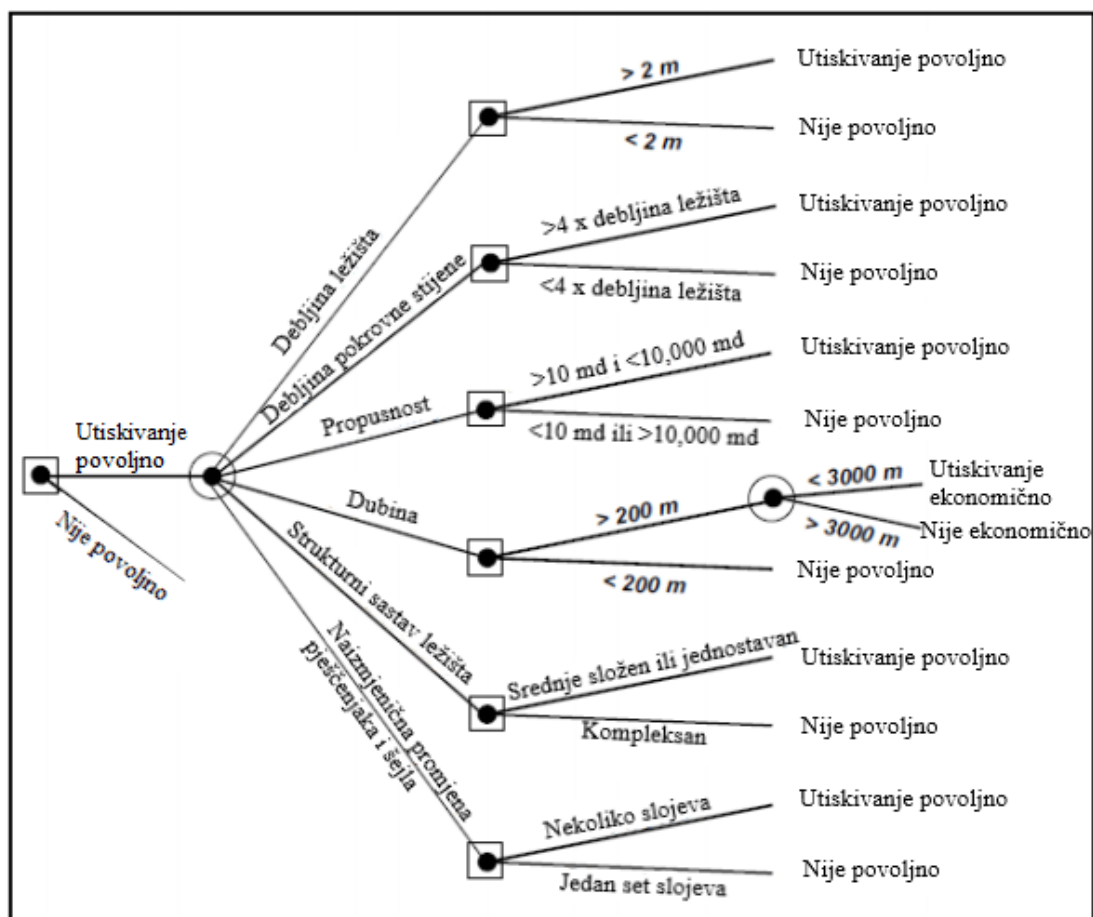
4.1. MODEL GEOLOŠKE PROCJENE ZONE UTISKIVANJA OTPADA

Odabir prikladne formacije za utiskivanje prvenstveno ovisi o geološkim svojstvima područja, te o geomehaničkim i ležišnim karakteristikama ciljane litološke cjeline. Kako bi se pravilno odabralo ležište prikladno za utiskivanje, potrebno je izraditi opsežan geološki model koji će uzeti u obzir sve važne parametre. Korištenjem takvog modela, moguće je lakše rangirati i odabrati prikladnu utisnu zonu za određeni projekt, te istovremeno smanjiti troškove i ekološku odgovornost (Nadeem i dr., 2005).

Geološki model se sastoji od dva dijela; prvi dio modela predstavlja stablo odlučivanja (slika 4-2.), dok drugi dio obuhvaća izvođenje polu-kvantitativnog numeričkog odnosa koji izražava kvalitetu lokacije u obliku „ukupnog rezultata“.

4.1.1. Stablo odlučivanja

Stablo odlučivanja je grafički prikaz procesa odlučivanja, tj. preduvjeta niza događaja i mogućih ishoda svakog događaja. Ovo stablo odlučivanja uzima u obzir samo najkritičnije parametre, one koji će učiniti lokaciju neprikladnom ili prikladnom za utiskivanje, ali ne najbolje kvalitete. Ti parametri imaju definirane određene granice koje su odabrane na temelju geoloških i geomehaničkih svojstava, te će svaka lokacija koja ne može udovoljiti traženim zahtjevima biti odbačena prilikom procesa odabira formacije za utiskivanje (Nadeem i dr., 2005).



Slika 4-2. Stablo odlučivanja kao prvi dio opsežnog geološkog modela (Nadeem i dr., 2005)

Stablo odlučivanja prikazano na slici 4-2. čita se s lijeva na desno; na krajnjoj lijevoj strani nalazi se početni čvor (uokviren kvadratom) s dvije opcije: nastaviti ili odbaciti. U toj ranoj fazi projekta, isti se može odbaciti u slučaju npr. neke neočekivane političke odluke ili strogog pridržavanja nekih važećih regulatornih zahtjeva. Sljedeći čvor (čvor slučaja, uokviren krugom) ima šest grana, od kojih svaka predstavlja kritičnu odluku, definiranu u smislu posebnih ograničenja ili vrijednosti koje reguliraju procjenu prikladnosti lokacije za utiskivanje.

Ovdje definirana ograničenja mogu se u određenim slučajevima promijeniti. Npr. u slučaju da već postoje izrađene bušotine u idealnom ležištu koje je na dubini nešto većoj od 3000 m, tada se to nameće kao bolja opcija za utiskivanje od izrade novih bušotina na manjim dubinama. Također, podzemni izvori pitke vode ponekad se mogu nalaziti i na dubinama većim od 200 m, te bi u tom slučaju brojčana ograničenja korištena u ovom procesu trebalo promijeniti. Dakle, ovo stablo odlučivanja predstavlja pomoć pri odabiru

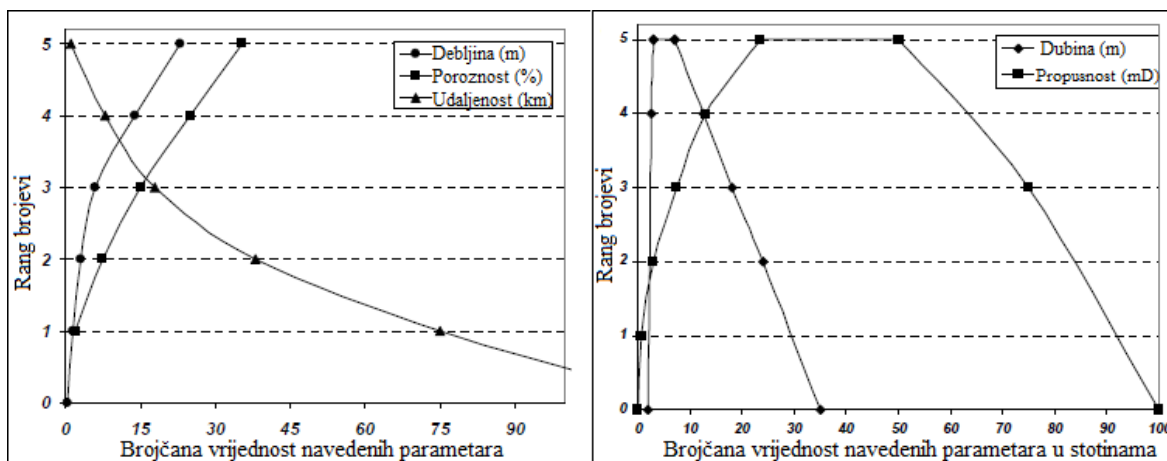
lokacije za utiskivanje, ali ne i nešto čega bi se trebalo strogo pridržavati. Ukoliko su svojstva formacije unutar dopuštenih granica za sve parametre uključene u stablo odlučivanja, tada slijedi drugi dio geološkog modela, te daljnja procjena i rangiranje lokacije.

4.1.2. Polu-kvantitativno rangiranje

Drugi dio geološkog modela uključuje jednostavne proračune koji kombiniraju rang i faktor ponderiranja za svaki parametar kako bi se dobio „ukupan rezultat“ za potencijalnu lokaciju za utiskivanje. To se smatra relativnim pokazateljem kvalitete u odnosu na ostale lokacije koje su također prošle stablo odlučivanja s pozitivnim ocjenama.

Na temelju vrijednosti ili kvalitete uvjeta u pogledu utiskivanja čvrstih čestica, parametrima poput propusnosti, poroznosti, itd. dodjeljuju se brojevi koji određuju njihov rang ($P_1, P_2, P_3, \dots P_n$). Također, postoji i potreba za faktorima ponderiranja ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots \alpha_n$) na koje treba primijeniti brojčano rangiranje parametara, a potreba za njima proizlazi iz činjenice da postoje parametri poput propusnosti koji su važniji od drugih parametara, kao npr. prostiranja ležišta. S ove dvije uvedene vrijednosti, sveukupna brojčana vrijednost u obliku ukupnog rezultata (W) za potencijalnu lokaciju za utiskivanje može se izraziti u obliku matematičkog odnosa ($W = \alpha_1 \times P_1 + \alpha_2 \times P_2 + \dots + \alpha_n \times P_n$). Faktore rangiranja i ponderiranja trebaju odrediti stručnjaci koji su upoznati s problemima, okolišnim čimbenicima i troškovima na razmatranoj lokaciji. Specifične vrijednosti upotrijebljene u ovom primjeru na temelju iskustva potrebno je promijeniti u nekim drugim okolnostima (Nadeem i dr., 2005).

Rang brojevi su redni brojevi (nula predstavlja minimalni rang, a pet maksimalni rang) koji su razvijeni s ciljem kvantitativnog rangiranja lokacije za utiskivanje, a dodjeljuju se na temelju iskustva, dostupnih podataka i regulatornih zahtjeva. Grafički odnos između rang brojeva i numeričkih vrijednosti parametara prikazan je na sljedećim grafovima (slika 4-3.).



Slika 4-3. Odnos između ranga i brojčanih vrijednosti važnijih parametara kod odabira utisne formacije (Nadeem i dr., 2005)

Faktori ponderiranja dodjeljuju se svakom parametru na temelju njihove kvalitete i važnosti u obliku ljestvice prioriteta. Koristeći tu ljestvicu prioriteta razvijen je postupak za utvrđivanje odgovarajućih faktora ponderiranja (Nadeem i dr., 2005):

- 1) za svaki parametar dodjeljuju se brojevi kao faktori ponderiranja na temelju iskustva i prioriteta parametara;
- 2) svakom parametru dodjeljuju se rang brojevi za različite hipotetske lokacije; u tu svrhu, brojne moguće kombinacije su uzete u obzir, u rasponu od najboljih do najgorih slučajeva;
- 3) faktori ponderiranja i rang brojevi koriste se za izračunavanje ukupnog rezultata za svaku hipotetsku lokaciju, i
- 4) ovaj postupak ponavlja se za različite skupove faktora ponderiranja, uz zadržavanje drugih uvjeta i rang brojeva na istim vrijednostima.

Tablica 4-2. opisuje međuovisnost najvažnijih parametara, kao i ljestvicu prioriteta i faktora ponderiranja koji su izvedeni iz prethodno opisanog postupka. Maksimalni rezultat koji određena lokacija može postići na temelju 9 najvažnijih parametara navedenih u tablici 4-2. iznosi 125.

Tablica 4-2. Međuovisnost parametara, njihovog prioriteta i faktora ponderiranja (Nadeem i dr., 2005)

Parametar	Prioritet	Napomena	Faktor ponderiranja
Propusnost	1	ovisi o poroznosti	7
Debljina ležišta	2	neovisna varijabla	4,5
Strukturna građa i tektonsko stanje	3	neovisna varijabla	3,5
Poroznost	4	neovisna varijabla	3
Dubina ležišta	5	neovisna varijabla	2
Izmjenjujući slojevi pješčenjaka i šejla	6	neovisna varijabla	2
Čvrstoća ležišta	7	ovisi o poroznosti i propusnosti	1
Stlačivost ležišta	8	ovisi o poroznosti	1
Geografska udaljenost	9	neovisna varijabla	1

Lokacija se obično smatra neprikladnom za utiskivanje ukoliko je ukupni rezultat manji od 85, što se smatra ispod prosječnim rezultatom.

4.2. KLASA UTISNIH BUŠOTINA

U SAD-u, EPA (engl. *Environmental Protection Agency*) i vlade saveznih država prema Zakonu o pitkoj vodi (engl. *Safe Drinking Water Act* - SDWA) reguliraju aktivnosti utisnih bušotina. EPA je podijelila utisne bušotine u 6 klasa:

- 1) Klasa I – bušotine za utiskivanje opasnog otpada, ali i za utiskivanje neopasnih industrijskih otpadnih voda, te komunalnih otpadnih voda ispod najdubljih izvora pitke vode;

- 2) Klasa II – bušotine za utiskivanje slojne vode i ostalih fluida povezanih s proizvodnjom nafte i plina ispod najdubljih izvora pitke vode, ugljikovodika u svrhu skladištenja, te bušotine za povećanje iscrpka (EOR);
- 3) Klasa III – bušotine za utiskivanje fluida povezanih s rudarenjem; utiskivanje se također odvija ispod najdubljih izvora pitke vode;
- 4) Klasa IV – bušotine za utiskivanje opasnog ili radioaktivnog otpada u ili iznad podzemnih izvora pitke vode (zabranjene su);
- 5) Klasa V – bušotine za utiskivanje neopasnih fluida u ili iznad podzemnih izvora pitke vode, te su obično pliće od ostalih utisnih bušotina;
- 6) Klasa VI – bušotine za utiskivanje CO₂ u duboke formacije s ciljem geološkog skladištenja CO₂ (engl. *carbon capture and storage* – CCS).

