

# Tehnologije napuštanja eksploatacijskih bušotina

---

Lukač, Robert

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:582764>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Prijediplomski studij naftnog rudarstva

**TEHNOLOGIJE NAPUŠTANJA EKSPLOATACIJSKIH BUŠOTINA**

Završni rad

Robert Lukač

N4501

Zagreb, 2024.

## TEHNOLOGIJE NAPUŠTANJA EKSPLOATACIJSKIH BUŠOTINA

Robert Lukač

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

### Sažetak

Postupak napuštanja bušotina predstavlja završni dio radnog vijeka svake bušotine, koji u posljednjem desetljeću doživljava snažan rast popraćen značajnim udjelom troškova u životnom vijeku bušotine. Suvremeni međunarodni standardi te regulative propisane na razini države obvezuju operatora polja na dovođenje bušotinskog prostora u prvobitno stanje, prilikom čega se uspješnost napuštanja bušotine očituje u sprječavanju migracije nafte, plina ili ostalih štetnih tvari u vodonosnike. Prilikom projektiranja operacije napuštanja bušotine potrebno je razmotriti konstrukcijske elemente kanala bušotine, kao i ostale aspekte tog procesa kao što su: mjesto postavljanja čepa, kontrola slojnog tlaka, stanje bušotine, postavljanje i stvrđivanje cementnog čepa, uspostavljanje statičkih uvjeta u bušotini, raspoloživost opreme te svakako troškove. Problemi koji karakteriziraju ovakav proces su tehničke, tehnološke i financijske prirode. Drugim riječima, potrebno je pronaći moguća rješenja prilikom odabira materijala i metoda čepčenja bušotine te izabrati najpovoljnije koje će biti dovoljno sigurno za radnike, rudarski objekt i okoliš. U konačnici, nakon što se aktivnosti u bušotini ili proizvodnja fluida prekinu, status bušotine treba razjasniti. Općenito, mogu se definirati tri različita statusa: obustava rada bušotine, privremeno napuštena ili trajno napuštena bušotina.

Ključne riječi: napuštanje bušotina, sustav barijera bušotine, cementni čep, zakonske regulative

Završni rad sadrži: 34 stranice, 3 tablice, 10 slika i 13 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNf

Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNf  
Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić, RGNf  
Izv. prof. dr. sc. Karolina Novak Mavar, RGNf

Datum obrane: 23.09.2024., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA .....	II
POPIS KORIŠTENIH KRATICA.....	III
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. POVIJESNI PREGLED NAPUŠTANJA BUŠOTINA.....</b>	<b>3</b>
<b>3. ZAKONSKE REGULATIVE KOD NAPUŠTANJA BUŠOTINA.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1. Regulativa napuštanja bušotina u SAD-u .....</b>	<b>4</b>
<b>3.2. Regulativa napuštanja bušotina u EU .....</b>	<b>5</b>
<b>3.3. Regulativa napuštanja bušotina u RH.....</b>	<b>6</b>
3.3.1. <i>Opće odrednice napuštanja bušotina u RH.....</i>	6
3.3.2. <i>Ključni dokumenti i odrednice o napuštanju bušotina u RH.....</i>	6
<b>4. KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI KANALA BUŠOTINE .....</b>	<b>8</b>
<b>4.1. Osnovna filozofija barijera .....</b>	<b>8</b>
4.1.1. <i>Shematski prikaz barijera.....</i>	10
4.1.2. <i>Dijagram barijera .....</i>	12
4.1.3. <i>Ispitivanje barijera .....</i>	13
<b>5. NAČELNA RAZMATRANJA PRILIKOM DIZAJNIRANJA PROJEKTA     NAPUŠTANJA BUŠOTINE.....</b>	<b>14</b>
<b>5.1. Mjesto postavljanja čepa .....</b>	<b>14</b>
<b>5.2. Kontrola slojnog tlaka.....</b>	<b>15</b>
<b>5.3. Stanje bušotine.....</b>	<b>15</b>
<b>5.4. Postavljanje cementne kaše te njen prelazak u cementni kamen .....</b>	<b>16</b>
<b>5.5. Uspostavljanje statičkih uvjeta u bušotini .....</b>	<b>17</b>

5.6. Osiguravanje dugoročnog integriteta bušotine.....	17
5.7. Raspoloživost opreme te troškovi prilikom napuštanja bušotine .....	17
<b>6. KARAKTERISTIČNI MATERIJALI KOJI SE KORISTE KOD ČEPLJENJA I NAPUŠTANJA BUŠOTINA.....</b>	<b>18</b>
6.1. Portland cement.....	18
6.2. Isplaka .....	21
6.3. Mehanički čepovi .....	21
6.4. Alternativni materijali .....	23
<b>7. METODE POSTAVLJANJA CEMENTNIH ČEPOVA.....</b>	<b>24</b>
7.1. Metoda uravnoteženja stupca cementne kaše (engl. <i>Balanced-Plug Method</i> ) .....	25
7.2. Metoda pri kojoj se koristi cementacijski paker .....	26
7.3. Metoda korištenja dva čepa (engl. <i>Two Plug method</i> ).....	27
7.4. Metoda postavljanja cementnog čepa pri kojoj se koristi cementacijska žlica (engl. <i>Dump Bailer method</i> ).....	28
<b>8. PROCEDURA LIKVIDACIJE KANALA BUŠOTINE.....</b>	<b>30</b>
8.1. Faza 1 - napuštanje ležišta .....	30
8.2. Faza 2 - napuštanje.....	31
8.3. Faza 3 - uklanjanje ušća bušotine i zaštitnih cijevi .....	31
<b>9. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>32</b>
<b>10. REFERENCE .....</b>	<b>33</b>

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1-1.</b> Regulatorna tijela koja upravljaju naftnim aktivnostima na vlastitim područjima djelovanja .....	1
<b>Slika 4-1.</b> Shematski prikaz sustava barijera kroz životni ciklus bušotine .....	11
<b>Slika 4-2.</b> Dijagram barijera za proizvodnu bušotinu na Slici 4-1 .....	13
<b>Slika 6-1.</b> Izolacijski mosni čep .....	22
<b>Slika 6-2.</b> Cementacijski paker .....	22
<b>Slika 7-1.</b> Primjena metode uravnoteženja stupca cementne kaše .....	25
<b>Slika 7-2.</b> Metoda pri kojoj se koristi cementacijski paker .....	26
<b>Slika 7-3.</b> Metoda postavljanja cementnog čepa primjenom dva čepa za cementaciju .... .....	28
<b>Slika 7-4.</b> Metoda postavljanja cementog čepa pri kojoj se koristi cementacijska žlica .....	29
<b>Slika 8-1.</b> Pojednostavljena ilustracija tipične proizvodne bušotine prije i nakon P&A .....	31

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 4-1.</b> Primjeri sustava barijera kroz životni ciklus bušotine.....	11
<b>Tablica 6-1.</b> API klasifikacija cementa.....	19
<b>Tablica 6-2.</b> Alternativne vrste materijala koji se mogu koristiti kao trajni element barijere bunara .....	23