EPA je također izdala UIC (engl. *Underground Injection Control*) propise za zaštitu izvora pitke vode. Ti propisi zahtijevaju da sve utisne bušotine posjeduju unutarnju i vanjsku mehaničku cjelovitost (engl. *mechanical integrity* – MI) koja se provjerava najmanje svakih 5 godina. Smatra se da utisna bušotina ima mehanički integritet ili cjelovitost ukoliko nema propuštanja kolone zaštitnih cijevi, tubinga ili pakera (unutarnji mehanički integritet), te ako nema kretanja utisnutih fluida prema podzemnim izvorima pitke vode kroz vertikalne kanaliće uz kanal bušotine, tj. duž vanjske strane kolone zaštitnih cijevi (vanjski mehanički integritet). Oštećenje unutarnjeg mehaničkog integriteta posljedica je korozije ili mehaničkog oštećenja cijevi, dok je oštećenje vanjskog mehaničkog integriteta posljedica oštećenja cementnog kamena ili loše cementacije.

Test mehaničke cjelovitosti (engl. *Mechanical Integrity Test* – MIT) mora se provesti nakon svakog remonta bušotine i nakon završnog opremanja novo izbušene ili prenamijenjene utisne bušotine. Test mehaničke cjelovitosti 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.

4.3. KONSTRUKCIJA I ODABIR UTISNE BUŠOTINE

Prioritet prilikom odabira utisne bušotine je da se odaberu plitke bušotine sa malom proizvodnjom koje se nalaze blizu lokacije na kojoj se izrađuje bušotina (i ujedno stvara otpad koji treba utisnuti) kako bi se umanjio bilo kakav negativan utjecaj utiskivanja na

proizvodna ležišta i operativne aktivnosti. Odabir utisne bušotine mora optimizirati uspješnost rada u okviru ograničenja radnih uvjeta na terenu. Ključne preporuke koje je potrebno slijediti prilikom odabira utisne bušotine su (Abou-Sayed i Guo, 2001):

- odabrati bušotine koje omogućuju pristup prikladnoj utisnoj formaciji;
- odabrati bušotine s dobrom kvalitetom cementne veze uzduž utisne zone;
- odabrati najnovije bušotine kako bi se umanjila reakcija formacije i pogoršanje injektivnosti s vremenom;
- izbjegavati bušotine s nepovoljnim otklonom i azimutom kako bi se smanjio gubitak tlaka u pribušotinskoj zoni;
- izbjegavati bušotine s malim zazorom između kolona zaštitnih cijevi kako bi se izbjeglo pretjerano trošenje zbog erozije, te čepljenje prstenastog prostora tijekom utiskivanja kašastog otpada (anularno utiskivanje);
- izbjegavati bušotine koje se nalaze u blizini bušotina s dugim nezacijevljenim sekcijama (*engl. open hole*) jer se, u najgorem slučaju, utisnuta kaša može probiti do površine zbog slabe cementne veze u tim susjednim bušotinama;
- procijeniti lokaciju bušotine, veličinu fraktura, te njihov utjecaj na buduće planove razvoja; potrebno je nacrtati mrežu (*engl. spider plot*) susjednih bušotina koje prolaze kroz dio utisne zone radi određivanja blizine predviđenih fraktura drugim bušotinama u tom području;
- procijeniti operativnu (radnu) cjelovitost potencijalnih utisnih bušotina jer je operativna cjelovitost unutarnje i vanjske kolone zaštitnih cijevi u odnosu na očekivane tlakove utiskivanja kašastog otpada od iznimne važnosti za uspjeh procesa utiskivanja.

Prije nego što se započne s utiskivanjem krhotina stijena potrebno je riješiti nekoliko problema vezanih uz dizajn bušotine. Najvažnija područja koja treba uzeti u obzir i riješiti u projektu utiskivanja na odabranoj lokaciji su: konstrukcija bušotine, erozija ušća bušotine, te tlakovi gnječenja i rasprskavanja zaštitnih cijevi (Abou-Sayed i Guo, 2001).

Ušće bušotine treba biti dizajnirano tako da izdrži maksimalnu očekivanu eroziju, te erozijom uzrokovano trošenje ulaznih otvora (*engl. entry ports*). Trošenje vješalice kolone zaštitnih cijevi često se javlja kada se anularno utiskivanje odvija kroz bočne ulazne otvore. Tijekom operacija utiskivanja kroz prstenasti prostor, ušće bušotine može biti dizajnirano na način da se utiskivanje izvodi kroz dvostrane ulazne otvore kako bi se

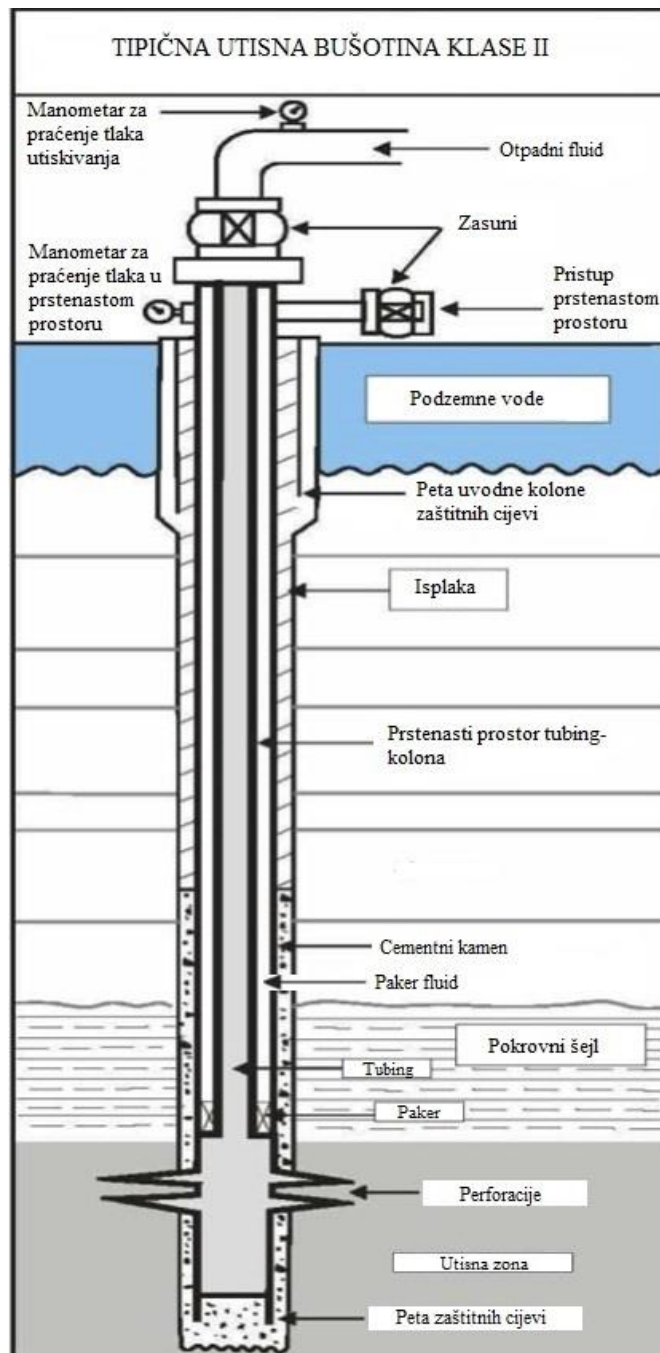
smanjila erozija. Ostala sredstva koja se mogu koristiti s ciljem ublažavanja problema povezanih s erozijom uključuju: oblog ili rukavac koji je umetnut ili uvrnut između dva navojna spoja kako bi se smanjilo njihovo trošenje i povećala otpornost na koroziju (engl. *thread-protection bushings*), zaštitni plašt (u obliku prevlake, tj. premaza) koji štiti zaštitne cijevi od korozije i oštećenja (engl. *casing jackets*), te ploče divertera (engl. *diverter plates*) (Abou-Sayed i Guo, 2001).

Tlakove gnječenja i rasprskavanja zaštitnih cijevi duž utisne zone potrebno je odrediti na temelju gradijenta tlaka frakturiranja, tlaka nastalog uslijed trenja (engl. *frictional pressure*) i hidrostatskog tlaka (engl. *hydrostatic head*) (Abou-Sayed i Guo, 2001).

Uvjet kod konstrukcije utisnih bušotina je postojanje najmanje tri koncentrična niza cijevi (Gaurina-Međimurec, 2018):

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 formacije.

Važnu funkciju kod konstrukcije utisne bušotine ima i paker koji se ugrađuje iznad zone utiskivanja, brtvi prostor između tubinga i zadnje ugrađene kolone, te omogućava održavanje konstantnog tlaka u tom prstenastom prostoru. Na sljedećoj slici (4-4.) može se vidjeti najčešća konstrukcija bušotine za utiskivanje otpada iz naftne industrije pri tlaku frakturiranja.



Slika 4-4. Tipična konstrukcija utisne bušotine klase II (<https://www.dmr.nd.gov/oilgas/undergroundfaq.asp>)

4.4. RIZICI POVEZANI S UTISKIVANJEM

Rizici povezani s utiskivanjem kašastog otpada mogu se podijeliti u tri osnovne skupine (Ronderos i Ovalle, 2010):

1. rizici površinske opreme:

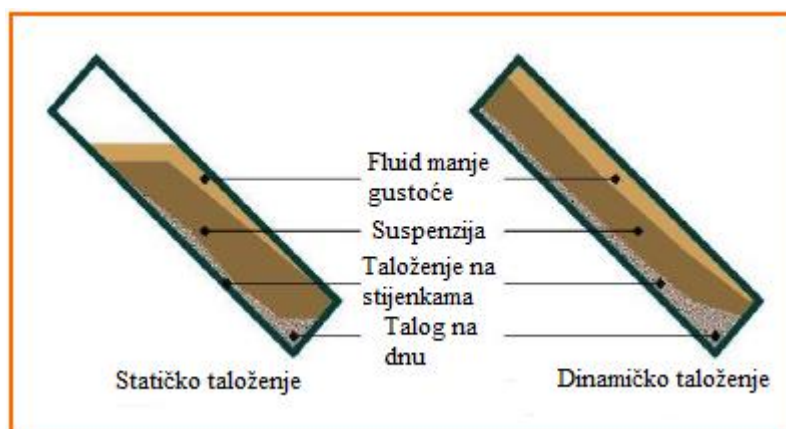
- kapacitet opreme i
- kvar opreme;

2. bušotinski rizici:

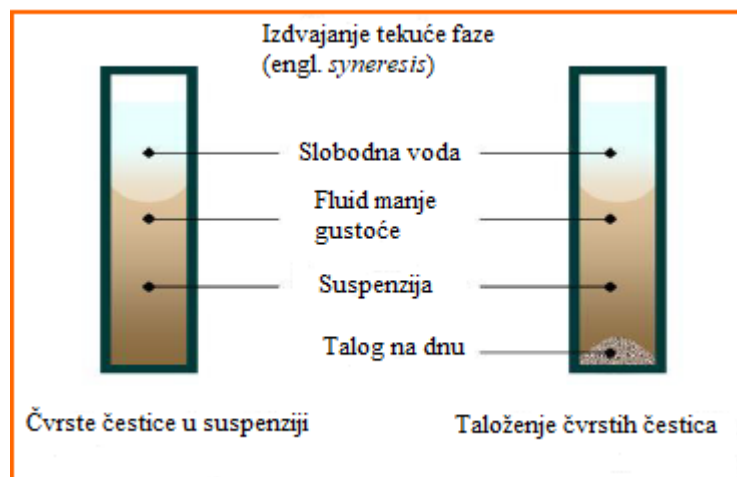
- erozija i korozija zaštitnih cijevi i tubinga;
- taloženje čestica (engl. *sagging*) u bušotinama s odklonom od vertikale koje uzrokuje značajne promjene u gustoći kašastog otpada (slika 4-5.);
- spontano skupljanje kašastog otpada (engl. *shrinking of slurry*) zbog izdvajanja tekuće faze (engl. *syneresis*) (slika 4-6.);

3. rizici povezani s hidrauličkim frakturiranjem:

- opasnost od prodora utisnutog otpada kroz pokrovne stijene prema podzemnim izvorima pitke vode;
- opasnost od presijecanja frakture s proizvodnim bušotinama, prirodnim rasjedima ili trajektorijama budućih bušotina;
- čepljenje vrhova fraktura čvrstim česticama iz utisnute kaše zbog filtracije kaše (engl. *screen-out*);
- kapacitet područja utiskivanja;
- širenje frakture kroz kanaliće u cementnom kamenu koji su nastali zbog slabe kvalitete cementacije.



Slika 4-5. Taloženje čestica (engl. *sagging*) (Ronderos i Ovalle, 2010)



Slika 4-6. Skupljanje kašastog otpada zbog izdvajanja tekuće faze (engl. *syneresis*) (Ronderos i Ovalle, 2010)

Mogući putevi migracije utisnutog otpada prema podzemnim izvorima pitke vode i prema površini su (Gaurina-Međimurec, 2018):

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

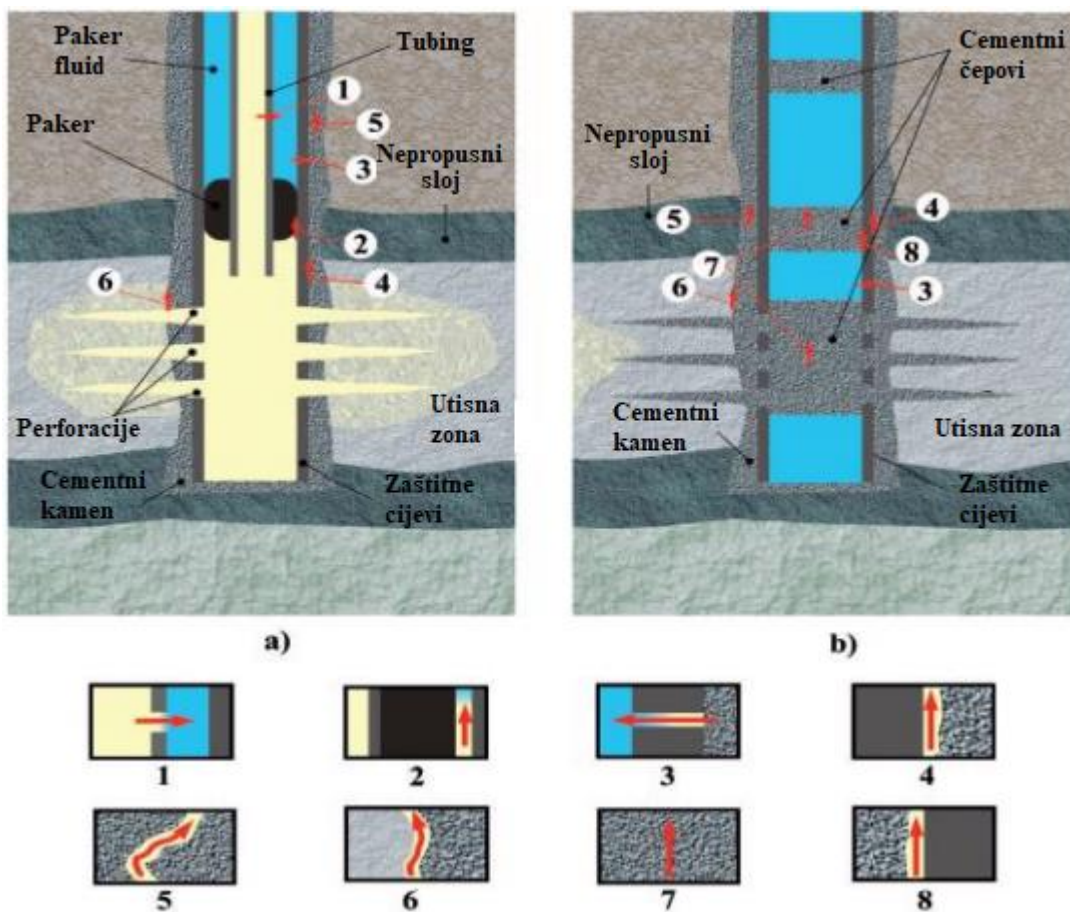
Loše izvedena cementacija bušotina koje prodiru u utisnu zonu predstavlja najveći rizik prilikom utiskivanja kašastog otpada. Preporuke koje treba slijediti prilikom izvođenja cementacije kako bi se postigla kvalitetna cementna veza i uspješno izolirala utisna zona su (Abou-Sayed i Guo, 2002):

1. dobra centralizacija kolone zaštitnih cijevi,
2. optimalno raspoređivanje cementne kaše,
3. uklanjanje isplake sa stijenki kanala bušotine i upotreba razdjeljivača,
4. pravilan odabir smještaja vrha cementa kako bi se postigla kvalitetna izolacija utisne zone.