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

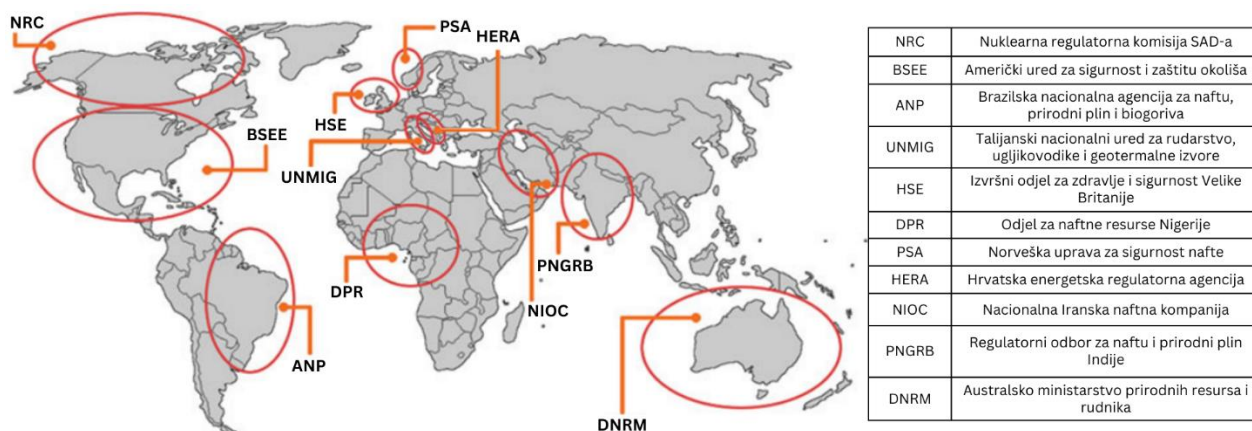
---

KRATICA	OPIS
API	Američki naftni institut (engl. <i>American Petroleum Institute</i> )
BOP	Preventerski sklop (engl. <i>Blowout Preventer</i> )
DHSV	Dubinski sigurnosni ventil (engl. <i>Downhole Safety Valve</i> )
EU	Europska unija
NORSOK	Organizacija za standardizaciju u Norveškoj (engl. <i>Norwegian shelf's competitive position</i> )
OEUK	Trgovačko udruženje za industriju energije na moru Ujedinjenog Kraljevstva (engl. <i>Energy United Kingdom</i> )
P&A	Zatvaranje (čepljenje) i napuštanje bušotine (engl. <i>Plug and Abandonment</i> )
RH	Republika Hrvatska
RRC	Željeznička komisija Teksasa (engl. <i>The Railroad Commission of Texas</i> )
SAD	Sjedinjene Američke Države
WBAC	Kriteriji za prihvaćanja barijere u bušotinama (engl. <i>Well Barrier Acceptance Criteria</i> )



## 1. UVOD

Svaki početak ima svoj kraj, pa tako i životni vijek bušotine. Kako se bliži kraj ekonomski isplativog razdoblja proizvodnje bušotine, postaje nužno razmotriti prenamjenu ili adekvatno napuštanje iste. Proces napuštanja naftnih i plinskih bušotina definira se kao niz postupaka koji osiguravaju izolaciju bušotine i zaštitu okoliša (morski okoliš, tlo ili atmosfera), sprječavajući migraciju slojnog fluida (nafte, plina ili drugih štetnih tvari) u podzemne vodonosnike ili na površinu. U konačnici, uspješno napuštanje bušotine očituje se postizanjem trajne izolacije/cjelovitosti bušotine koja sprječava migraciju bušotinskih/slojnih fluida i osigurava dugoročnu zaštitu okoliša. Kako bi se to postiglo, potrebne su trajne prepreke (barijere) unutar bušotinskog kanala, postavljene preko odgovarajućih formacija, koristeći prikladnu opremu u skladu s lokalnim propisima i zahtjevima regulatornih tijela (Slika 1-1.).



**Slika 1-1.** Regulatorna tijela koja upravljaju naftnim aktivnostima na vlastitim područjima djelovanja (preuređeno prema Khalifeh i Saasen, 2020)

Svaka bušotina suočava se sa specifičnim izazovima koji mogu uzrokovati kraj njezina životnog vijeka. Česti problemi uključuju gubitak integriteta kanala, iscrpljenost ležišta, konusiranje vode ili plina, nerentabilnost pridobivanja te završetak prikupljanja podataka. Osim tehničkih izazova, vanjske okolnosti poput nesreća također mogu uzrokovati potrebu za postupkom trajnog napuštanja bušotina. Primjerice, 1989. godine, teretni brod je udario u platformu u Sueskom zaljevu, što je rezultiralo prisilnim zatvaranjem devet bušotina i zahtijevalo ponovno razrađivanje polja (El Laithy i Ghzaly, 1998).

Kada se aktivnosti ili proizvodnja u bušotini prekinu, bušotina može poprimiti različite statute. Prvi predstavlja obustava rada (engl. *Suspended Well*), koji opisuje bušotinu koja je privremeno neaktivna, ali još uvijek tehnički funkcionalna i spremna za ponovno puštanje u rad. Obustava/suspenzija može biti uzrokovana tehničkim, operativnim ili ekonomskim čimbenicima, nepovoljnim vremenskim uvjetima, remontom drugih bušotina ili čekanjem na opremu.

Privremeno napuštanje (engl. *Temporarily Abandoned Well*) odnosi se na bušotinu iz koje je uklonjena oprema za kontrolu (glava bušotine, sigurnosni uređaji, proizvodne cijevi), no postoji mogućnost njezine ponovne aktivacije u budućnosti. Ovo stanje može trajati od nekoliko dana do nekoliko godina, ovisno o zahtjevima regulatornih tijela i specifičnim okolnostima na terenu, a može biti uzrokovano čekanjem na remont, čekanjem na razradu polja, itd. Regulatorna tijela često postavljaju ograničenja na maksimalno razdoblje privremenog napuštanja (tehničke likvidacije), a bušotine u ovom stanju mogu biti opremljene s ili bez sustava nadzora.

Za razliku od prethodnih, trajno napuštanje (engl. *Permanently Abandoned Well, P&D*) označava status u kojem je bušotina ili njezin dio trajno začepljen i napušten, bez namjere ponovnog korištenja u budućnosti.

Sve aktivnosti koje se provode s ciljem zatvaranja i uklanjanja industrijskih postrojenja iz upotrebe, uključujući i bušotine, definirane su pojmom dekomisija. Dekomisija predstavlja završnu fazu životnog ciklusa industrijske strukture i uključuje niz složenih operacija, poput općenitih razmatranja stanja bušotine, planiranja materijala i metoda, pridržavanja zakonske regulative, te razmatranja troškova napuštanja, koji su ključni faktor pri donošenju plana napuštanja bušotine (Khalifeh i Saasen, 2020).

## 2. POVIJESNI PREGLED NAPUŠTANJA BUŠOTINA

Tijekom 19. stoljeća bušotine su izrađivane s različitim ciljevima, kao što su: pronalazak nafte i plina, industrijska primjena, seizmička istraživanja, testiranje, odlaganje otpada, mjerenja petro-fizikalnih svojstava podzemnih stijena itd. No kako je dolazio kraj ekonomski isplativog životnog vijeka mnogih eksploatacijskih bušotina, procedura stavljanja bušotina izvan pogona predstavljala je glavni problem „starih“ bušotina koje su izgrađene prije donošenja propisa kojima se definira uspješan proces napuštanja (Calvert i Smith, 1994).

U počecima naftne industrije, zatvaranje bušotina nije bilo sustavno regulirano. Bušotine su često ostavljane bez adekvatnih sigurnosnih mjera, što je uzrokovalo razne ekološke probleme poput onečišćenja podzemnih voda i tla. Nedostatak dokumentacije o lokacijama i konstrukcijama bušotina otežavao je nadzor i sprječavanje negativnih utjecaja na okoliš. Primjerice, u Pennsylvaniji je prva bušotina izbušena 1859. godine, a prvi propisi o zatvaranju bušotina s ciljem zaštite proizvodne zone od onečišćenja slatkom vodom uvedeni su tek 1890-ih.

Prvi propisi vezani za napuštanje bušotina bili su usmjereni na očuvanje naftnih i plinskih resursa, ali se nisu bavili zaštitom okoliša. Tisuće bušotina ostale su napuštene bez ili s minimalnim naporima, često ispunjene drvom, kamenjem ili malim količinama cementa. Potencijalno najbolji primjer je država Teksas, gdje je prvi zakon o zatvaranju bušotina uveden tek 1919. godine, i to nakon što je već tisuće bušotina bilo izbušeno bez ikakve dokumentacije o njihovoj konstrukciji ili lokaciji (Arthur i Hochheiser, 2011).

Propisi za naftnu industriju počeli su se mijenjati 1970-ih porastom važnosti pitanja o zaštiti okoliša, s naglaskom na strože zahtjeve za zaštitu zona slatke vode (GWPC, 2009). Premda je u slučaju New York-a zakon o napuštanju bušotina postojao od 1879. sve do 1966. godine, operateri nisu bili dužni tražiti dozvole od države prije donošenja odluke o napuštanju bušotine. Promjenom zakona 1981. godine, sve bušotine izrađene na poljima otkrivenim nakon 1. listopada 1963. morale su koristiti cementne čepove umjesto do tada korištenih drvenih.

Iako su se pri napuštanju bušotina koristile tada prikladne metode, većina starih bušotina uzrokovala je lokalizirane ekološke probleme. Kao glavni uzroci ističu se: međudjelovanje isplake i cementne kaše, neiskustvo izvođenja operacija te nedovoljna priprema radova.