Također, preporuča se i procjena kvalitete cementne veze (engl. *Cement bond log-CBL*) na temelju rezultata zvučne karotaže i snimanja stanja kolone (engl. *Casing condition log*). Ova procjena je posebno važna prilikom utiskivanja otpada u formacije šejla zato što fluid ne prodire brzo u takvim slabo propusnim formacijama, te postoji opasnost od zadržavanja visokog tlaka kroz duži period (Abou-Sayed i Guo, 2002).

Mogući putevi migracije fluida u aktivnoj i napuštenoj bušotini mogu se vidjeti na slici 4-7. (Gaurina-Međimurec, 2018):

- 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 4-7. Mogući putevi migracije fluida u aktivnoj (a) i napuštenoj (b) bušotini (Gaurina-Međimurec, 2018)

5. PRIPREMA OTPADA ZA UTISKIVANJE

Općenito govoreći, utiskivanje otpada je proces u kojem se čvrste tvari (krhotine stijena, proizvedeni pijesak, talozi s dna spremnika, te zagađeno tlo) i tekućine (svježa voda, morska voda, proizvedena slojna voda i otpadna isplaka) skupljaju i prevoze do sustava za pripremu kaše za utiskivanje, gdje se zatim taj otpad razvrstava, usitnjava i miješa kako bi se dobila stabilna i pumpabilna kaša (Maliardi i dr., 2014).

Neopasni otpad iz naftne industrije koji se može utiskivati u podzemlje nastaje tijekom istraživanja, bušenja i proizvodnje, a njegova podjela može se vidjeti u sljedećoj tablici.

Tablica 5-1. Neopasni otpad (engl. *Non-hazardous oilfield wastes* - NOW) iz naftne industrije koji se može utiskivati u podzemlje (Dusseault i Bilak, 1998)

Vrsta otpada	Fizikalne karakteristike
Proizvedena slojna voda	Visok udio klorida, nafta u tragovima, mala količina čestica gline, te ostale otopljene soli
Proizvedeni pijesak	Sitno do srednje zrnat pijesak obično s više od 85% SiO ₂ ; može sadržavati visoki udio klorida, te do 5% težinski zauljenog taloga na česticama pijeska
Otpadna isplaka	Krhotine stijena, zauljene krhotine u slučaju isplake na bazi ulja; otpadna isplaka koja sadrži glinu, vodu, razne kemikalije, emulgirana nafta,...
Talozi s dna spremnika, otpadni muljeviti talog, stabilne emulzije	Muljevi iz skladišnih rezervoara, kloridi, gline, slana voda, asfalteni, udio nafte između 30 i 50%
„slops“ (talog koji se zove „gorp“ ako je bogat emulzijama)	Mješavina pijeska, zagađenog tla, otpadne nafte i vode, koja nastaje prilikom čišćenja dna spremnika ili postrojenja, te nafta iz izljeva

Važno je napomenuti da se ovaj sav otpad naziva neopasnim iz razloga što je u SAD-u EPA (*Environmental Protection Agency*) otpad od istraživanja i proizvodnje nafte i plina isključila iz regulacija za opasni otpad. Zbog velike količine tog otpada koji se stvara, on je izuzet od regulacija za opasni otpad, te je podvrgnut propisima za neopasni otpad. U državi Alberti, Kanada, otpad naveden u tablici 5-1. također spada u kategoriju otpada koji je

izuzet iz opasnog otpada. U Hrvatskoj se prema *Pravilniku o katalog otpada* (NN 90/15) ovaj otpad svrstava u opasni otpad.

Na lokaciji bušotine koja se izrađuje, krhotine stijena se prvo skupljaju i transportiraju od opreme za odvajanje krhotina iz isplake na bušaćem postrojenju (vibracijska sita, desanderi, desilteri i taložnik) do jedinice za pripremu kaše za utiskivanje, gdje se krhotine melju (ukoliko je potrebno) i miješaju s vodom kako bi se formirala otpadna kaša. Otpadna kaša se zatim prenosi u spremnik za finalno podešavanje njezinih reoloških svojstava (Gaurina-Međimurec, 2015).

Željena veličina čestica varira ovisno o geologiji, poroznosti i propusnosti utisne formacije, ali u većini slučajeva uvjetovano je da čestice budu manje od 300 μm . To otprilike odgovara česticama koje mogu proći kroz sito od 50 mesha (Veil i Dusseault, 2003). Smatra se da će kaša koja sadrži pijesak, za isti udio čvrstih čestica, imati manju viskoznost nego u slučaju kad krhotine potječu od šejla (Abou-Sayed i Guo, 2001).

Iako upotreba viskozifera i aditiva za kontrolu toka (engl. *leakoff control additives*) može biti potrebna za poboljšanje svojstava suspenzije i kapaciteta utiskivanja otpadne kaše, postoji nekoliko nedostataka u njihovoj primjeni za odlaganje kašastog otpada. Prvi nedostatak je cijena, te je zbog toga preporučeno da se za željeni stupanj suspenzije kaše i svojstva protoka ne koriste aditivi, nego da se to postiže odgovarajućim dizajnom i praćenjem koncentracija krute i tekuće faze, te količina utisnutog otpada u jedinici vremena. Drugi veliki nedostatak nekih aditiva je taj da mogu uzrokovati pogoršanje propusnosti formacije i pretjerano širenje frakture po širini i visini (Bruno i dr., 1995).

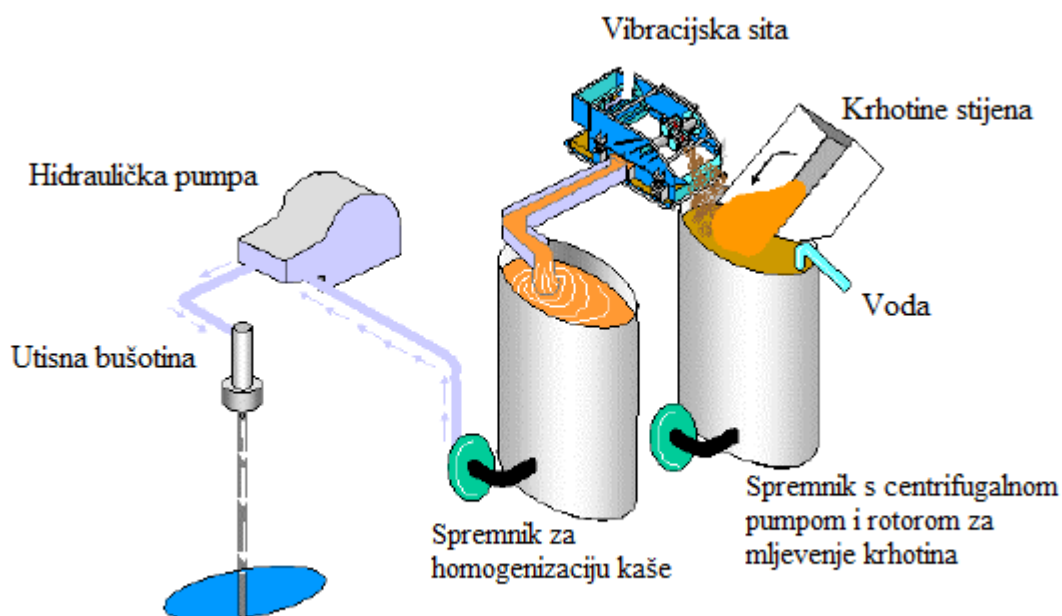
Najveći rizik povezan s pripremom kaše i samim utiskivanjem odnosi se na opasnost od taloženja čvrstih čestica i čepljenja fraktura i prstenastog prostora česticama iz kaše (posebno kod anularnog utiskivanja). Na mogućnost da dođe do toga utječe veličina čestica, viskoznost kaše i suspenzija čvrstih čestica u kaši između obroka. Taloženje i čepljenje najlakše je spriječiti stalnim praćenjem veličine čestica i kontroliranjem viskoznosti kaše (Abou-Sayed i Guo, 2001).

Kako bi se operacije utiskivanja otpada uspješno provele, potreban je površinski sustav koji može omogućiti utiskivanje željenog volumena fluida pri odgovarajućim tlakovima. Svaki takav sustav mora biti konstruiran na način da zadovolji zahtjeve za obradom

krhotina, te da stane na predviđeno mjesto na postrojenju. Svaki površinski sustav za utiskivanje krhotina u podzemlje sastoji se od tri osnovna dijela (Maliardi i dr., 2014):

- 1) sustav transporta krhotina – služi za prenošenje krhotina sa vibracijskih sita do spremnika u kojima se vrši njihovo mljevenje i priprema za utiskivanje (obično se odvija gravitacijski);
- 2) sustav za pripremu kaše – obuhvaća mljevenje krhotina i usitnjavanje do prihvatljive veličine te dodavanje vode pri čemu nastaje suspenzija krhotina u vodi (kašasti otpad) koja se miješanjem homogenizira kako bi bila stabilna i pumpabilna za utiskivanje u podzemlje;
- 3) sustav za utiskivanje u podzemlje – mora biti dizajniran kako bi zadovoljio potrebe i ograničenja projekta, a sastoji se od tri dijela:
 - a) spremnika za držanje kaše volumena jednog obroka prije nego se utisne u bušotinu,
 - b) visokotlačna utisna pumpa,
 - c) sustava za skupljanje i obradu podataka o utiskivanju.

Na slici 5-1. može se vidjeti jednostavan grafički prikaz površinskog sustava za pripremu kaše za utiskivanje (Abou-Sayed i dr., 2002).

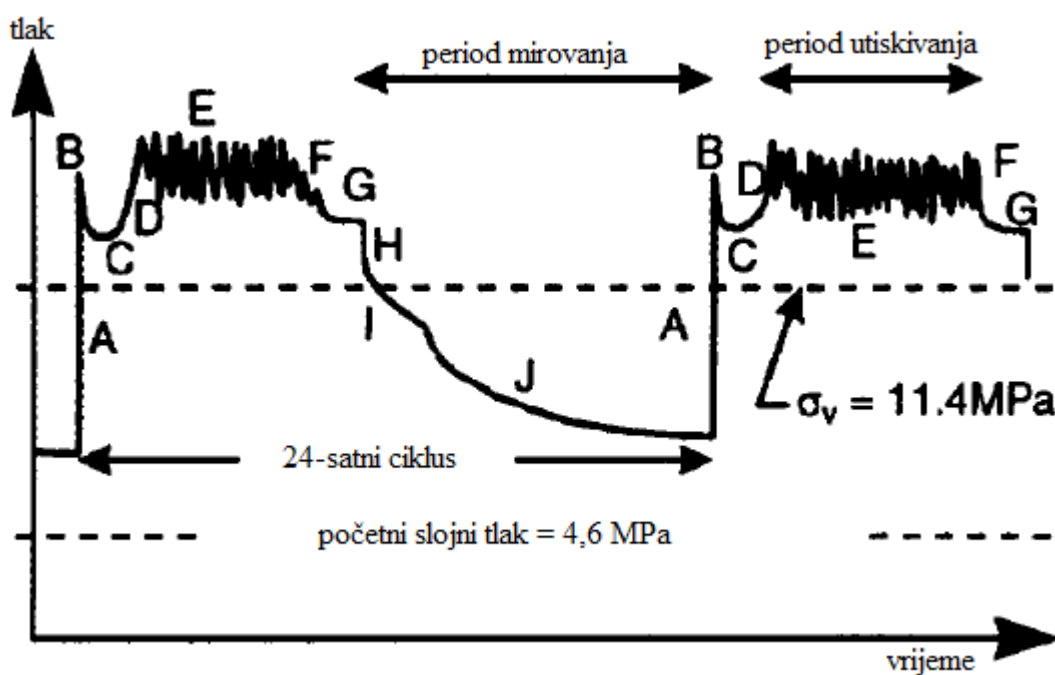


Slika 5-1. Površinski sustav za pripremu kaše za utiskivanje (Abou-Sayed i dr., 2002)

6. TLAKOVI PRILIKOM UTISKIVANJA

Pravilno određivanje tlakova koji će se primijeniti prilikom utiskivanja izuzetno je važno kako bi se osigurao integritet bušotine. Proces frakturiranja uključuje utiskivanje fluida u formaciju pri dobavi i tlaku koji prelaze sposobnost formacije da prihvati fluide u matriks stijene, te zbog toga tlak utiskivanja raste. Kada se premaši tlak frakturiranja stijene, ona puca, te dolazi do stvaranja fraktura. Stijena mora biti frakturirana kako bi mogla prihvatiti utisnutu kašu; ako to nije slučaj, kaša će se nakupljati na stjenkama otvorenog kanala bušotine, te će se čvrste čestice iz kaše taložiti na dnu bušotine (Gaurina-Međimurec, 2015).