### 3. ZAKONSKE REGULATIVE KOD NAPUŠTANJA BUŠOTINA

Zakonska regulativa u naftnoj industriji značajno se promijenila 70-ih godina uvođenjem strožih zakona o zaštiti okoliša. Prilikom čega, odluke o napuštanju bušotina počinju uključivati pitanja zaštite okoliša, sigurnosti, tehničke izvedivosti i troškova. Danas je postupak trajnog napuštanja bušotina reguliran državnim propisima, a izvođači radova su dužni podnijeti određene zahtjeve regulatornim agencijama, kao što je to „*Zahtjev za izdavanje potvrde tehničkih rješenja za projekt trajnog napuštanja bušotine*“ u slučaju zakonodavstva Republike Hrvatske (RH).

#### 3.1. Regulativa napuštanja bušotina u SAD-u

Zbog velikog broja bušotina, propisi napuštanja bušotina u SAD-u variraju ovisno o državi. U Teksasu je P&D postupak reguliran od strane Željezničke komisije Teksasa (RRC). Prije zatvaranja, operator je dužan podnijeti "*Obavijest o namjeri zatvaranja bušotine*" (engl. *Notice of Intention to Plug a Well*) kojom navodi podatke o bušotini, razlozima zatvaranja, planiranim metodama i vremenskom okviru radova, uz sljedeće korake (Calvert i Smith, 1994):

1. **Procjena bušotine:** utvrđuju se dubina, promjer i stanje bušotine
2. **Uklanjanje otpada:** unutrašnjost bušotine čisti se od svih nečistoća pumpanjem (za tekući otpad) ili specijaliziranom opremom u slučaju krutog otpada
3. **Dezinfekcija bušotine:** bušotina se dezinficira, obično otopinom izbjeljivača, kako bi se uklonile bakterije i mikroorganizmi
4. **Uspostavljanje statičkih uvjeta:** bušotina mora biti ispunjena isplakom gustoće iznad 1140 kg/m<sup>3</sup> te dinamičke viskoznosti iznad 35 sekundi
5. **Punjenje bušotine:** bušotina se puni cementnom kašom odgovarajuće API klase bez olakšivača (kao što je API klasa A) te gustoće 1872 kg/m<sup>3</sup>
6. **Postavljanje cementnih čepova:** cementni čepovi postavljaju se 61 metar ispod površinske obloge i 15 metara iznad i ispod vodonosnih ili mineralnih zona
7. **Rezanje zaštitnih cijevi:** zaštitne cijevi režu se jedan metar (3,28 stopa) ispod površine zemlje, te
8. **Obnova lokacije:** lokacija bušotine se vraća u prvobitno stanje, uključujući zatrpavanje jama i uklanjanje svih tragova bušotine.

### 3.2. Regulatorna napuštanja bušotina u EU

Ne postoji međunarodna regulatorna za dekomisiju bušotina na razini Europske Unije, već se propisi temelje na postojećim praksama naftne industrije i zahtjevima država članica. Prilikom razvoja pravilnika i postupaka napuštanja bušotine nositelji licenci i izvođači često surađuju s međunarodnim organizacijama poput Organizacije za standardizaciju u Norveškoj (NORSOK) ili Trgovačkog udruženja za industriju energije na moru Ujedinjenog Kraljevstva (OEUK). Iako države primjenjuju različite pristupe, postoje zajednička razmatranja ključna za proces napuštanja bušotine, a koja uključuju (Van Nuffel i dr., 2022):

1. **Izolacija proizvodnih zona:** bušotine moraju biti pravilno izolirane kako bi se spriječila migracija fluida između geoloških formacija, a cementni čepovi na strateškim mjestima osiguravaju trajnu izolaciju proizvodnih i vodonosnih zona
2. **Zaštita vodonosnika:** posebna pažnja posvećuje se zaštiti podzemnih voda postavljanjem cementnih čepova iznad i ispod vodonosnih zona
3. **Upotreba visokokvalitetnih materijala:** regulatorna zahtijeva upotrebu visokokvalitetnih materijala, poput cementa odgovarajuće klase i specifične smjese, koji mogu izdržati uvjete u bušotini i osigurati dugoročnu stabilnost
4. **Procjena stanja bušotine:** prije zatvaranja potrebno je provesti detaljnu procjenu stanja bušotine kako bi se utvrdile potrebne mjere, uključujući pregled strukturalnog integriteta, prisutnost fluida, tlakove i uvjete u bušotini
5. **Postavljanje barijera:** propisi nalažu postavljanje trajnih barijera, poput cementnih čepova i mehaničkih prepreka na kritičnim mjestima, kako bi se spriječila migracija fluida i zaštitili slojevi
6. **Monitoring i dokumentacija:** nakon zatvaranja bušotine, regulatorna zahtijeva kontinuirani monitoring radi osiguranja stabilnosti postavljenih barijera, uz detaljnu dokumentaciju svih radova i inspekcije tijekom procesa zatvaranja
7. **Uklanjanje opreme:** sva oprema na površini, poput bušotinske glave i zaštitnih cijevi, mora se ukloniti ili rezati na određenu dubinu ispod površine kako bi se spriječilo buduće zagađenje okoliša ili povrede, te
8. **Obnova lokacije:** nakon zatvaranja, lokacija bušotine mora biti obnovljena i vraćena u prvobitno stanje kako bi se osigurao minimalni utjecaj na okoliš.

### **3.3. Regulatorna napuštanja bušotina u RH**

Zakonska regulatorna napuštanja bušotina u RH usklađena je s direktivama Europske unije (EU), koje su prilagođene lokalnim uvjetima. Dok EU postavlja okvirne smjernice, nacionalni propisi u RH, definirani kroz Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika i prateće pravilnike, pružaju upute prilagođene lokalnim geološkim i operativnim uvjetima.

#### *3.3.1. Opće odrednice napuštanja bušotina u RH*

Proces napuštanja bušotina u Republici Hrvatskoj obuhvaća niz obveznih koraka koje operatori provode pod nadzorom nadležnih tijela. Operator, bilo pravna ili fizička osoba s koncesijom za istraživanje i eksploataciju ugljikovodika, odgovoran je za izradu i provedbu plana napuštanja bušotine, koji uključuje tehničke i sigurnosne mjere za sigurno zatvaranje. Ovaj plan odobrava Ministarstvo nadležno za rudarstvo ili zaštitu okoliša kako bi osigurala usklađenost sa zakonskim propisima i minimalizirali rizici po okoliš i ljude.

Nakon odobrenja, provode se tehnički radovi poput cementacije, ispitivanja integriteta bušotine i uklanjanja opreme, kako bi se spriječila migracija ugljikovodika i kontaminacija podzemnih voda. Po završetku radova, operator je dužan sanirati okoliš i vratiti ga u prvobitno stanje ili ga prilagoditi novim namjenama, snoseći sve troškove navedenog postupka.

Nadzor nad procesom napuštanja bušotina provode nadležna tijela, poput: Ministarstva nadležnog za rudarstvo, koje odobrava planove i izdaje dozvole; Državnog inspektorata, koji provodi inspekcije i izdaje potvrde o sigurnosti i zaštiti okoliša, te Ministarstva zaštite okoliša i energetike, koje nadgleda proces radi sprječavanja kontaminacije i očuvanja prirodnih resursa.

#### *3.3.2. Ključni dokumenti i odrednice o napuštanju bušotina u RH*

Napuštanje bušotina u Republici Hrvatskoj (RH) je složen proces reguliran različitim zakonima i podzakonskim aktima, koji definiraju tehničke, sigurnosne i ekološke standarde te pravne i financijske obveze operatora. Ključni dokumenti koji sadrže odrednice o napuštanju bušotina uključuju (Agencija za ugljikovodike (AZU), n.d. i Zakon o rudarstvu):

- 1. Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19 i 30/21)**

**Članak 153.** propisuje izradu plana napuštanja bušotine s tehničkim i

sigurnosnim mjerama, kojeg odobrava nadležno tijelo, poput Ministarstva za rudarstvo ili zaštitu okoliša, u svrhu sprječavanja rizika za okoliš i ljude.

2. **Zakon o rudarstvu (NN 56/13, 14/14, 52/18, 115/18, 98/19 i 83/23)**

**Članak 44.** zahtijeva provođenje mjera za sprječavanje potencijalnih opasnosti za ljude, imovinu i okoliš nakon prestanka rada ili zatvaranja bušotine, uz obavezni nadzor Državnog inspektorata.

**Članak 12.** definira rudarske radove za sanaciju prostora nakon napuštanja bušotine, u svrhu eliminacije svih rizika po okoliš i sigurnost.