Na slici 6-1. prikazan je tipičan dijagram promjene tlaka utiskivanja tijekom 24-satnog utiskivanja kašastog otpada (mješavina vode i proizvedenog slojnog pijeska) u nekonsolidirane pješčenjake na dubini od 500 m (Dusseault i dr., 1998). Utiskivanje je izvedeno u obrocima, te se može vidjeti kretanje tlaka tijekom perioda utiskivanja i tijekom perioda mirovanja.



Slika 6-1. Tipično kretanje tlakova prilikom utiskivanja otpadne kaše (Dusseault i dr., 1998)

Proces se sastoji od nekoliko tipičnih faza koje su slovima označene na slici (Veil i Dusseault, 2003):

- A. prvo se vrši kontrola cjelokupnog sustava, provjerava se je li dostupna dovoljna količina otpada za utiskivanje, te sustav za prikupljanje podataka kako bi se pravilno očitao statički tlak na dnu bušotine; započinje se s utiskivanjem čiste vode;
- B. prije samog utiskivanja moguće je provesti test porasta tlaka i snimanje kvalitete cementne veze ukoliko se smatra da postoji opasnost od propuštanja; očekivano povećanje tlaka na dnu prilikom početka utiskivanja u bušotini koja se koristila u najmanje nekoliko prethodnih ciklusa je na tlak 15-25% veći od tlaka pokrovnih stijena (σ_v), nakon čega obično slijedi pad tlaka na vrijednost koja je 5-15% veća od σ_v ; kada tlak utiskivanja čiste vode premaši tlak frakturiranja stijene, ona puca, te dolazi do stvaranja frakture;
- C. protok vode s površine se nastavlja sve dok se kašasti otpad u potpunosti ne ispere s tubinga i perforacija; to obično uključuje utiskivanje 10-16 m³ vode u trajanju od 8 do 10 min; to vrijeme je izuzetno važno jer osigurava da su svi parametri utiskivanja ispravni, čisti pribušotinsku zonu od čvrstih čestica, te omogućava preliminarni tok fluida kroz kanaliće (stvorene frakture) oko kanala bušotine;
- D. započinje se s utiskivanjem kaše na način da se sadržaj čvrstih čestica u struji fluida postupno povećava u razdoblju od otprilike 15 minuta; tijekom ove faze tlak na dnu bušotine postupno će rasti do vrijednosti koja je 15 do 30% veća od tlaka pokrovnih stijena; na dijagramu se mogu vidjeti kratkotrajne fluktuacije u vrijednosti tlaka od 2 do 4% koje su posljedica malih fluktuacija u gustoći kaše i promjena u načinu na koji formacija prima otpadnu kašu; ako se smatra da je tlak u bušotini previsok, sadržaj čvrstih čestica može se smanjiti ili se kapacitet utiskivanja može promijeniti; čvrste čestice bi trebalo držati u potpunom turbulentnom protoku kroz cijeli sustav kako bi se izbjeglo stvaranje gustih čepova; kapacitet utiskivanja mora biti visok, a otpadnu kašu u spremnicima treba konstantno miješati, posebno ako se utiskuje krupnozrnati pijesak;
- E. nastavlja se utiskivanje kaše u ustaljenom stanju; kapacitet utiskivanja obično se održava konstantnim za čitavo vrijeme utiskivanja kaše, a to se postiže održavanjem pumpe na istom broju hodova u minuti; kratkotrajne fluktuacije u vrijednosti tlaka od 2 do 4% i dalje se nastavljaju;

- F. utiskivanje kaše se nastavlja određeno vrijeme, nakon čega je sustav potrebno pravilno zatvoriti kako bi se osiguralo da površinska oprema i bušotina ne sadrže čvrste čestice u suspenziji; sadržaj čvrstih čestica u suspenziji koju pumpa tlači se postupno smanjuje, a za njihovo smanjenje na zanemarivu količinu potrebno je otprilike 15 do 20 minuta;
- G. nastavlja se s utiskivanjem čiste vode kako bi se temeljito isprala bušotina, a za to se koristi volumen vode u količini od 2 do 4 volumena bušotine, nakon čega se bušotina zatvara;
- H. jednom kada je bušotina zatvorena, tlak na dnu i ušću prate se kontinuirano; sustav za prikupljanje podataka obično se postavlja na način da se tlak bilježi otprilike svakih 5 sekundi neposredno prije zatvaranja bušotine zato što je početni pad tlaka prilično brz zbog zatvaranja frakture; tlak na dnu bušotine obično se smanji ispod vrijednosti tlaka pokrovnih stijena u roku od nekoliko minuta;
- I. prvi režim pada tlaka završava se promjenom nagiba krivulje, dakle brzina opadanja tlaka se smanjuje; oblik krivulje obično odražava linearni tok na nekoj udaljenosti od frakture;
- J. nastavlja se drugi režim pada tlaka u kojem se brzina opadanja tlaka dodatno smanjila, te se oblik krivulje mijenja u radijalni protok kako se tlak postupno gubi prema područjima udaljenijim od bušotine.

Brzina smanjenja tlaka nakon utiskivanja ovisi o propusnosti struktura uokolo kanala bušotine. Ako postupak utiskivanja uključuje čisti pijesak i vodu, bez gline ili ugljikovodika, tlak na dnu bušotine će nastaviti naglo padati. Ako je utiskivanje uključivalo fino zrnate mineralne tvari, kao što je otpad od bušenja ili talog s dna spremnika, tada će propusnost ležišta oko kanala bušotine biti smanjena, te će tada tlak sporije opadati (Veil i Dusseault, 2003).

U periodu u kojem je bušotina zatvorena stvorene frakture se zatvaraju kako tekuća faza otpada otječe u formaciju, dok čvrste čestice ostaju zarobljene unutar frakture kako se ona zatvara. Zbog slabe propusnosti, frakturama treba duže da se zatvore u formacijama šejla nego u pješčenjacima (Abou-Sayed i Guo, 2001).

U većini projekata, ciklus utiskivanja koji je ovdje opisan ponavlja se svaki dan, sve dok se ne utisne sav otpad koji je predviđen za utiskivanje. Također, važno je praćenje

raznih faktora kako bi se osiguralo da propusnost formacije nije narušena, te da je osigurana ekološka sigurnost procesa.

Izuzetno je važno odrediti i očekivani tlak na ušću bušotine koji se može procijeniti na temelju jednadžbe (6-1) (Abou-Sayed i Guo, 2001):

$$p_u = p_{net} + p_{perf} + p_{closure} + p_{fric} + p_{nozzle} + \Delta p_{batch} - p_H \quad (6-1)$$

gdje je: p_u – tlak na ušću bušotine tijekom utiskivanja (Pa),

p_{net} – tlak unutar frakture (Pa),

p_{perf} – pad tlaka uslijed trenja u perforacijama (Pa),

$p_{closure}$ – početni tlak zatvaranja frakture (Pa),

p_{fric} – pad tlaka uslijed trenja zbog protjecanja kroz prstenasti prostor ili tubing (Pa),

p_{nozzle} – pad tlaka kroz mlaznice, zglobove i iskrivljenja (Pa),

Δp_{batch} – porast tlaka između prvog i zadnjeg obroka utiskivanja (Pa),

p_H – statički tlak stupca fluida na razini utisne zone (Pa).

Tlak unutar frakture (p_{net}), tj. tlak potreban da bi se fraktura širila nakon što je stvorena ovisi o utisnoj zoni, svojstvima utisnute otpadne kaše, kapacitetu utiskivanja (dobavi), te o geometriji stvorene frakture.

Pad tlaka uslijed trenja u perforacijama (p_{perf}) predstavlja pad tlaka između bušotine i frakture prilikom utiskivanja kroz tubing, dok ne postoji kod anularnog utiskivanja budući da u tom slučaju nema perforacija. Ovisi o geometriji perforacija, reološkim svojstvima kaše i dobavi.

Početni tlak zatvaranja frakture ($p_{closure}$) je minimalni tlak koji je potreban kako bi fraktura ostala otvorena. Može se izračunati kao umnožak gradijenta tlaka frakturiranja i stvarne vertikalne dubine.

Pad tlaka uslijed trenja zbog protjecanja kroz prstenasti prostor ili tubing (p_{fric}) ovisi o reološkim svojstvima kaše, dobavi, površini poprečnog presjeka i duljini protjecanja. U

slučaju male površine poprečnog presjeka, visoke koncentracije čvrstih čestica u kaši, te velike dobave, ovaj pad tlaka može biti značajan.

Pad tlaka kroz mlaznice, zglobove i iskrivljenja (p_{nozzle}) je obično vrlo mali, te se najčešće uzima vrijednost od oko 7 bar (100 psi).

Porast tlaka između prvog i zadnjeg obroka utiskivanja (Δp_{batch}) javlja se kao posljedica utiskivanja sve veće količine čvrstih čestica zbog čega dolazi do porasta tlaka zatvaranja frakture. Taj porast tlaka može se procijeniti na temelju geometrije frakture stvorene tijekom jednog obroka utiskivanja, mehaničkih i geoloških svojstava formacije, te ukupnog volumena čvrstih čestica koji se planira utisnuti. Osim prilikom određivanja tlaka na ušću bušotine, porast tlaka zatvaranja frakture mora se odrediti i prilikom odabira površinske opreme za utiskivanje, te za dizajn zaštitnih cijevi. Također, utisni kapacitet bušotine može se odrediti na temelju porasta tlaka zatvaranja frakture.

Statički tlak stupca fluida na razini utisne zone (p_H) predstavlja razliku hidrostatskog tlaka između utisne zone i ušća bušotine.

Ovdje je potrebno naglasiti važnost simulacija fraktura koje su nužne kako bi se osiguralo sigurno zbrinjavanje utisnutog otpada, te kako bi se uspostavili operativni parametri kao što su kapacitet utiskivanja (dobava), volumen obroka, vrijeme zatvaranja, te odredili zahtjevi za površinskom opremom.

U tablicama u idućem poglavlju biti će detaljnije obrađeni podaci o tlakovima utiskivanja, dobavi, svojstvima utisnute otpadne kaše i sl.

7. ANALIZA PODATAKA O DOSADAŠNJIM UTISKIVANJIMA

U ovom poglavlju biti će prikazane 3 tablice (Tablice 7-1., 7-2. i 7-3.) u kojima su na sistematizirani način navedeni podaci o utiskivanju, a koji su dobiveni na temelju analize 19 dostupnih članaka napisanih u razdoblju od 1989. do 2019. godine. U tablici 7-1. prikazani su podaci o kompaniji koja izvodi utiskivanje, lokaciji na kojoj se utiskivanje izvodi i o samoj utisnoj formaciji.

Tablica 7-1. Podaci o kompaniji koja izvodi utiskivanje, lokaciji i utisnoj formaciji

Izvor	Kompanija koja izvodi utiskivanje	Lokacija	Utisna formacija						
			Tip stijene	Dubina (m)	Propusnost (μm^2)	Poroznost (-)	P_f (kPa/m)	Dubina perforacija/ anularnog utiskivanja (m)	Tip i dubina pokrovnih stijena
Mahrous i dr., 2019	Halliburton	Sakhalin, Rusija	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Mohamed i dr., 2018	Advantek Waste Management Services	N/A	pješčenjak	1670 - 1710	0,35 - 3,5	0,25	10,1	N/A	N/A
				1380 - 1460	0,3 - 0,5	0,26	10,1		
				1900 - 1950	0,05 - 0,1	0,17	9,1		

Tablica 7-1. Podaci o kompaniji koja izvodi utiskivanje, lokaciji i utisnoj formaciji (nastavak)

Izvor	Kompanija koja izvodi utiskivanje	Lokacija	Utisna formacija						
			Tip stijene	Dubina (m)	Propusnost (μm^2)	Poroznost (-)	P_f (kPa/m)	Dubina perforacija/anularnog utiskivanja (m)	Tip i dubina pokrovnih stijena
Guo i dr., 2017	Advantek Waste Management Services	Texas, SAD	pješčenjak proslojen šejlom	1950 - 2030	0,0001 – 0,105	0,185 – 0,259	17,2 – 18,1	N/A	debeli sloj šejla iznad i ispod utisne zone
Romero i dr., 2016	Halliburton/Petroamazonas	polje Apaika-Nenke, Ekvador	N/A	N/A	N/A	N/A	12,9	N/A	N/A
Mehtar i dr., 2016	M-I Swaco	Abu Dhabi, UAE	vapnenac	1315 - 1390	N/A	N/A	17,7 - 19	N/A	dolomit i vapnenac
Xia i dr., 2014	Terralog Technologies Inc., Saudi Aramco	Manifa, Saudijska Arabija	pješčenjak	1827 - 1994 (MD)	2,24	0,24	N/A	1981 - 1990	izmjena šejla i pješčenjaka

Tablica 7-1. Podaci o kompaniji koja izvodi utiskivanje, lokaciji i utisnoj formaciji (nastavak)

Izvor	Kompanija koja izvodi utiskivanje	Lokacija	Utisna formacija						
			Tip stijene	Dubina (m)	Propusnost (μm^2)	Poroznost (-)	P_f (kPa/m)	Dubina perforacija/ anularnog utiskivanja (m)	Tip i dubina pokrovnih stijena
Kunze i dr., 2012	ExxonMobil	Colorado, SAD	sloj pijeska u kojem je dolazilo do gubitaka isplake tijekom bušenja	1684 – 1752 (MD)	N/A	N/A	N/A	1710 - 1725	N/A
Fetsenets i dr., 2009	Gazpromneft-Khantos/ M-I Swaco	zapadni Sibir, Rusija	N/A	$\approx$ 1300 i 1700	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Gumarov i dr., 2009	M-I Swaco	Kaspijsko more	muljnjak	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ovalle i dr., 2008	M-I Swaco	Južna Amerika	pješčenjak	1401	N/A	N/A	N/A	1401 - 1408	vapnenac
Arfie i dr., 2005	Terralog Technologies Inc.	Duri, Indonezija	nekonsolidirani pješčenjak	383	N/A	N/A	N/A	380 – 389	sloj šejla iznad utisne zone
				418				419 - 430	

Tablica 7-1. Podaci o kompaniji koja izvodi utiskivanje, lokaciji i utisnoj formaciji (nastavak)