3. **Pravilnik o naftno-rudarskim projektima i postupku provjere naftno-rudarskih projekata (NN 87/2022)**

Propisuje tehničke smjernice i standarde zatvaranja bušotina, poput cementacije, ispitivanja integriteta bušotine, uklanjanja opreme i infrastrukture, te mjera za sprječavanje migracije ugljikovodika i kontaminacije podzemnih voda.

4. **Pravilnik o trajnom zbrinjavanju ugljikova dioksida u geološkim strukturama (NN 95/18, 87/22)**

Iako primarno usmjeren na zbrinjavanje CO<sub>2</sub>, uključuje odredbe o napuštanju bušotina korištenih za skladištenje CO<sub>2</sub>, zahtijevajući trajno napuštanje i osiguranje bušotina od potencijalne migracije fluida, uz kontinuirani monitoring.

5. **Uredba o naknadi za istraživanje i eksploataciju ugljikovodika (NN 25/20)**

Uredba propisuje financijske obveze operatera pri napuštanju bušotina, uključujući sanaciju okoliša i uklanjanje infrastrukture, te osigurava da su troškovi unaprijed pokriveni, smanjujući rizik za okoliš i zajednicu.

6. **Pravilnik o bitnim tehničkim zahtjevima, sigurnosti i zaštiti pri istraživanju i eksploataciji ugljikovodika iz podmorja Republike Hrvatske (NN 52/10)**

Propisuje tehničke i sigurnosne zahtjeve zatvaranja podmorskih bušotina, poput mjera za sprječavanje onečišćenja mora i uklanjanja podvodne infrastrukture.

7. **Pravilnik o građenju naftno-rudarskih objekata i postrojenja (NN 95/18, 101/22)**

Definira građevinske i tehničke standarde objekata i postrojenja vezanih uz istraživanje i eksploataciju ugljikovodika, kao i postupke zatvaranja bušotina uz primjenu najboljih praksi za dugoročnu sigurnost i minimalan utjecaj na okoliš.

## 4. KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI KANALA BUŠOTINE

Barijere su ključni elementi P&A procesa bušotina jer osiguravaju integritet bušotine i sprječavaju nekontrolirani protok fluida između različitih formacija i prema površini. Cilj napuštanja je postizanje cjelovitosti bušotine, definiranu kao "primjena tehničkih, operativnih i organizacijskih rješenja za smanjenje rizika od nekontroliranog ispuštanja formacijskih i bušotinskih fluida tijekom životnog ciklusa bušotine" (NORSOK Standard D-010, 2013).

### 4.1. Osnovna filozofija barijera

Načelo cjelovitosti bušotine ostvaruje se održavanjem kontrole bušotine uz pomoć dviju neovisnih barijera u svakoj fazi životnog vijeka bušotine. Ovaj pristup, poznat kao načelo "*šešira nad šeširo*m" osigurava da niti jedan pojedinačni gubitak barijere ne rezultira nekontroliranim protokom fluida u ili iz bušotine iliti neprihvatljivim posljedicama.

Prema NORSOK D-010 standardu, barijere se dijele na primarne i sekundarne, ovisno o njihovim funkcijama (Horaček, 2021). **Primarna bušotinska barijera** predstavlja barijeru koja je u izravnom kontaktu s ugljikovodicima pod tlakom i sprječava propuštanje fluida, služeći kao primarno sredstvo za kontrolu bušotine, a uključuje:

- **cementni kamen (engl. casing cement):** cementirani sloj između zaštitnih cijevi i stijenki bušotine koji sprječava migraciju fluida između različitih formacija
- **kolonu zaštitnih cijevi (engl. casing):** čelične cijevi koje se postavljaju unutar bušotine radi stabilizacije stijenki i sprječavanja nekontroliranog protoka fluida
- **isplaku pri izradi bušotine (engl. drilling mud):** fluid koji se koristi tijekom bušenja za održavanje tlaka u bušotini, hlađenje dlijeta i uklanjanje nabušenog materijala iz kanala bušotine
- **tubing (engl. tubing):** proizvodne cijevi kroz koje nafta ili plin teku iz formacije prema površini
- **proizvodni paker (engl. production packer):** uređaj koji izolira određene zone u bušotini, sprječavajući protok fluida između različitih zona proizvodnje, te
- **cementni čep (engl. casing cement plug):** cementna barijera postavljena unutar bušotine u svrhu zatvaranja dijelova bušotine i sprječavanja migracije fluida.



Ukoliko dođe do kvara primarne barijere (na primjer, dođe do propuštanja tubinga ili se ventil ne može zatvoriti), **sekundarne barijere** služe kao dodatna zaštitna mjera, a uključuju:

- **preventerski sklop (engl. *blowout preventer*, BOP):** uređaj postavljen na ušću bušotine koji može brzo zatvoriti bušotinu u slučaju iznenadnog povećanja tlaka, sprječavajući izlazak fluida na površinu
- **bušotinsku glavu i erupcijski uređaj (engl. *wellhead and christmas tree*):** skup ventila i uređaja koji kontroliraju tok fluida i tlak unutar bušotine
- **dubinski sigurnosni ventil (engl. *downhole safety valve*, DHSV):** ventil postavljen unutar bušotine koji se automatski zatvara u slučaju kvara na površinskoj opremi, sprječavajući protok fluida kroz tubing, te
- **vješalicu tubinga i zaštitnih cijevi (engl. *tubing and casing hanger*):** komponente koje drže tubing i zaštitne cijevi na mjestu, osiguravajući dodatno brtvljenje između unutarnjih i vanjskih dijelova bušotine.

Iako se u pravilu ne koriste, postoje i **tercijarne barijere**, koje predstavljaju dodatne sigurnosne mjere u visokorizičnim situacijama, poput bušotina s visokim tlakom, agresivnim kemijskim uvjetima ili nepoznatim geološkim formacijama. Jedan od primjera tercijarne barijere je ekološki čep, koji se koristi u kontekstu trajnog napuštanja bušotina, i služi kao dodatno osiguranje protiv curenja fluida prema vanjskom okolišu.

U procesu napuštanja bušotina i održavanja njihove sigurnosti, ključno je imati jasnu i preciznu vizualizaciju stanja barijera koje sprječavaju nekontrolirani protok fluida. Dva potencijalno najvažnija alata koja omogućuju inženjerima i tehničarima da učinkovito procijene integritet bušotine, identificiraju potencijalne rizike i planiraju odgovarajuće intervencije kako bi se osiguralo sigurno zatvaranje bušotine su (Khalifeh i Saasen, 2020):

- a. shematski prikaz barijera, te
- b. dijagram barijera.

#### 4.1.1. Shematski prikaz barijera

Shematski prikaz barijera bušotine (engl. *Well Barrier Schematics*) je grafički prikaz svih barijera bušotine koji omogućuje inženjerima brzu procjenu lokacije i stanja svakog barijernog elementa. Tijekom različitih faza bušotinskih operacija, provode se specifične aktivnosti kako bi se osigurala sigurnost i integritet bušotine, pri čemu uloga barijera varira ovisno o operacijama koje se izvode u kanalu bušotine.

U fazi **bušenja**, ključne operacije uključuju održavanje tlaka i stabilizaciju bušotine korištenjem isplake s isplačnim oblogom kao primarne barijere. Sekundarne barijere, kao što su cementni kamen, zaštitne cijevi, ušće bušotine i BOP (engl. *blowout preventer*), osiguravaju strukturalnu stabilnost i kontrolu nad bušotinom, sprječavajući nekontrolirani protok fluida.