Izvor	Kompanija koja izvodi utiskivanje	Lokacija	Utisna formacija						
			Tip stijene	Dubina (m)	Propusnost (μm^2)	Poroznost (-)	P_f (kPa/m)	Dubina perforacija/ anularnog utiskivanja (m)	Tip i dubina pokrovnih stijena
Reed i dr., 2001	Chevron	Louisiana, SAD	pješčenjaka	1341 - 1524	0,5 – 2,0	0,23	16,5 – 18,1	1512 – 1524	od 990 do 1615 m dubine izmjenjujući slojevi pješčenjaka i šejla debljine od 3 do 45 m
							17,4 – 19,5	1378 - 1390	
Sipple-Srinivasan i dr., 1998	Terralog Technologies Inc.	West Coyote, Kalifornija	iscrpljeni naftonosni pješčenjaka	1250	0,5	0,3	5,2	1237 – 1264	šejl na dubini od 969 do 1189 m
Sipple-Srinivasan i dr., 1997	Terralog Technologies Inc.	Saskatchewan, Kanada	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tablica 7-1. Podaci o kompaniji koja izvodi utiskivanje, lokaciji i utisnoj formaciji (nastavak)

Izvor	Kompanija koja izvodi utiskivanje	Lokacija	Utisna formacija						
			Tip stijene	Dubina (m)	Propusnost (μm^2)	Poroznost (-)	P_f (kPa/m)	Dubina perforacija/anularnog utiskivanja (m)	Tip i dubina pokrovnih stijena
Dusseault i dr., 1997	Terralog Technologies Inc.	Alberta, Kanada	kanalni pješčenjak	732 - 752	0,5	0,27	17,5 – 19,5	745,5 – 748,5	šejl vrlo male propusnosti na dubini od 454 do 717 m
Moschovidis i dr., 1994	Amoco	Valhall, Sjeverno more	silit (šejl)	2395	N/A	N/A	$\approx 13,6$	N/A	šejl koji sprječava prodor fluida na dubinu manju od 2000 m
				2467					
Minton i Secoy, 1993	BP Exploration Operating Co.	platforma Clyde, Sjeverno more	šejl	760 - 1720	N/A	N/A	N/A	760	N/A

Tablica 7-1. Podaci o kompaniji koja izvodi utiskivanje, lokaciji i utisnoj formaciji (nastavak)

Izvor	Kompanija koja izvodi utiskivanje	Lokacija	Utisna formacija						
			Tip stijene	Dubina (m)	Propusnost (μm^2)	Poroznost (-)	P_f (kPa/m)	Dubina perforacija/anularnog utiskivanja (m)	Tip i dubina pokrovnih stijena
Willson i dr., 1993	BP Norway	platforma Gyda, Sjeverno more	muljnjak (šejl)	900	N/A	N/A	10,2	900	pješčenjak s proslojcima šejla na dubini 250 - 400 m
Abou-Sayed i dr., 1989	ARCO Oil & Gas Inc.	Prudhoe Bay, Aljaska	pješčenjak i šljunak	≈ 650	1 - 2	N/A	18,5 – 19,2	N/A	≈ 30 m šejla i nakon toga permafrost do površine
N/A – podaci nisu dostupni (<i>engl. Non available</i>)									

Na temelju podataka iz tablice 7-1. koja prikazuje svojstva utisne formacije može se zaključiti da je najčešći tip stijene u koje se otpad utiskuje pješčenjak. Sve dubine na kojima se odvijalo utiskivanje bile su dosta manje od 3 000 m. Ta dubina je postavljena kao gornja granica prilikom odabira utisne formacije, što se može vidjeti u 4. poglavlju ovog rada. Propusnost i poroznost su isto unutar vrijednosti koje se preporučuju prilikom odabira utisne formacije, a tip pokrovnih stijena se također može smatrati povoljnim budući da je u većini slučajeva

pokrovna stijena šejl, koji predstavlja barijeru daljnjem prodoru utisnutih fluida prema površini. U tablici 7-2. prikazani su podaci o prethodnoj obradi i svojstvima kašastog otpada.

Tablica 7-2. Podaci o prethodnoj obradi i svojstvima kašastog otpada

Izvor	Obrada koja je prethodila utiskivanju	Svojstva utisnutog kašastog otpada			
		Vrsta otpada	Čvrste čestice (% vol.)	Utisnuti volumen (m ³)	Gustoća kaše (kg/m ³)
Mahrous i dr., 2019	N/A	krhotine stijena i otpadna isplaka	10 – 20	95867	1000 – 1200
Mohamed i dr., 2018	N/A	otpad iz procesa proizvodnje nafte i plina	10 - 23	N/A	N/A
		organski komunalni otpad	10 - 12		
		otpad iz procesa proizvodnje nafte i plina	5 - 12		
Guo i dr., 2017	N/A	N/A	do 20% *	N/A	N/A
Romero i dr., 2016	miješanje otpada s proizvedenom slojnom vodom i mljevenje krhotina na veličinu <175µm	krhotine stijena, otpadna isplaka, zagađena voda iz procesa bušenja	do 20%	33231	1008 – 1272
Mehtar i dr., 2016	miješanje krhotina s tekućim otpadom i morskom vodom, te njihovo mljevenje na veličinu <300µm	krhotine stijena, otpadna isplaka, „slop“ i morska voda	15 – 20	80000	1200 – 1400

Tablica 7-2. Podaci o prethodnoj obradi i svojstvima kašastog otpada (nastavak)

Izvor	Obrada koja je prethodila utiskivanju	Svojstva utisnutog kašastog otpada			
		Vrsta otpada	Čvrste čestice (% vol.)	Utisnuti volumen (m ³)	Gustoća kaše (kg/m ³)
Xia i dr., 2014	otpad se miješa s morskom vodom	krhotine stijena, isplaka na bazi vode i ulja, voda zagađena pri čišćenju postrojenja	10 – 25	168436	1200 – 1250
Kunze i dr., 2012	miješanje krhotina s proizvedenom slojnom vodom, te uklanjanje krhotina koje se ne mogu dispergirati (zbog LCM korištenog tijekom bušenja)	krhotine stijena, isplaka na bazi vode, proizvedena slojna voda	21	5928	1320
Fetsenets i dr., 2009	mljevenje krhotina i njihova selekcija, te miješanje s vodom	otpad od bušenja – krhotine, otpadna isplaka i zagađena voda	N/A	79182	N/A
Gumarov i dr., 2009	N/A	otpad od bušenja (krhotine i iskorištena isplaka)	20	160000	N/A
Ovalle i dr., 2008	N/A	otpad od bušenja iz stare isplačne jame	N/A	11766	N/A
Arfie i dr., 2005	miješanje otpada s proizvedenom slojnom vodom	zauljeni viskozni fluidi (nafta, pijesak i vodene emulzije)	10 – 33	1033000	N/A
Reed i dr., 2001	miješanje otpada s proizvedenom slojnom vodom	krhotine, isplaka, proizvedeni pijesak i slojna voda, sirova nafta; pri čemu je sav navedeni otpad sadržavao male količine NORM-a	20 – 70	469002	N/A

Tablica 7-2. Podaci o prethodnoj obradi i svojstvima kašastog otpada (nastavak)

Izvor	Obrada koja je prethodila utiskivanju	Svojstva utisnutog kašastog otpada			
		Vrsta otpada	Čvrste čestice (% vol.)	Utisnuti volumen (m ³)	Gustoća kaše (kg/m ³)
Sipple-Srinivasan i dr., 1998	mljevenje zagađenog tla i miješanje s vodom u spremnicima	zagađeno tlo s visokim udjelom gline, te iskorištena isplaka	10 – 35	2290	N/A
Sipple-Srinivasan i dr., 1997	miješanje otpada s proizvedenom slojnom vodom	zauljeni talog s dna spremnika i proizvedeni pijesak	N/A	45000	1150 – 1210
Dusseault i dr., 1997	„slop“ je razrijeđen dodavanjem približno dvostruke količine proizvedene slojne vode	„slop“	< 3	3911	1020 - 1080
Moschovidis i dr., 1994	miješanje krhotina s morskom vodom, te usitnjavanje na veličinu manju od 40 mesha	fluid (uglavnom voda) korišten za ispiranje zauljenih čestica koje su zatim zbrinute drugim metodama	4	> 19080	≈ 1200
		krhotine pomiješane s morskom vodom, te 2% nafta	22	≈ 54060	

Tablica 7-2. Podaci o prethodnoj obradi i svojstvima kašastog otpada (nastavak)

Izvor	Obrada koja je prethodila utiskivanju	Svojstva utisnutog kašastog otpada			
		Vrsta otpada	Čvrste čestice (% vol.)	Utisnuti volumen (m ³)	Gustoća kaše (kg/m ³)
Minton i Secoy, 1993	mljevenje zauljenih krhotina na veličinu manju od 300 µm i miješanje s morskom vodom	zauljene krhotine stijena	N/A	N/A	N/A
Willson i dr., 1993	krhotine se melju i miješaju s morskom vodom	isplaka na bazi ulja, zauljene krhotine	≈ 15	22187	1170 – 1430
Abou-Sayed i dr., 1989	N/A	zagađena sirova nafta, kiseline, neiskorišteni pijesak za frakturiranje, iskorištena isplaka, talozi s dna spremnika, itd.	N/A	318000	N/A
* očitano s dijagrama					
N/A – podaci nisu dostupni (<i>engl. Non available</i>)					

Na temelju tablice 7-2. može se zaključiti da se otpad priprema za utiskivanje na način da se miješa s vodom (najčešće s proizvedenom slojnom ili morskom), te da se čestice po potrebi melju na veličinu manju od 300 µm. Što se tiče vrste otpada koji se utiskuje, on potječe iz svih sektora naftne djelatnosti, no najčešće se utiskuje otpad iz procesa bušenja, tj. otpadna isplaka i krhotine stijena. Volumni postotak čvrstih čestica u utisnutoj otpadnoj kaši iznosi od 3 do 70% (najčešće oko 20%), utisnuti volumen značajno varira od lokacije do lokacije ovisno o dostupnosti otpada, dok je prosječna gustoća utisnute kaše oko 1190 kg/m³. U tablici 7-3. prikazani su podaci o parametrima utiskivanja kašastog otpada.

Tablica 7-3. Podaci o parametrima utiskivanja kašastog otpada

Izvor	Trajanje utiskivanja	Tip utiskivanja	Kontinuirano ili periodički	P _u (MPa)	Protok (m ³ /d)	P _d (MPa)
Mahrous i dr., 2019	14 mjeseci	kroz tubing	N/A	maks. 34,5*	N/A	maks. 62,1*
Mohamed i dr., 2018	1.2012. – 12.2015.	kroz tubing	u obrocima od 16 do 480 m ³	6,9	900 - 1150	N/A
	12.2015. – 6.2017.		u obrocima od 1270 do 1590 m ³	19	1800 - 2300	
	1.2012. – 3.2018.		u obrocima od 795 do 1590 m ³	9,5	2300 - 2750	
Guo i dr., 2017	10.2.2016. – 25.1.2017.	kroz tubing	obroci u trajanju od 12 sati uz ispiranje vodom prije i nakon utiskivanja	10,3 – 16,7*	maks. 2750*	N/A
Romero i dr., 2016	6.2014. – 12-2015.	kroz tubing	ciklusi utiskivanja u trajanju od 12 sati uz ispiranje vodom prije i nakon utiskivanja	12,4 – 13,8	916	N/A
Mehtar i dr., 2016	N/A	kroz tubing	obroci od 48 m ³ uz mirovanje između obroka ne dulje od 4 sata	10,7 – 11,2	1150	maks. 26,2*
Xia i dr., 2014	2.2012. – 4.2014.	kroz tubing	višestruki obroci nakon kojih je slijedilo mirovanje od 3 do 4 sata, uz ispiranje morskom vodom prije i nakon utiskivanja	17,2*	1603	35,9*
Kunze i dr., 2012	13.10.2010. – 31.3.2011.	kroz tubing	utiskivanje u obrocima u trajanju od 18 sati, uz 800 L vrlo viskoznog obroka prije kaše i 16 m ³ vode nakon kaše	3,2 – 5,6	1227 – 1479	N/A
Fetsenets i dr., 2009	10.2008. – 7.2009.	kroz tubing	N/A	12	318	N/A

Tablica 7-3. Podaci o parametrima utiskivanja kašastog otpada (nastavak)

Izvor	Trajanje utiskivanja	Tip utiskivanja	Kontinuirano ili periodički	P _u (MPa)	Protok (m ³ /d)	P _d (MPa)
Gumarov i dr., 2009	1.2008. – 8.2008.	kroz tubing	utiskivanje u obrocima, uz utiskivanje vode u količini 1,5×volumen tubinga nakon kaše kako bi se spriječilo taloženje krhotina	22,8 – 33,1*	do 1150*	46,9 – 53,4*
	11.2007. – 1.2008.			15,2 – 26,9*	N/A	40,3 – 46,9*
	6.2008. – 11.2008.			15,2 - 31,7*	do 1360*	39,3 – 50,3*
Ovalle i dr., 2008	N/A	kroz tubing	N/A	max. 12,1	N/A	N/A
Arfie i dr., 2005	12.2002. – 3.2005.	kroz tubing	9 – 10 sati utiskivanja dnevno nakon kojeg je uslijedilo 14 sati mirovanja	4,5	3600	5,5
				5,5		6,6
Reed i dr., 2001	11.1997. – 5.1998.	kroz tubing	utiskivanje u obrocima od 9 do 11 sati nakon čega bi uslijedilo mirovanje u trajanju od 13 do 15 sati	24,7 – 27,2	1832 - 3663	N/A
	6.1998. – 3.2000.			23,1 – 25,5		

Tablica 7-3. Podaci o parametrima utiskivanja kašastog otpada (nastavak)

Izvor	Trajanje utiskivanja	Tip utiskivanja	Kontinuirano ili periodički	P _u (MPa)	Protok (m ³ /d)	P _d (MPa)
Sipple-Srinivasan i dr., 1998	31.8. – 21.9.1997.	kroz tubing	6 – 8 sati utiskivanja kaše, 12 sati mirovanja, te 2 sata ispiranja čistom vodom prije i nakon utiskivanja kaše	N/A	2290 - 2748	26,2
Sipple-Srinivasan i dr., 1997	30.12.1996. – 14.4.1997.	kroz tubing	N/A	N/A	1584 - 2160	N/A
Dusseault i dr., 1997	22.4. – 15.5.1996.	kroz tubing	12 sati utiskivanja kaše, 2 sata ispiranja čistom vodom i nakon toga mirovanje od 10 sati (uz povremeno duže mirovanje)	8	57,6	13,1 – 14,6
	23.5. – 11.9.1996.					
Moschovidis i dr., 1994	1.1.1990. – 13.1.1992.	kroz tubing	više od 100 obroka utiskivanja s volumenima od 160 do 480 m ³	maks. 31	N/A	N/A
	1.1992. – 12.1993.			maks. 28,3		
Minton i Secoy, 1993	N/A	anularno	3 obroka (probno utiskivanje)	5,2	570 - 900	N/A

Tablica 7-3. Podaci o parametrima utiskivanja kašastog otpada (nastavak)

Izvor	Trajanje utiskivanja	Tip utiskivanja	Kontinuirano ili periodički	P _u (MPa)	Protok (m ³ /d)	P _d (MPa)
Willson i dr., 1993	30.7.1991. – 5.11.1992.	anularno	Utiskivanje u obrocima od 32 do 64 m ³	6,2 – 11	870 – 2518,6	N/A
Abou-Sayed i dr., 1989	N/A	kroz tubing	periodičko utiskivanje, ovisno o brzini stvaranja otpada	maks. 9,7	916 - 1832	N/A
* očitano s dijagrama						
N/A - podaci nisu dostupni (<i>engl. Non available</i>)						

Analizirajući tablicu 7-3. može se zaključiti da se velika većina utiskivanja odvija kroz tubing (skoro 90%), dok se u samo 2 članka obrađuje anularno utiskivanje, u oba slučaja na Sjevernom moru. U svim obrađenim člancima utiskivanje se odvija periodički, tj. u obrocima određenog volumena (ovisno o ukupnoj količini otpada koju je potrebno utisnuti) u trajanju od nekoliko sati, nakon čega bi uslijedilo zatvaranje, tj. mirovanje bušotine, te ispiranje vodom prije i nakon utiskivanja kaše (kao što je objašnjeno u 6. poglavlju). Tlakovi utiskivanja kreću se u širokom rasponu od 3,2 do 34,5 MPa, ovisno o svojstvima utisnih formacija, tj. tlakovima frakturiranja koje je potrebno nadmašiti.