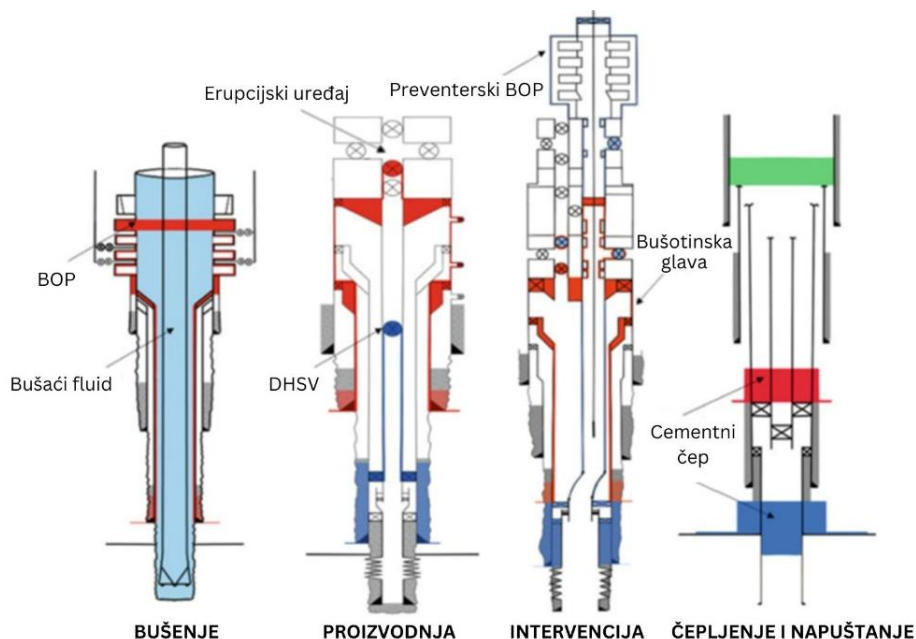
Tijekom **proizvodnje**, ključne operacije uključuju instalaciju tubinga za transport nafte i plina, postavljanje pakera za izolaciju zona i ugradnju DHSV-a (dubinski sigurnosni ventil) za automatsko zatvaranje toka u iznimnim situacijama poput nagle promjene tlaka u bušotini i sl.. Primarne barijere (cementni kamen, zaštitne cijevi, paker, tubing i DHSV) omogućuju kontrolu fluida, dok sekundarne barijere (erupcijski uređaj i vješalica tubinga) pružaju dodatnu sigurnost.

Kod **intervencija**, glavne operacije uključuju provjeru i zamjenu barijernih elemenata kao što su cementni kamen, zaštitne cijevi, čep i isplaka, koji služe kao primarne barijere za održavanje integriteta bušotine. Sekundarne barijere, poput BOP-a i bušotinske glave, omogućuju kontrolu tlaka i sigurno izvođenje intervencija.

U fazi **čepljenja i napuštanja**, ključne operacije uključuju postavljanje cementnih čepova za trajno zatvaranje bušotine i sprječavanje migracije fluida. Primarne barijere (cementni kamen, zaštitne cijevi i cementni čep) osiguravaju zatvaranje, dok sekundarne barijere pružaju dodatnu zaštitu, sprječavajući curenje fluida i osiguravajući dugoročnu stabilnost napuštene bušotine.

Vizualni prikaz navedenog predstavlja Slika 4-1., na kojoj su prikazane primarne i sekundarne barijere ovisno o izvođenju operacije unutar kanala bušotine, dok je njihova raspodjela dodatno pojašnjena pripadajućom Tablicom 4-1. Plavom bojom je označena

primarna barijera, dok je crvenom bojom označena sekundarna barijera, a terciarna, koja se koristi pri operaciji trajnog čepljenja (zatvaranja) i napuštanja bušotine, zelenom bojom.



**Slika 4-1.** Shematski prikaz sustava barijera kroz životni ciklus bušotine (preuređeno prema Khalifeh i Saasen, 2020)

**Tablica 4-1.** Primjeri sustava barijera kroz životni ciklus bušotine (preuređeno prema Khalifeh i Saasen, 2020)

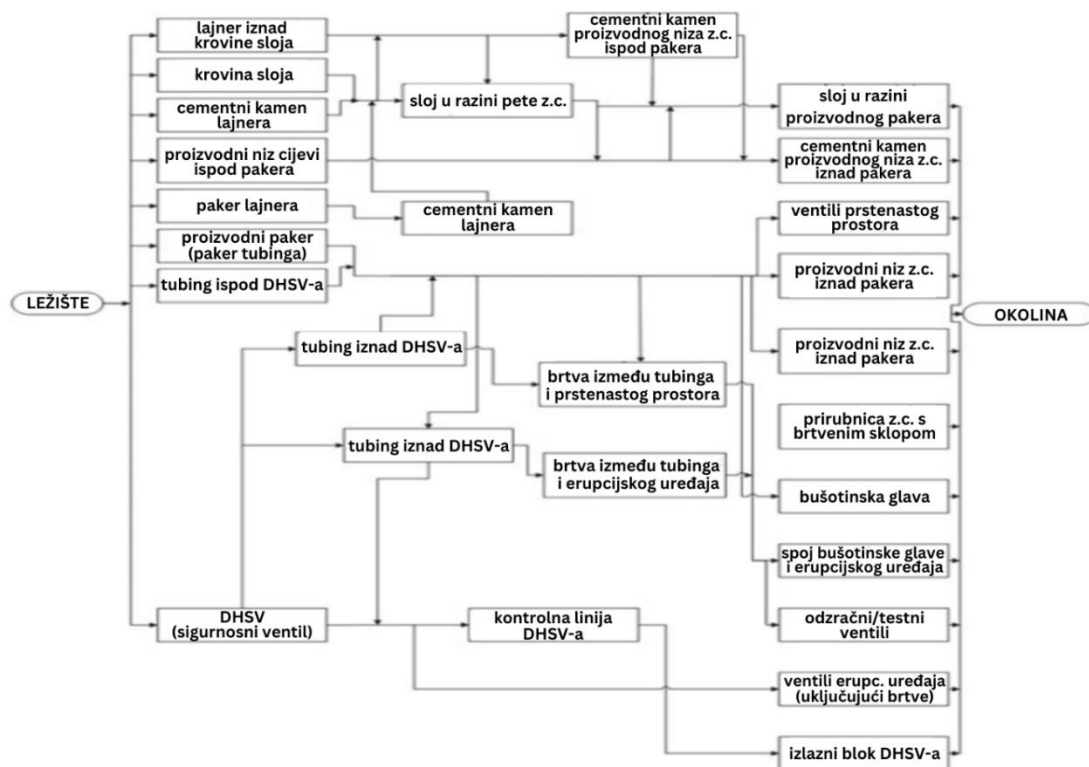
Primjer ciklusa	Primarna barijera	Sekundarna barijera
BUŠENJE	Isplaka s isplačnim oblogom	cementni kamen, zaštitne cijevi, ušće bušotine te BOP
PROIZVODNJA	Cementni kamen, zaštitne cijevi, paker, tubing te DHSV (sigurnosni ventil u bušotini)	cementni kamen, zaštitne cijevi, ušće bušotine, vješalica tubinga te erupcijski uređaj
INTERVENCIJA	Cementni kamen, zaštitne cijevi, čep te isplaka	Cementni kamen, zaštitne cijevi, ušće bušotine te BOP
ČEPLJENJE I NAPUŠTANJE	Cementni kamen, zaštitne cijevi te cementni čep	Cementni kamen, zaštitne cijevi, ušće bušotine te cementni čep

#### 4.1.2. Dijagram barijera

Nastavljajući na prethodno poglavlje o shematskom prikazu barijera, dijagram barijera predstavlja još jedan ključni alat za analizu i upravljanje sigurnošću bušotinskih operacija. Dok shematski prikaz barijera pruža statički pregled svih barijernih elemenata unutar bušotine, dijagram barijera se fokusira na identifikaciju mogućih putanja kretanja fluida i statusa barijera nakon što dođe do propuštanja (Khalifeh i Saasen, 2020).

Kada se shematski prikaz proizvodne bušotine s prethodne slike prikaže kao vodoravni dijagram, kao što je prikazano na Slici 4-2, to omogućava detaljniji uvid u potencijalne putanje kretanja fluida iz ležišta prema površini ili okolnim formacijama, kao što je:

- **kretanje fluida kroz cementni kamen:** cementni kamen služi kao primarna barijera koja izolira bušotinske cijevi od okolne formacije. Ako cementni kamen nije pravilno postavljen ili se tijekom vremena degradira zbog pukotina, mikrofraktura ili kemijskog djelovanja, fluid može migrirati između zaštitnih cijevi i stijenske bušotine prema površini
- **kretanje fluida kroz stijenske tubinga ili zaštitne cijevi:** ova putanja podrazumijeva curenje fluida kroz stijenske proizvodnih cijevi (engl. *tubing*) ili zaštitnih cijevi. Do curenja može doći ako cijevi puknu, korodiraju ili nisu pravilno spojene. Oštećene cijevi mogu omogućiti migraciju fluida iz ležišta prema bušotinskoj glavi, a time i prema površini
- **kretanje fluida oko ušća bušotine (engl. *wellhead*):** kvarovi na brtvi ušća bušotine (engl. *wellhead*) ili erupcijskom uređaju (engl. *christmas tree*) mogu dopustiti izlazak fluida na površinu. Takvi kvarovi mogu biti uzrokovani mehaničkim oštećenjem, nepravilnom montažom ili starenjem materijala brtvi, te
- **putanja kroz spojeve i brtve:** ova putanja uključuje curenje kroz spojeve i brtve između bušotinskih komponenti, kao što su spojevi između tubinga, prstenastog prostora, cijevi i erupcijskog uređaja. Do curenja može doći zbog nepravilne montaže, trošenja materijala ili nedovoljnog pritezanja spojeva, što može uzrokovati kretanje fluida unutar bušotine ili prema površini.