Na temelju analize podataka koji su prikazani u prethodne tri tablice može se vidjeti da nažalost dosta podataka nedostaje iz razloga što nisu navedeni u obrađenim člancima. Propusnost i poroznost utisne formacije su parametri koji najčešće nedostaju. Od kompanija koje se navode da izvođe utiskivanja, valja spomenuti kanadsku kompaniju Terralog Technologies Inc., servisnu kompaniju čiji je primarni cilj zaštita okoliša i održivi razvoj, a članci koje su pisali njihovi zaposlenici nude najviše podataka o utisnim formacijama, ali i svojstvima kašastog otpada i parametrima utiskivanja.

8. PRAĆENJE PROCESA UTISKIVANJA (MONITORING)

Praćenje procesa utiskivanja otpada predstavlja sastavni dio postupka osiguranja kvalitete cjelokupnog procesa. Opseg monitoringa koji zahtijevaju različita regulatorna tijela znatno varira. Međutim, neovisno o njima, u interesu svakog operatora je da ima dobar program monitoringa kako bi osigurao kvalitetu kontrole svojstava kaše i strogo pridržavanje operativnih zahtjeva, a sve s ciljem ranog otkrivanja neželjenih promjena u procesu utiskivanja otpadne kaše. U prošlosti se jednostavno ručno praćenje utisnutih volumena i tlakova utiskivanja nekoliko puta dnevno smatralo adekvatnim praćenjem brojnih procesa utiskivanja, ali u posljednje vrijeme došlo je do značajnog razvoja u pristupu, opsegu i složenosti monitoringa, što je dovelo do toga da se danas monitoring smatra ključnim pri upravljanju rizicima u procesima utiskivanja.

Glavni ciljevi praćenja i provjere procesa utiskivanja su (Abou-Sayed i dr., 2002):

- osigurati postizanje željenih radnih parametara i postupaka tijekom procesa;
- odrediti opseg širenja utisnutog otpada unutar formacije;
- osmisliti postupke koji će omogućiti rane znakove upozorenja u slučaju neželjenih događaja u procesu;
- povećati osiguranje kvalitete i udovoljiti regulatornim zahtjevima.

Također, može se reći da monitoring uključuje tri osnovna postupka (Dusseault i dr., 1997):

1. aktivno praćenje parametara utiskivanja kako bi se dokumentiralo i kontroliralo proces tijekom utiskivanja;
2. praćenje i testiranje reakcije ležišta kako bi se odredilo ležišne parametre i potencijalno pogoršanje stanja u ležištu;
3. daljinsko praćenje reakcije ležišta preko susjednih bušotina, deformacije površine i ostalih metoda kao što je mikro-seizmički monitoring.

Monitoring se može smatrati alatom za ublažavanje koji je sastavni dio procesa utiskivanja, te uključuje kontinuirano praćenje podataka, analizu tlakova frakturiranja i modeliranje procesa. Glavni razlog zbog kojeg je došlo do razvoja monitoringa bila je potreba za izbjegavanjem kvarova i operativnih nedostataka koji bi mogli negativno utjecati na okoliš. Ta potreba je dodatno povećana razvojem sve strožih ekoloških zahtjeva i osjetljivošću područja na kojima se izvode utiskivanja.

Mnoge vrste uređaja za praćenje utiskivanja mogu omogućiti korisne povratne informacije operatorima o tome što se događa u podzemlju. Minimum koji operatori moraju osigurati je kontinuirano praćenje tlaka utiskivanja i kapaciteta utiskivanja (protok, dobava). Osim toga, potrebno je često pratiti sastav i svojstva (npr. gustoća, reološka svojstva) kaše koja se utiskuje.

Reološka svojstva kaše treba pratiti kontinuirano, barem jednom u smjeni za vrijeme utiskivanja. Viskoznost, raspodjela veličine čestica i sadržaj čvrstih tvari može se izravno mjeriti u intervalima putem uzimanja uzoraka kaše.

Volumen koji se utiskuje najlakše je pratiti pomoću skale za mjerenje razine fluida u spremnicima za miješanje i skladištenje.

Brzina utiskivanja, tj. protok može se odrediti množenjem broja hodova pumpe u minuti s volumenom koji pumpa zahvaća u jednom hodu.

Ovisno o volumenu i sastavu kaše koja se utiskuje, može postojati potreba za stalnim praćenjem erozije i korozije bušotinske glave i tubinga.

Stupanj praćenja koji se zahtjeva na određenom projektu ovisi o: volumenu otpada koji je potrebno utisnuti, geološkim svojstvima utisne zone, sastavu i klasifikaciji otpada (tj. je li otpad opasan ili neopasan), konstrukciji i uvjetima u bušotini (bušotina s novim cementnim kamenom ili stara bušotina), ciljevima monitoringa i regulatornim zahtjevima.

Praćenje tlaka na dnu bušotine

Tlak na dnu bušotine predstavlja najvažniji parametar koji je potrebno pratiti tijekom procesa utiskivanja otpada jer daje uvid u to što se događa u podzemlju u stvarnom vremenu. Bilo kakve promjene tlaka koje se značajno razlikuju od predviđenih sugeriraju da se formacija ne ponaša na očekivani način. Senzori tlaka na dnu bušotine su najvažniji uređaji koji se koriste u monitoringu jer prate reakciju tlaka u blizini bušotine i u formaciji tijekom samog utiskivanja, nakon završetka ciklusa (tj. kad je bušotina zatvorena), te za vrijeme cijelog trajanja procesa. Podaci o tlaku na dnu bušotine tijekom perioda u kojemu je bušotina zatvorena daju bitne informacije o sposobnosti formacije da raspršuje tlak, te o promjenama naprezanja uzrokovanih utiskivanjem. Operatori bi trebali imati kontinuirani prikaz tlaka na dnu bušotine na ekranu kako bi izbjegli kratkotrajne komplikacije, kao što su pretjerani porast tlaka i nagli skokovi tlaka (Dusseault i dr., 1998).

Senzori bi trebali očitavati tlak barem svakih 5 minuta tijekom dužih perioda u kojima se utiskivanje ne odvija, te svake sekunde tijekom perioda utiskivanja u kojem dolazi do nagle promjene tlaka. Poznavanje tlaka na dnu omogućuje analizu pada tlaka ili primanja naslaga na kraju svakog ciklusa utiskivanja, te daje dobre informacije o veličini i obliku fraktura i području odlaganja otpada (Veil i Dusseault, 2003).

Osim tlaka na dnu koji je obavezno pratiti, program monitoringa može uključivati i praćenje sljedećih veličina (Abou-Sayed i dr., 2002):

- tlak na ušću bušotine u trenutku zatvaranja,
- odnos tlaka na ušću bušotine i kapaciteta utiskivanja (dobave),
- konačni tlak zatvaranja na ušću,
- pad tlaka tijekom perioda u kojima je bušotina zatvorena,
- tlak u prstenastom prostoru bušotine.

Dobrom praksom smatra se i praćenje tlaka na ušću bušotine i na ušću prstenastog prostora u susjednim bušotinama, kako bi se rano uočio eventualni porast tlaka u formaciji uzrokovan utiskivanjem.

8.1. METODE PRAĆENJA ODLAGANJA OTPADA

Budući da su test mehaničke cjelovitosti, CBL zvučna karotaža i snimanje stanja kolone već ranije spomenuti, ovdje će biti objašnjene neke druge metode monitoringa koje su najčešće primjenjivane u praksi. Nakon jednog ili više ciklusa utiskivanja, provođenjem nekoliko tipova karotažnih mjerenja može se odrediti prostiranje fraktura.

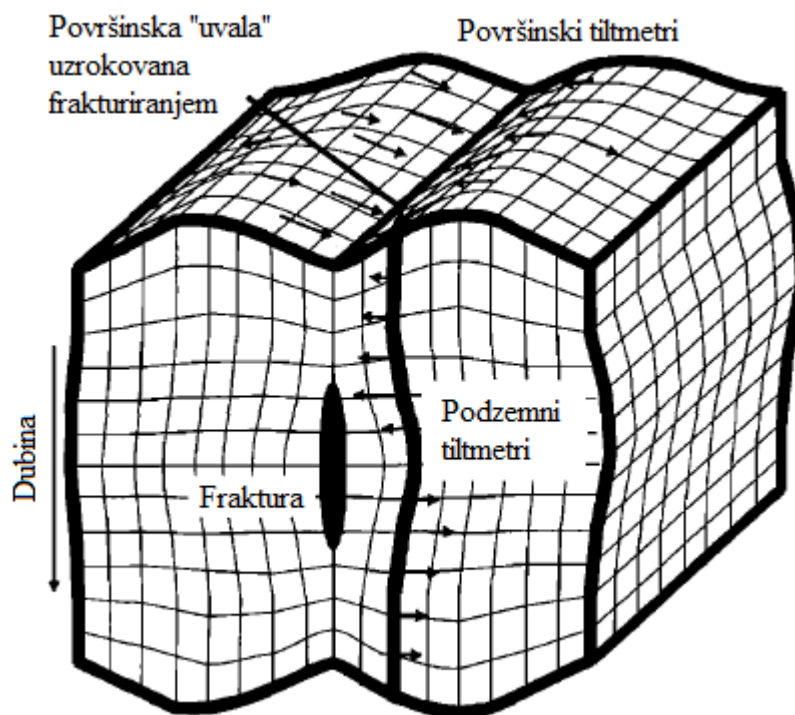
Također postoji nekoliko vrsta uređaja za praćenje koji se mogu postaviti u bušotine ili na druge lokacije u okruženju utisne bušotine. Ti uređaji omogućuju brojne dodatne informacije o načinu i smjeru u kojem se frakture šire.

8.1.1. Tiltmetri

Mjerači deformacije površine (engl. *tiltmeters*) su geofizički inklinometri koji omogućuju veliku preciznost prilikom mjerenja, te daju očitavanja s preciznošću od približno

5×10^{-9} radijana za kut nagiba i daju smjer nagiba (tj. vektor nagiba). Očitavanja su elektronička i trenutna, te se može prikupiti onoliko podataka koliko analize zahtijevaju. Uređaji su povezani s automatskim sustavom za prikupljanje podataka na svakoj lokaciji; sustav za pohranu podataka periodički preuzima podatke kako bi omogućio detaljnu analizu. Matematička analiza podataka koje daju tiltmetri omogućuje rekonstrukciju lokacije i orijentacije (nagib i azimut) zone frakturiranja unutar ciljane formacije.

Postoje površinski i podzemni tiltmetri, a shematski prikaz njihovog smještaja i djelovanja frakturiranja na podzemne strukture i na površinu može se vidjeti na slici 8-1.



Slika 8-1. Shematski prikaz djelovanja frakture i razmještaj tiltmetara na površini i u susjednoj bušotini (Wright i dr., 1999)

Površinski tiltmetri koriste se od 1970-ih godina, te se smatraju prikladnijima kod dugoročnog monitoringa. Daju dobre informacije o azimutu i nagibu frakture, ali ne omogućuju precizne podatke o visini i duljini frakture. Minimalno 12 površinskih tiltmetara je potrebno koristiti kod utiskivanja otpada pri tlaku frakturiranja, ali preporuča se upotreba 16 tiltmetara za što preciznije podatke i rano otkrivanje eventualnog širenja frakture prema površini. Također, površinski tiltmetri obično rade na solarne baterije, te zahtijevaju minimalno održavanje, što je još jedna njihova prednost (Abou-Sayed i dr., 2002).

Podzemni tiltmetri mogu precizno odrediti visinu i duljinu fraktura, ali su manje precizni prilikom određivanja azimuta. Svrha podzemnih tiltmetara je da ih se razmjesti blizu fraktura. Ako su uređaji smješteni u susjednoj bušotini blizu frakture, jaki signali dati će direktne podatke o dubini na kojoj se nalazi vrh i dno frakture (Abou-Sayed i dr., 2002).

8.1.2. Radioaktivni obilježivači

Radioaktivni obilježivači predstavljaju izotope koji se, kada se dodaju u maloj količini odgovarajućem neaktivnom materijalu ili kemijski sličnoj supstanci ili utisnu u neki fizički sustav, mogu pratiti uređajima za detekciju radijacije (mjerenjem njihove aktivnosti) čime se omogućuje određivanje distribucije i položaja tvari koja je tim izotopom obilježena (markirana).

U ovom slučaju kaša koja se utiskuje obilježava se radioaktivnim izotopima (npr. skandij (Sc) 46, antimon (Sb) 124, iridij (Ir) 192, i dr.) kako bi se mogla pratiti njezina migracija u podzemlju. Nakon utiskivanja obavljaju se karotazna mjerenja prirodne radioaktivnosti od dna bušotine prema ušću kako bi se locirao utisnuti otpad. Interpretacijom dobivenih rezultata mjerenja utvrđuje se vertikalno i radijalno prostiranje otpada. Ova metoda može utvrditi i postojanje kanalića u cementnom kamenu, međutim ne daje dobre rezultate ako se radi o bušotini s otklonom ili ako je stvorena fraktura horizontalna (Veil i Dusseault, 2003).

8.1.3. Mikro-seizmički monitoring

Mikro seizmičnost je mala pojava seizmičkog smicanja koja se događa u mediju kao rezultat naprezanja. Kada smično naprezanje premaši smičnu čvrstoću stijena dolazi do naglog pomicanja koje je slično potresu, ali puno manjeg intenziteta. Promjene u smičnom naprezanju stijena uokolo utisne bušotine nastaju zbog promjene volumena koja se događa tijekom utiskivanja kaše. Prikupljanje i lokalizacija događaja tijekom dugotrajnih operacija mogu pomoći u određivanju opće strategije utiskivanja, razvoja procesa s vremenom i ranom uočavanju oštećenja zaštitnih cijevi (Veil i Dusseault, 2003).

Uređaji za detekciju mikro-seizmičkih valova postavljeni su u susjednim bušotinama ili kao senzori iza zaštitnih cijevi u utisnoj bušotini. Površinska oprema je obično neproduktivna zbog slabog intenziteta mikro-seizmičkih valova, te zbog prelamanja i prigušenja koji se odvijaju tijekom prolaza seizmičkog vala kroz heterogene slojeve u podzemlju. Višestruki prijemnici omogućuju određivanje lokacije na kojoj nastaju mikro-seizmički valovi, kao i veličinu, orijentaciju i smjer kretanja tih valova (Veil i Dusseault, 2003).

Prednost ove metode je da može odrediti višestruke frakture i njihovo prostiranje. Nedostaci uključuju relativno visoku cijenu, točnost i nesigurnost prilikom određivanja azimuta. Kako bi se dobili kvalitetni rezultati mikro-seizmičkog monitoringa, potrebno je koristiti rezultate iz više bušotina (Abou-Sayed i dr., 2002).

Od ostalih testova i metoda koje se koriste prilikom monitoringa valja spomenuti test hidrauličke impedancije, snimanje temperature, metodu aktivacije kisikom, te metodu mjerenja šuma (buke). Dusseault i drugi (1998) dali su kratak pregled strategije monitoringa koja se preporučuje prilikom utiskivanja otpada u podzemlje (tablica 8-1.). Preporučeni pristup bazira se na pretpostavci da postoje idealni geološki uvjeti u ležištu.

Tablica 8-1. Preporučena strategija monitoringa prilikom utiskivanja otpada u podzemlje (Dusseault i dr., 1998)

Metoda praćenja	Opis projekta	Preporučena primjena
Praćenje tlaka na dnu u utisnoj bušotini	Primjenjuje se u svim projektima	24 h/d; očitavanje minimalno svakih 5 min; očitavanje svakih 5-60 s nakon završetka dnevnog ciklusa utiskivanja
Praćenje tlaka na dnu u susjednim bušotinama	Projekti u kojima se utiskuje više od 3 000 m ³ otpada mjesečno, te više od 10 000 m ³ godišnje	24 h/d; očitavanje minimalno svakih 15 min
Ispitivanje tlaka loma sloja	Primjenjuje se u svim projektima	Osnovno ispitivanje prije početka utiskivanja, te ponovo nakon svakih 3 000 do 5 000 m ³ utisnutog otpada

Tablica 8-1 Preporučena strategija monitoringa prilikom utiskivanja otpada u podzemlje (Dusseault i dr., 1998) (nastavak)

Metoda praćenja	Opis projekta	Preporučena primjena
Razina fluida u susjednim bušotinama	Projekti u kojima se utiskuje više od 3 000 m ³ otpada mjesečno ili više od 10 000 m ³ godišnje, te u slučaju velikog broja proizvodnih bušotina u blizini	Početno očitavanje prije početka projekta, te nakon toga dvaput dnevno (jednom prije početka utiskivanja i jednom neposredno prije završetka ciklusa)
Radioaktivni obilježivači	Primjenjuje se u svim projektima	Karotažna mjerenja prije početka utiskivanja, te nakon svakih 3 000 do 5 000 m ³ utisnutog otpada
Tiltmetri	Projekti u kojima se utiskuje više od 3 000 m ³ otpada mjesečno, te u slučaju zone utiskivanja na dubini manjoj od 800 m	Očitavanje prije početka utiskivanja, te očitavanje svakih 30 min za cijelo vrijeme trajanja projekta, uz analizu dobivenih podataka 2 do 3 puta mjesečno
Praćenje parametara utiskivanja	Primjenjuje se u svim projektima	Kontinuirano praćenje svih parametara za vrijeme trajanja projekta; očitavanje vrijednosti svake sekunde
Redovito i često uzimanje uzoraka	Primjenjuje se u svim projektima	Prikupljanje uzoraka jednom tjedno; provođenje analize uzorka barem jednom mjesečno; čuvati sve uzorke s projekta barem 6 mjeseci nakon njegovog završetka

Na kraju se može zaključiti da monitoring omogućuje praćenje utisnutog otpada u ležištu preko analize prikupljenih podataka kao što su podaci o tlakovima, volumenu utisnutog otpada, gustoći kaše, deformaciji površine i mikro-seizmičkim valovima. U slučaju da dođe do nekog problema, kao što je gubitak integriteta bušotine ili oštećenje formacije, monitoring omogućuje definiranje tog problema, te provođenje mjera ublažavanja, što na kraju pridaje ekološkoj sigurnosti utiskivanja.

9. PRIMJERI IZ PRAKSE

U ovom poglavlju biti će nešto detaljnije opisana dva primjera iz prakse koji predstavljaju tipičan slučaj utiskivanja otpada u podzemlje pri tlaku utiskivanja koji je veći od tlaka frakturiranja.

9.1.UTISKIVANJE KRHOTINA STIJENA NA NAFTNOM POLJU MANIFA, SAUDIJSKA ARABIJA

Na naftnom polju Manifa u Saudijskoj Arabiji dvije kompanije, Saudi Aramco i Terralog Technologies Inc., vršile su utiskivanje krhotina stijena u podzemlje u razdoblju od veljače 2012. do travnja 2014. godine. Otpad je utiskivan u 11 utisnih bušotina na umjetno stvorenim otocima u Perzijskom zaljevu, a ovdje će biti predstavljeni podaci za jednu bušotinu dobiveni kontinuiranim monitoringom i analizom dobivenih rezultata.

Svojstva utisne formacije

Geološkom procjenom naftnog polja Manifa odlučeno je da je Khafji formacija najprikladnija za utiskivanje kašastog otpada. Primarne karakteristike Khafji formacije su:

- nekonsolidirani pješčenjaci,
- debljina od 60 do 180 m,
- poroznost veća od 25%,
- propusnost približno 1 do 2 μm^2 (1 do 2 D).

Khafji formacija nalazi se na dubini od 1827 do 1994 m, a pokrovne stijene predstavljaju izmjenu šejla i pješčenjaka što je odlična prepreka migraciji utisnutog otpada prema površini.

Otpad je utiskivan kroz tubing promjera 0,1143 m (4 ½“), i to u bušotine koje su izrađene upravo u svrhu utiskivanja otpada. Bušotine su vertikalne ili s otklonom dijela kanala koji prolazi kroz utisnu zonu manjim od 20 stupnjeva.

Svojstva otpada i utiskivanje

Utiskivan je otpad sastavljen od krhotina, otpadne isplake na bazi ulja i vode, te vode zagađene pri čišćenju postrojenja. Navedeni kašasti otpad je miješan s morskom vodom da bi se dobila željena reološka svojstva. Ukupni volumen utisnutog otpada iznosio je 168 436 m³. Prosječna gustoća kašastog otpada iznosila je između 1200 i 1250 kg/m³, volumni postotak čvrstih čestica u kaši bio je između 10% i 25%, dok je veličina čvrstih čestica bila manja od 300 µm.

U pravilu, utiskivanje u jednu bušotinu tijekom 24-satnog perioda odvijalo se je u nekoliko faza:

1. faza: ispiranje morskom vodom prije utiskivanja volumena 10 m³ pri dva različita protoka, 0,47 m³/min (3 bbl/min) i 1,1 m³/min (7 bbl/min);
2. faza: utiskivanje kaše pri održivom protoku i tlaku iznad tlaka frakturiranja naslaga (16 m³ pri protoku od 1,1 m³/min);
3. faza: ispiranje morskom vodom nakon utiskivanja kaše: dnevni ciklus završava utiskivanjem 32 m³ morske vode pri maksimalnom održivom protoku od 1,1 m³/min (7 bbl/min);
4. faza: period mirovanja (bušotina je zatvorena) u trajanju od 3 do 4 sata, pri čemu se kontinuirano prati tlak.

Nakon mirovanja, ponovno se pokreće period utiskivanja kaše. U jednom danu moguće je izvesti do 5 ovakvih ciklusa utiskivanja. Maksimalni tlak utiskivanja koji je primijenjen iznosio je 17,2 MPa, dok pritom tlak na dnu bušotine nije prelazio 35,9 MPa.

Utisni parametri koji su kontinuirano praćeni su sljedeći:

- tlak na dnu (engl. *Bottomhole* pressure – BHP) u utisnim bušotinama,
- tlak na ušću (engl. *Wellhead* pressure – WHP) u utisnim bušotinama,
- tlak u prstenastom prostoru u utisnim bušotinama,
- sastav kašastog otpada (veličina čestica, viskoznost, gustoća i sadržaj čvrstih čestica),
- kapacitet utiskivanja (protok) i utisnuti volumen.

Kontinuirani monitoring i analiza izmjerenih rezultata su potrebni kako bi se osiguralo da ne dolazi do migracije otpada izvan zone utiskivanja i općenito kako bi se održala kontrola procesa kroz cijelo vrijeme trajanja utiskivanja (Xia i dr., 2014).

9.2.ZBRINJAVANJE RADIOATIVNOG MATERIJALA (NORM) U ZALJEVU MARCHAND, LOUISIANA

Naftno polje u zaljevu Marchand u Louisiani započelo je s proizvodnjom 1949. godine, te je većinu vremena tim poljem upravljao Chevron. Otpad iz procesa bušenja, proizvodnje i pročišćavanja nafte nastao tijekom 80-ih godina prošlog stoljeća odlagan je u brojne isplaćne jame na lokaciji. Tijekom dugogodišnjeg istraživanja i proizvodnje, na toj su lokaciji stvorene velike količine otpada koji sadrži prirodno pojavljujuće radioaktivne materijale (NORM). Taj otpad uglavnom se sastojao od krhotina, otpadne isplake, proizvedenog pijeska, slane vode, sirove nafte i padalina. Kako bi sanirao isplaćne jame i zbrinuo otpad s navedene lokacije, Chevron se odlučio za duboko utiskivanje tog otpada u podzemlje zbog ekoloških, ali i financijskih prednosti u odnosu na ostale metode zbrinjavanja (Reed i dr., 2001).

Svojstva utisne formacije

Otpad je utisnut u slabo konsolidirane formacije pješčenjaka, a sama utisna zona nalazila se je u području izmjenjujućih slojeva pješčenjaka i šejla. Činjenica da su pješčenjaci slabo konsolidirani predstavlja prednost budući da je potrebna manja energija za njihovo frakturiranje. Geološki stupac, prisutan u bušotini CNO#2 u koju je prvotno utiskivan otpad, čine sljedeće stijene:

- 0 – 610 m (0 – 2000 ft) prevladavaju šejlovi,
- 610 – 810 m (2000 – 2650 ft) sloj pijeska,
- 810 – 990 m (2650 – 3250 ft) sloj šejla,
- 990 – 1615 m (3250 – 5300 ft) izmjenjujući slojevi pješčenjaka i šejla debljine od 3 do 45 m.

Utisna bušotina CNO#2 izbušena je i opremljena u rujnu 1997. godine. Bušotina je prvotno bila opremljena tubingom promjera 0,089 m (3 ½“) s perforacijama na dubini od 1512 do 1524 m. Ciljana utisna zona bio je sloj pijeska debljine 35 m, a utiskivanje u

ovako opremljenu bušotinu trajalo je od studenog 1997. do svibnja 1998. godine. U svibnju 1998. godine postojeći tubinga je zamijenjen tubingom promjera 0,1143 m (4 ½“) i otvoren je novi, plići interval, uz perforacije na dubini od 1378 do 1390 m. Nakon toga utiskivanje je nastavljeno sve do ožujka 2000. godine. Tubing većeg promjera je upotrijebljen kako bi se smanjilo trenje koje se javljalo u bušotini. Ciljana utisna zona u ovom slučaju bio je sloj pijeska debljine 13 m na dubini od 1373 do 1386 m.

Svojstva otpada i utiskivanje

Kaša je prilikom utiskivanja sadržavala 20 do 70% čvrstih čestica, a pripremana je na način da je otpad miješan s vodom. Za utiskivanje kaše pri visokim tlakovima u bušotinu korištene su triplex pumpe. Protok je uglavnom bio između 1832 i 3663 m³/dan (8 – 16 bbl/min). Ciklus utiskivanja trajao je 9 do 11 sati, nakon čega bi bušotina bila zatvorena 13 do 15 sati.

Budući da je otpad sadržavao NORM, karotažna mjerenja prirodne radioaktivnosti omogućila su praćenje otpada i određivanje njegovog smještaja u podzemlju. Tijekom procesa utiskivanja praćeni su i analizirani sljedeći tlakovi: tlak na dnu bušotine, tlak u trenutku zatvaranja bušotine, tlak nakon 12 sati mirovanja i minimalni tlak u zatvorenoj bušotini. Upotrebu tiltmetara spriječili su močvarni uvjeti uokolo utisne bušotine.

Prosječni tlak utiskivanja u prvotno opremljenoj bušotini kretao se u rasponu od 24,7 do 27,2 MPa (3580 – 3940 psi), što odgovara gradijentu tlaka frakturiranja od 16,5 do 18,1 kPa/m (0,73 – 0,8 psi/ft). Na početku svibnja 1998. godine došlo je do naglog gubitka sposobnosti utiskivanja kaše u bušotinu. Pristupilo se remontu bušotine tijekom kojeg je uočeno gnječenje kolone zaštitnih cijevi na dubini od 1406 m. Na toj dubini nalazio se sloj pijeska debljine 1,2 m unutar debelog sloja šejla. Čini se da je migracija fluida pod tlakom prema gore uz kanal bušotine uzrokovala dodatan tlak u tom tankom sloju pijeska što je dovelo do smičnog naprezanja i oštećenja zaštitnih cijevi.