**Slika 4-2.** Dijagram barijera za proizvodnu bušotinu na Slici 4-1 (preuređeno prema Khalifeh i Saasen, 2020)

#### 4.1.3. Ispitivanje barijera

Nakon postavljanja svih elemenata barijere, njihov integritet potrebno je provjeriti tlačnim ispitivanjem diferencijalnim tlakom ili drugim metodama. Ispitivanje integriteta provodi se nakon svake promjene stanja ili opterećenja. Elementi aktivirani fluidom, tlakom ili mehanički također se moraju ispitati. Ispitivanje započinje niskotlačnim testom od 15 do 20 bara u trajanju od 5 minuta, zatim slijedi visokotlačno ispitivanje s najvećim dopuštenim diferencijalnim tlakom. Statički tlak se prati 10 minuta uz stabilno očitavanje, a integritet se smatra kvalitetnim ako je dopušteno propuštanje jednako nuli. Ispitivanje se vrši u smjeru protjecanja (Horaček, 2021).

Elementi barijera koji zahtijevaju aktivaciju provjeravaju se prije i nakon ugradnje, nakon izlaganja abnormalnim opterećenjima, nakon popravka te periodično prema preporuci proizvođača. Također tijekom ispitivanja važno je imati podatke o mehaničkim svojstvima stijena koje okružuju bušotinu kako bi se osigurao integritet tijekom eksploatacije, utiskivanja i napuštanja bušotine (Horaček, 2021).

## **5. NAČELNA RAZMATRANJA PRILIKOM DIZAJNIRANJA PROJEKTA NAPUŠTANJA BUŠOTINE**

Proces napuštanja bušotina u naftnoj industriji ključan je završni korak u životnom ciklusu bušotine, s ciljem trajnog zatvaranja kako bi se spriječila nekontrolirana migracija fluida i zaštitio okoliš. Postizanje tog cilja zahtijeva temeljito planiranje i pažljivu provedbu uzimajući u obzir tehničke, sigurnosne i ekološke aspekte, dok ključni čimbenici pri planiranju i izvođenju napuštanja bušotine uključuju (Kuhlthau i dr., 1983):

- mjesto postavljanja čepa
- kontrolu slojnog tlaka
- stanje bušotine
- postavljanje cementne kaše i prijelaz u cementni kamen
- uspostavljanje statičkih uvjeta u bušotini
- uspostavljanje dugoročnog integriteta bušotine, te
- raspoloživost opreme i troškovi.

### **5.1. Mjesto postavljanja čepa**

Postoje različiti pristupi za određivanje mjesta postavljanja čepa, pri čemu mnoge zemlje zahtijevaju postavljanje cementnog čepa duž cijele duljine raskrivene zone te dodatnih 15 do 30 metara unutar krovinske (izolatorske) stijene. S obzirom na duljinu raskrivene zone, koja može varirati od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara, potrebno je procijeniti prednosti postavljanja cementnog čepa duž cijele zone u odnosu na troškove. Zbog mogućih varijacija u udaljenosti, ne preporučuje se postavljanje čepa duljine veće od 152 m.

U pojedinim slučajevima, cementni čep se postavlja samo na vrh raskrivene zone s određenim preklapanjem s krovinskim slojem, dok se fluid za postavljanje ostavlja na dnu bušotine. Za bušotine u kojima su uklonjeni dijelovi zaštitnih cijevi, cementni čep treba postaviti na vrh preostale kolone zaštitnih cijevi kako bi se spriječila migracija fluida između zacijevljenih i nezacijevljenih dijelova kanala bušotine. U slučaju prisutnosti vodonosnika, cementni čepovi se najčešće postavljaju ispod i iznad svakog vodonosnika, s fluidom za postavljanje cementnih čepova između njih (Kuhlthau i dr., 1983).

## 5.2. Kontrola slojnog tlaka

Kontrola slojnog tlaka ključan je čimbenik procesa napuštanja bušotine, s obzirom kako je potrebno spriječiti dotok fluida iz sloja u bušotinu prije početka bilo kakvih aktivnosti. Uspostava statičkih uvjeta osobito je važna za aktivnosti koje se odnose na operacije pripreme bušotine za postavljanje cementnog čepa, kao što su: uklanjanje tubinga i zaštitnih cijevi, karotažna mjerenja u bušotini te popravni radovi. Postoji čitav niz dostupnih tehnika za kontrolu slojnog tlaka, dok se najčešće koriste otežane isplake ili remontni fluidi (Samardžić, 2012).

## 5.3. Stanje bušotine

Pregled stanja bušotine prije napuštanja ključan je za izbor odgovarajuće procedure za uspješno napuštanje bušotine. Najčešći problemi uključuju koroziju i degradaciju zaštitnih cijevi i cementnog kamena zbog kontakta sa slojnim fluidima, što može narušiti integritet bušotine i spriječiti učinkovito zaustavljanje migracije fluida. Iako cementni čep sprječava kretanje fluida unutar zaštitnih cijevi, ne može spriječiti curenje kroz loše zacementiran prstenasti prostor između cijevi i okolnih stijena. Osim toga, zaštitne cijevi mogu biti oštećene uslijed mehaničkih naprezanja, što uzrokuje curenja i druge probleme (Kuhlthau i dr., 1983).

Često se tokom pregleda stanja bušotine susreću i specifični problemi u bušotinskom kanalu koji zahtijevaju dodatne zahvate, a uključuju (NORSOK Standard D-010. 2013):

- **Nakupljanje kamenca:** Kamenac je naslaga mineralnih soli koja se taloži na metalnim ili stijenskim površinama zbog promjena tlaka, temperature ili sastava fluida. Može uzrokovati značajno smanjenje protoka ili ga potpuno blokirati, što otežava aktivnosti unutar bušotine. Uklanja se mehaničkim ili kemijskim metodama, poput glodanja, ispiranja kiselinom ili primjenom inhibitora kamenca
- **Istrošenost zaštitnih cijevi:** Javlja se kao učestali problem u dubokim i izrazito otklonjenim bušotinama u kojima dolazi do kontakta bušaćih alatki ili drugih komponenti sa zaštitnim cijevima što uzrokuje oštećenja, osobito u dijelovima bušotine s naglom promjenom smjera (engl. *dogleg*). Tijekom napuštanja bušotine, istrošenost može rezultirati gubitkom integriteta cijevi i problemima poput kolapsa, što zahtijeva dodatne analize i popravke

- **Ispuna kanala bušotine fragmentima:** Krhotine, odlomljeni komadi stijene i barit mogu se nakupiti oko necementiranih kolona zaštitnih cijevi, otežavajući samo povlačenje kolone. Tijekom P&A operacija potrebna sila povlačenja često premašuje kapacitet vučenja postrojenja ili vlačnu čvrstoću zaštitnih cijevi, što može uzrokovati lom cijevi te zahtijevati provođenje operacije instrumentacije
- **Korozija proizvodnog niza cijevi:** Uzrokuje ju kemijsko djelovanje fluida. Najčešće vrste korozije uključuju H<sub>2</sub>S i CO<sub>2</sub> koroziju, koje uzrokuju udubine u stijenama i pukotine u proizvodnom nizu cijevi. Tlačna ispitivanja korodiranih cijevi mogu dovesti do propuštanja i ugrožavanja integriteta bušotine
- **Taloženje asfaltena:** Asfalteni su najaromatičnije komponente sirove nafte koje se talože zbog promjena tlaka i temperature, formirajući čvrsti, ljepljivi materijal različitim površinama proizvodnog sustava. U P&A operacijama asfalteni se najčešće uklanjaju mehaničkim metodama korištenjem: strugača, rezača, alata s mlaznicama na spiralnim cijevima ili glodanjem
- **Erozija:** Proces uklanjanja materijala s površine cijevi mehaničkim djelovanjem čestica ili kapljica u tekućini, omogućen brzinom kapljica tijekom procesa proizvodnje ili utiskivanja fluida. Stoga, tijekom P&A, potrebno je poznavati istrošenost pojedinih dionica cijevi kako bi se održao njihov integritet, te
- **Hidrati:** Čvrsti kristali prirodnog plina zarobljeni unutar molekula vode pod visokim tlakom i niskom temperaturom. Oni se obično formiraju blizu površine ili u procesnoj opremi i uklanjaju se mehaničkim metodama putem strugača, rezača, alata sa mlaznicama postavljenih na spiralne cijevi ili glodanjem.