Tijekom remontnih radova u donjem dijelu kanala postavljen je cementni čep, te je bušotina perforirana u intervalu od 1378 do 1390 m. Nakon remonta bušotine i postavljanja tubinga promjera 4 ½“, prosječni tlak utiskivanja bio je između 23,1 i 25,5 MPa, što odgovara gradijentu tlaka frakturiranja od 17,4 do 19,5 kPa/m (0,77 – 0,86 psi/ft).

Tijekom trajanja projekta utisnuto je 469 002 m³ (2 949 700 bbl) kaše.

10. ZAKLJUČAK

Utiskivanje otpada pri tlaku frakturiranja je opće prihvaćena praksa koju koriste velike kompanije diljem svijeta. To je metoda koja omogućuje trajno zbrinjavanje otpada u podzemlje, pri čemu ne ostaju nikakvi tragovi na površini, što je velika prednost u odnosu na ostale metode zbrinjavanja otpada iz naftnog rudarstva. Osim brojnih ekoloških, postoje i ekonomske prednosti ove metode. Od nedostataka važno je navesti opasnost od migracije utisnutih fluida prema podzemnim izvorima pitke vode. Kako bi se to spriječilo, posebnu pozornost treba posvetiti pravilnom odabiru utisne formacije, pri čemu je najbolje odabrati relativno plitke slojeve dovoljne debljine, poroznosti i propusnosti. Također, važno je da pokrovne stijene budu slabe propusnosti kako bi zaustavile moguću migraciju fluida prema gore, te da postoji izmjena slojeva visoke i niske propusnosti.

Na temelju analize dostupnih literaturnih podataka moguće je zaključiti da je najčešći tip stijene u koje se otpad utiskuje pješčenjak, a sve dubine utiskivanja su manje od 2500 m. Također, u većini slučajeva pokrovna stijena je šejl, što predstavlja odličnu barijeru protoku fluida prema površini. Prosječna propusnost stijena u koje se utiskuje otpad je oko $1 \mu\text{m}^2$, a poroznost oko 25%.

Bušotine u koje se utiskuje otpad mogu biti već postojeće iscrpljene bušotine, čime se dodatno smanjuju troškovi, ili se može izraditi nova bušotina isključivo za tu namjenu ukoliko se radi o velikim količinama otpada i velikom naftnom polju u blizini koje stalno stvara novi otpad.

Osim pravilnog odabira utisne formacije, drugi vrlo važan dio procesa koji potvrđuje trajno zbrinjavanje otpada je monitoring. Kontinuirano se prate svi parametri, ali u različitim vremenskim razmacima. Postoje brojne metode i uređaji koji omogućuju praćenje utiskivanja otpada, te njegov smještaj u podzemlju, a često se koriste i podaci iz susjednih bušotina. Analizom članaka može se vidjeti da se sva utiskivanja izvode periodički, i to najčešće kroz tubing, pri čemu maksimalni tlak iznosi 35 MPa.

Iz svega navedenog može se zaključiti da je utiskivanje u podzemlje najbolja metoda za trajno zbrinjavanje otpada iz naftnog rudarstva budući da omogućuje vraćanje otpada na mjesto s kojeg on potječe.

11. LITERATURA

1. ABOU-SAYED, A.S., ANDREWS, D.E., BUHIDMA, I.M., 1989. Evaluation of Oily Waste Injection Below the Permafrost in Prudhoe Bay Field. SPE 18757, presented at the SPE California Regional Meeting, Bakersfield, California, April 5-7.
2. ABOU-SAYED, A.S., GUO, Q., 2001. Design Considerations in Drill Cuttings Re-Injection Through Downhole Fracturing. IADC/SPE 72308, presented at the IADC/SPE Middle East Drilling Technology Conference, Bahrain, 22-24 October.
3. ABOU-SAYED, A.S., GUO, Q., 2002. Drilling and Production Waste Injection in Subsea Operations – Challenges and Recommendations. OTC-14288-MS, presented at the 2002 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 6-9 May.
4. ABOU-SAYED, A.S., GUO, Q., WANG, G., MCLENNAN, J.D., ZAKI, K., 2002. Challenges for Monitoring and Verification of Drill Cuttings Reinjection Performance. SPE 78186, presented at the SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas, 20-23, October.
5. ARFIE, M., MARIKA, E., PURBODININGRAT, E.S., WOODARD, H.A., 2005. Implementation of Slurry Fracture Injection Technology for E&P Wastes at Duri Oilfield. SPE 96543, presented at SPE Asia Pacific Health, Safety and Environment Conference and Exhibition, Kuala Lumpur, Malaysia, 19-20 September.
6. BRUNO, M.S., BILAK, R.A., DUSSEAULT M.B., ROTHENBURG, L., 1995. Economic disposal of solid oil field wastes through slurry fracture injection. SPE 29646, presented at Western regional meeting, Bakersfield, California, 8-10 March.
7. DUSSEAULT, M.B., BILAK, R.A., 1993. Disposal of Produced Solids by Slurry Fracture Injection. PETSOC-SS-93-41, presented at the fifth Petroleum Conference of the South Saskatchewan section, Regina, October 18-20.
8. DUSSEAULT, M.B., BILAK, R.A., 1998. Mitigation of Heavy Oil Production Environmental Impact through Large-Scale Slurry Fracture Injection of Wastes. SPE/ISRM 47217, presented at the SPE/ISRM Eurock '98, Trondheim, Norway, 8-10 July.
9. DUSSEAULT, M.B., BILAK, R.A., RODWELL, L.G., 1997. Disposal of Dirty Liquids Using Slurry Fracture Injection. SPE 37907, presented at the SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference, Dallas, Texas, 3-5 March.

10. DUSSEAUULT, M.B., DANYLUK, P.G., BILAK, R.A., 1998. Slurry Fracture Injection of Solid and Liquid Heavy Oil Wastes. SPE 46823, presented at the SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Caracas, Venezuela, 7-10 June.
11. FETSENETS R.M., OVALLE, A., STILL, V., BLYUS, D., SHOKANOV, T., ANOKHIN, V.V., 2009. Meeting the Challenges of Waste Disposal in the Mainland of Russia – Successful Design and Implementation of the First Full-Scale Drilling Waste Injection Project in Western Siberia. SPE/IADC-125424-MS, presented at the Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition, Manama, Bahrain, October 26-28.
12. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2015. The Underground Injection of Drilling Waste. *Handbook of Research on Advancements in Environmental Engineering*, Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global): Hershey PA, USA 17033, United States of America; pp. 400-437.
13. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2018. Predavanja iz kolegija *Utiskivanje otpada iz naftnog rudarstva u bušotine*. Akademska godina 2018/2019.
14. GAURINA-MEĐIMUREC, N., DURN, N., 2005. Postupanje s tehnološkim otpadom u naftnoj industriji, Zagreb, RGNF Sveučilište u Zagrebu, str. 77-88.
15. GAURINA-MEĐIMUREC, N., KRIŠTAFOR, Z., MATANOVIĆ, D., 1998. Utiskivanje otpadnog fluida u podzemlje. Energetska i procesna postrojenja, Dubrovnik '98. Energetika marketing, 1998. str. 95-98.
16. GUMAROV, S., OVALLE, A., SHOKANOV, T., PARK, G., SIMMONS, S., 2009. Evaluation of Extended Seawater Injections Impact on Waste Injection Pressure Response and Waste Disposal Capacity. SPE-121189-MS, presented at the EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, June 8-11.
17. GUO, Y., MOHAMED, I.M., ABOU-SAYED, O., ABOU-SAYED, A. 2016. Injection and Remote Real-Time Monitoring: Slurry Injection Case Study, Onshore USA. SPE-187234-MS, presented at the Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, October 9-11.
18. KUNZE, K.R., ROMERO, E.E., DUCK, S. 2012. Colorado Drill-Cuttings-Injection Pilot Results. SPE-151453-MS, presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, San Diego, California, USA, March 6-8.

19. MAHROUS, R., TSOY, V., ELLIS, R., 2019. Customized High-Rate Cuttings Reinjection System: Effective Design Maintains Continuous Zero Discharge Operations on Sakhalin Island. SPE/IADC-194070-MS, presented at the SPE/IADC Drilling International Conference and Exhibition, The Hague, The Netherlands, 5-7 March.
20. MAJIDAIE, S., SHADIZADEH, S.R., 2009. Feasibility Study of Drill Cuttings Re-Injection in the Ahwaz Field Iran. SPE 122580, presented at the SPE Asia Pacific Health, Safety, Security and Environment Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 4-6 August.
21. MALIARDI, A., CECCONI, F., SIMEONE, D., GUMAROV, S., SHOKANOV, T., ANOKHIN, V., BENELKADI, S., BOSISIO, F., MANGIAMELI, R., 2014. Subsurface Cuttings Injection: Technical Challenges and Opportunities. IPTC 17565, presented at the International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, 20-22 January.
22. MEHTAR, M., HADDAD, M., TOKI, T., GUMAROV, S., BENELKADI, S., SHOKANOV, T., VIZZINI, C., MITCHELL, C., KHUDOROZHKOVA, P. 2016. Feed to Execution: First Successful Hydraulic Fracture Cuttings Re-Injection Process Offshore Abu Dhabi. SPE-183521-MS, presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 7-10.
23. MINTON, R.C., SECOY, B. 1993. Annular Re-Injection of Drilling Wastes. SPE 25042, *Journal of Petroleum Technology*, 1993, 45(11), str. 1081-1085.
24. MOHAMED, I.M., ABOU-SAYED, O., ABOU-SAYED, A., ALGARHY, A., ELKATATNY, S.M., 2018. Guidelines to Define the Critical Injection Flow Rate to Avoid Formation Damage during Slurry Injection into High Permeability Sandstone, *Engineering Fracture Mechanics*.
25. MOSCHOVIDIS, Z.A., GARDNER, D.C., SUND, G.V., VEATCH JR., R.W., 1994. Disposal of Oily Cuttings by Downhole Periodic Fracturing Injections, Valhall, North Sea: Case Study and Modeling Concepts. SPE 25757, first presented at the SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 22-25 February 1993.
26. MOSCHOVIDIS, Z.A., STEIGER, R.P., WENG, X., ABOU-SAYED, A.S., 1998. The Mounds Drill Cuttings Experiment: Determining Placement of Drill Cuttings By Hydraulic Fracturing Injection. SPE 48987, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 27-30 September.

27. MOSCHOVIDIS, Z.A., STEIGER, R.P., PETERSON, R., WARPINSKI, N., WRIGHT, C., CHESNEY, E., HAGAN, J., ABOU-SAYED, A., KECK, R., FRANKL, M., FLEMING, C., WOLHART, S., MCDANIEL, B., SINOR, A., OTTESEN, S., MYLLER, L., BEECHER, R., DUDLEY, J., ZINO, D., AKHMEDOV, O., 2000. The Mounds Drill Cuttings Injection Field Experiment: Final Results and Conclusions. IADC/SPE 59115, presented at the 2000 IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, 23-25 February.
28. NADEEM, M., DUSSEAU, M.B., BILAK, R.A., 2005. Assessment Criteria for Deep Waste Disposal Sites. ARMA/USRMS 05-667, presented at the 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS): Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions, Anchorage, Alaska, June 25-29.
29. OVALLE, A., SHOKANOV, T., SIMMONS, S., RONDEROS, J., 2008. Field Implementation of Sub-Surface Waste Injection: An Integrated Approach for Field Disposal Perspective. IADC/SPE 115040, presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 25-27 August.
30. REED, A.C., MATHEWS, J.L., BRUNO, M.S., OLMSTEAD, S.E., 2001. Safe Disposal of One Million Barrels of NORM in Louisiana Through Slurry Fracture Injection. SPE 71434, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September-3 October.
31. ROMERO, L., RAMIREZ, O., HERNANDEZ, R., BASTIDAS, A. 2016. First Successful Cuttings Reinjection CRI Operation in Ecuador: An Alternative to Help Minimize the Environmental Impact in a Protected Area. SPE-183150-MS, presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 7-10.
32. RONDEROS, J.R., OVALLE, A.P., 2010. Geomechanical Modeling Techniques Applied to Waste Injection Process. ARMA 10-397, presented at the 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, Utah, June 27-30.
33. SIPPLE-SRINIVASAN, M., BRUNO, M.S., BILAK, R.A., DANYLUK, P.G., 1997. Field Experiences With Oilfield Waste Disposal Through Slurry Fracture Injection. SPE 38254, presented at the 67th SPE Annual Western Regional Meeting, Long Beach, California, 23-27 June.

34. SIPPLE-SRINIVASAN, M.M., BRUNO, M.S., HEJL, K.A., DANYLUK, P.G., OLMSTEAD, S.E., 1998. Disposal of crude contaminated soil through slurry fracture injection at the West Coyote field in California. SPE 46239, presented at SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, 10-13 May.
35. VEIL, J.A., DUSSEAULT, M.B., 2003. Evaluation of Slurry Injection Technology for Management of Drilling Wastes. Prepared for U.S. Department of Energy, National Petroleum Technology Office, Under Contract W-31-109Eng-38, May, 2003.
36. WILLSON, S.M., RYLANCE, M., LAST, N.C., 1993. Fracture Mechanics Issues Relating to Cuttings Re-Injection at Shallow Depth. SPE/IADC 25756, presented at the SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 23-25 February.
37. WRIGHT, C.A., DAVIS, E.J., WANG, G., WEIJERS, L., 1999. Downhole Tiltmeter Fracture Mapping: A New Tool for Direct Measurement of Hydraulic Fracture Growth. Presented at the 37th U.S. Rock Mechanics Symposium, Vail, Colorado.
38. XIA, G., BILAK, R., MARIKA, E., AL-SHEHRI, H.A., AL-QAHTANI, F.Y., 2014. Performance Assessment of Cuttings Re-Injection (CRI) Operations at the Manifa OilField, KSA. Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure, presented at the ISRM Specialized Conference, Goiania, Brazil, 9-13 September.
39. Criteria for Underground Injection Projects. URL: https://www.sfwmd.gov/sites/default/files/documents/cm_semwaterright_ch6_uic_criteria.pdf (preuzeto: 8.12.2019.)
40. Official Portal for North Dakota State Government: Underground Injection Control Program Frequently Asked Questions. URL: <https://www.dmr.nd.gov/oilgas/undergroundfaq.asp> (preuzeto: 20.12.2019.)
41. Underground Injection Control Well Classes. URL: <https://www.epa.gov/uic/underground-injection-control-well-classes> (preuzeto: 8.12.2019.)

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.

Borna Kolarek