#### 5.4. Postavljanje cementne kaše te njen prelazak u cementni kamen

Sastav i svojstva cementne kaše ključni su faktori za uspješno postavljanje cementnog čepa. Dizajn cementne kaše prilagođava se tlaku i temperaturi, koji utječu na njezinu hidrataciju i prijelaz u cementni kamen. Za smanjenje filtracije, cementnoj kaši dodaju se aditivi, a kada se cementni čep postavlja u nezacijevljeni dio kanala, kemijski sastav kaše mora se prilagoditi kako bi se izbjegao negativan utjecaj na raskrivene stijene. Dodatni izazov predstavlja sprječavanje zagađenja cementne kaše isplakom, budući kako isplaka, njeni aditivi i ležišni fluidi mogu negativno utjecati na hidrataciju cementa. U tu svrhu koriste se: (Kuhlthau i dr., 1983):



- **grebači i centralizeri:** grebači (engl. *scratchers*) uklanjaju isplačni oblog sa stijenki bušotine, dok se centralizeri (engl. *centralizers*) postavljaju na dno tubinga, s ulogom centriranja alatki u bušotini
- **fluidi za ispiranje** (engl. *prewashes*): utiskuju se u bušotinu prije cementne kaše radi uklanjanja isplačnog obloga sa stijenki kanala bušotine i čišćenja taloga koji oslabljuju cementnu vezu sa stijenkama kanala bušotine. S obzirom na kemijski sastav razlikuju se: razrjeđivači (engl. *thinners*) i kiseline (engl. *acids*), te
- **razdjelnica** (engl. *spacer fluid*) se koristi za fizičko odvajanje cementne kaše od fluida za postavljanje cementnih čepova, a najčešće se koriste fluidi za ispiranje (engl. *prewashes*) ili posebno dizajnirani fluidi od strane servisnih kompanija.

### 5.5. Uspostavljanje statičkih uvjeta u bušotini

Za uspješno napuštanje bušotine ključno je uspostaviti statičke uvjete unutar bušotine. Svako kretanje fluida unutar kanala bušotine neposredno nakon postavljanja cementne kaše može rezultirati zagađenjem i/ili migracijom kaše. Statički uvjeti postižu se kontrolom tokova fluida u i iz kanala bušotine te održavanjem jednake gustoće fluida duž cijele bušotine u svrhu lakšeg postavljanja cementne kaše i njezinog prijelaza u cementni kamen (Kuhlthau i dr., 1983).

### 5.6. Osiguravanje dugoročnog integriteta bušotine

Dugoročni integritet bušotine osigurava se održavanjem otpornosti cementnog čepa i ostalih materijala na degradaciju uzrokovanu tlakom, temperaturom i kemijskim reakcijama. Fluide koji zaostanu između čepova tretira se inhibitorima korozije i biocidima kako bi se spriječila korozija zaštitnih cijevi i osigurala stabilnost tijekom vremena (Kuhlthau i dr., 1983).

### 5.7. Raspoloživost opreme te troškovi prilikom napuštanja bušotine

Pri donošenju odluka vezanih uz operacije napuštanja bušotina, potrebno je procijeniti prikladnost standardne opreme u odnosu na specifične uvjete u bušotini. Također se razmatra prilagodba postupka postavljanja cementnog čepa ili potreba za izradom specijalizirane opreme, na temelju troškovne analize različitih postupaka. U svakom slučaju, odabir opreme i metoda cementiranja mora biti ekonomski opravdan i tehnički izvediv (Kuhlthau i dr., 1983).

## 6. KARAKTERISTIČNI MATERIJALI KOJI SE KORISTE KOD ČEPLJENJA I NAPUŠTANJA BUŠOTINA

Proces napuštanja bušotina (P&A) u naftnoj i plinskoj industriji zahtijeva pažljiv odabir materijala koji će osigurati trajnu izolaciju bušotine i spriječiti neželjenu migraciju fluida iz ležišta prema površini ili okolnim formacijama. Prema „*Kriterijima za prihvaćanje bušotinskih barijera*“ (WBAC), materijali trajnih barijera moraju imati (Khalifeh i Saasen, 2020):

- vrlo nisku propusnost ili čak nepropusnost kako bi se spriječilo protjecanje fluida kroz njega nakon njegovog postavljanja
- dugoročnu trajnost u bušotinskim uvjetima
- konstantni obujam, odnosno materijal se ne smije sažeti kako bi se spriječilo stvaranje praznina kroz koje fluid može proći
- duktilnost ili nelomljivost, tj. materijal mora biti sposoban savijati se i deformirati pod tlakom i opterećenjem bez pucanja ili lomljenja
- kemijsku inertnost, tj. materijal mora biti otporan na kemijske reakcije s bušotinskim fluidima i plinovima, te
- odgovarajuće prijanjanje, tj. materijal mora dovoljno prijanjati na zaštitne cijevi i geološke formacije, osiguravajući dobru izolaciju i brtvljenje zone.

Najčešće korišteni materijali u P&A operacijama uključuju cement, isplaku i mehaničke čepove. Svaki od ovih materijala ima specifične karakteristike koje doprinose sigurnom i učinkovitom zatvaranju bušotine.

### 6.1. Portland cement

Portland cement predstavlja široko rasprostranjen materijal za izradu cementnih čepova u procesu napuštanja bušotine. Ovaj cementni materijal kombiniran s vodom formira smjesu koja se koristi za trajno zatvaranje bušotine i sprječavanje migracije fluida, osiguravajući dugoročnu izolaciju i zaštitu okoliša. Tijekom godina, svojstva Portland cementa značajno su poboljšana dodatkom raznih aditiva koji poboljšavaju njegovu učinkovitost u različitim bušotinskim uvjetima, kao što su bušotine s visokim tlakom i temperaturom, niskotemperaturne bušotine i horizontalne bušotine (Samardžić, 2012 i Arthur i Hochheiser, 2011).

**Tablica 6-1.** API klasifikacija cementa (prilagođeno prema Arthur i Hochheiser, 2011)

API klasifikacija	Dubina (m)	Vodocementni faktor (v/c)	Gustoća cementne kaše (kg/m <sup>3</sup> )	Uvjeti u kojima se upotrebljavaju
Klasa A	0 - 1829	0,46	1870	Obični cement, redovno korišten
Klasa B	0 - 1829	0,46	1870	Umjereno do visoko sulfatno otporan
Klasa C	0 - 1829	0.56	1770	Brzi prijelaz cementne kaše u cementni kamen visoke čvrstoće
Klasa D	1829 - 3048	0.38	1956	Umjereno visoki tlakovi i temperature
Klasa E	3048 - 4267	0.38	1956	Visoki tlakovi i temperature
Klasa F	3048 - 4877	0.38	1956	Ekstremno visoki tlakovi i temperature
Klasa G i H	0 - 2438	Klasa G - 0.44; Klasa H - 0.38	Klasa G - 1900; Klasa H - 1960	Osnovni cement, koristi se s usporivačima na svim dubinama

Portland cement klasificira se prema standardima Američkog naftnog instituta (API) kojom je definirano osam klasa cementa, od A do H, prilagođenih različitim dubinama i temperaturama. Sve klase temelje se na Portland cementu i sastoje od trikalcij silikata, dikalcij silikata, trikalcij aluminata i tetra-kalcij aluminoferrita. Razlike među klasama proizlaze iz finoće mljevenja i odnosa miješanja, što rezultira različitim zahtjevima za vodom, ponašanjem pri stvrdnjavanju i svojstvima cementnog kamena. API klase cementa uključuju (Arthur i Hochheiser, 2011):

- Klase A, B i C: namijenjene za plitke bušotine s niskim do umjerenim temperaturama i tlakovima. Cementi klase C posebno su pogodni za brzo stvrdnjavanje i visoku početnu čvrstoću
- Klase D, E i F: razvijene za dublje bušotine s umjerenim do visokim tlakovima i temperaturama, s produženim vremenom stvrdnjavanja, što omogućuje dulje vrijeme pumpanja cementne kaše, te
- Klase G i H: najčešće korištene klase za bušotine različitih dubina, a razlikuju se po finoći mljevenja (cementi klase G su finiji od cementa klase H).

Kada se API cement koristi za postavljanje cementnih čepova, ovisno o uvjetima u bušotini, svojstva cementa se modificiraju korištenjem aditiva poput (Samardžić, 2012):

- **Usporivači:** produljuju vrijeme stvrdnjavanja cementa, omogućujući dulje vrijeme pumpanja i lakše uklanjanje tubinga. Usporivači, poput lignina, smola, škroba i derivata celuloze, djeluju tako da se adsorbiraju na površini cementnih čestica, stvarajući nepropusne slojeve koji sprječavaju hidrataciju cementa
- **Ubrzivači:** skraćuju vrijeme stvrdnjavanja za brzo zatvaranje bušotine i sprječavanje prodora plina ili fluida. Najčešće korišten ubrzivač je kalcijev klorid ( $\text{CaCl}_2$ ), koji ubrzava stvaranje  $\text{Ca(OH)}_2$  i C-S-H gela u cementnoj kaši
- **Aditivi za smanjenje gubitka cirkulacije:** smanjuju gubitak cementne kaše u formacije prije stvrdnjavanja. Uključuju materijale poput dizel goriva, celofanskih pahuljica i orahovih ljuski
- **Oteživači:** povećavaju gustoću cementne kaše, posebno u dubokim bušotinama s visokim tlakom, koristeći materijale poput hematita, ilmenita i barita
- **Olakšivači:** smanjuju gustoću cementne kaše kako bi se spriječilo frakturiranje „slabih“ formacija. Uključuju bentonit, pucola i keramičke mikrokuglice, te
- **Aditivi za smanjenje filtracije:** sprječavaju ranu dehidraciju cementa i smanjuju migraciju plina, poboljšavajući vezu cementnog kamena i stijenke bušotine.

U većini slučajeva bušotina postojeći cement sa aditivima je samodostotan, ali postoje situacije koje zahtijevaju specijalne mješavine cementa (Arthur i Hochheiser, 2011):

- **Bušotine s umjerenim do visokim tlakom plina:** zahtijevaju cement koji sprječava prolazak plina iza kolone zaštitnih cijevi tijekom procesa stvrdnjavanja
- **Horizontalne bušotine:** zahtijevaju cement koji sprječava segregaciju čestica i osigurava homogenu stvrdnjavanje zbog utjecaja gravitacije na neravnomjernu raspodjelu čestica u cementnoj kaši, što može dovesti do stvaranja „slabih“ zona
- **Bušotine koje prolaze kroz slane zone:** Ulaskom u cement, sol djeluje kao ubrzivač, te je stoga potreban cement otporan na ubrzano stvrdnjavanje uzrokovano kontaminacijom soli, te
- **Duboke bušotine (preko 4572 m):** koriste se usporivači za sprječavanje preranog stvrdnjavanja i smanjivači trenja za lakše pumpanje cementne kaše.

## 6.2. Isplaka

Isplaka, najčešće u obliku bentonitne suspenzije u vodi, ključni je materijal za napuštanje bušotina, pri čemu se njezin odabir temelji na troškovima, tehničkim svojstvima i utjecaju na okoliš. Bentonit, kao glavni sastojak, glina je koja hidratira (bubri) u kontaktu s vodom, povećavajući viskoznost isplake i stvarajući gel. Povećanjem viskoznosti i gustoće osigurava se dovoljan hidrostatski tlak te olakšava transport fragmenata stijena iz bušotine na površinu, dok kvalitetan isplačni gel sprječava njihovo ponovno taloženje kada se isplaka ne kreće.

Bentonit se također može koristiti samostalno za zatvaranje bušotina, posebno u područjima poput Kalifornije, gdje predstavlja alternativu cementu. Kada je komprimiran i hidratiziran, stvara gustu, niskopropusnu masu koja sprječava migraciju fluida, ali je zbog ograničene čvrstoće prikladan samo za bušotine manjeg promjera i nižeg tlaka.

## 6.3. Mehanički čepovi

Mehanički čepovi predstavljaju također ključne elemente u procesu napuštanja bušotina, posebno u situacijama kada je potrebno smanjiti količinu cementne kaše i osigurati dodatnu zaštitu od ležišnog tlaka. Oni stvaraju trajnu barijeru koja sprječava migraciju fluida unutar bušotinskog kanala, održavajući sigurnost i integritet bušotine. Postavljaju se pomoću radnog niza tubinga ili specijalizirane opreme na žici. Nakon postavljanja na željeno mjesto, aktiviraju se klinovi koji se urezuju u zaštitne cijevi, dok se brtveći elementi šire i osiguravaju izolaciju. Ovi čepovi se sastoje od četiri glavna dijela (Arthur i Hochheiser, 2011):

- **Tijelo čepa:** izrađeno od materijala poput čelika, lijevanog željeza ili kompozitnih materijala, što omogućuje izdržljivost i otpornost na koroziju u uvjetima visokog tlaka i temperature
- **Klinovi:** metalni dijelovi koji se urezuju u unutrašnju stijenku zaštitnih cijevi i drže čep na mjestu, omogućujući stabilno pozicioniranje u bušotini
- **Brtveći elementi:** gumeni ili plastični prsteni koji se šire pri postavljanju čepa i tvore čvrstu brtvu koja sprječava migraciju fluida i osigurava trajnu izolaciju, te
- **Oprema za aktivaciju:** uključuje mehanizme za postavljanje čepa i izvlačenje tubinga, a aktivira se mehanički, hidraulički ili aktivacijom putem eksploziva.

Korištenjem mehaničkih čepova smanjuje se potrošnja cementa i troškovi te ubrzava proces napuštanja bušotine, pružajući dodatnu zaštitu od ležišnog tlaka. Međutim, njihova primjena je ograničena u uvjetima vrlo visokog hidrostatskog tlaka ili drugim specifičnim uvjetima te često zahtijeva specijaliziranu opremu i obuku, što povećava složenost i troškove.

Razlikuju se dvije vrste mehaničkih čepova koji se koriste u procesu napuštanja bušotina, a to su (Samardžić, 2012):

- **Izolacijski mosni čep (engl. *bridge plug*):** Ovi čepovi se koriste u slučajevima kada nije potrebna cementacija pod tlakom (tzv. skviziranje). Njihova glavna funkcija je pružanje mehaničke barijere unutar bušotine, što pomaže u izolaciji određenih dijelova bušotinskog kanala. Bridge plugovi su idealni za brze operacije gdje je potrebno osigurati privremenu ili trajnu blokadu, te
- **Cementacijski paker (engl. *cement retainer*):** Ovi čepovi su specijalizirani za operacije gdje je potrebna cementacija pod tlakom. Cementacijski pakeri omogućuju kontrolirano postavljanje cementne kaše na željeno mjesto, čime se poboljšava kvaliteta cementnog spoja i smanjuje rizik od migracije fluida. Oni se često koriste u kombinaciji s cementnom kašom za stvaranje dugotrajnih barijera.



**Slika 6-1.** Izolacijski mosni čep (Arthur i Hochheiser, 2011)



**Slika 6-2.** Cementacijski paker (Arthur i Hochheiser, 2011)

#### 6.4. Alternativni materijali

U procesu napuštanja bušotina, pored standardnih materijala za zonsku izolaciju i trajno napuštanje bušotina, sve se više koriste alternativni materijali koji nude specifične prednosti u određenim uvjetima. Najčešće korišteni alternativni materijali uključuju termičke polimere, termoplastične polimere i elastične polimere (Tablica 6-2). Njihova uporaba ima za cilj poboljšati sigurnost i učinkovitost postupka napuštanja bušotina, osobito u uvjetima koji su izazovni za tradicionalne materijale.

**Tablica 6-2.** Alternativne vrste materijala koji se mogu koristiti kao trajni element barijere bušotine (prilagođeno prema Khalifeh i Saasen, 2020; Arthur i Hochheiser, 2011)

Materijal	Primjeri	Glavne Karakteristike	Prednosti	Mane
Termički polimeri	smole, epoksi, poliester, uretanske pjene, fenol	otpornost na visoke temperature, kemijska stabilnost	otpornost na visoke temperature i kemijsku degradaciju, dugotrajna barijera	visoka cijena, potreba za specijaliziranim postavljanjem
Termoplastični polimeri	polietilen, polipropilen, poliamid, poliuretani	fleksibilnost, elastičnost, sposobnost oblikovanja pod toplinom	prilagodljivost promjenama tlaka i temperature, lako oblikovanje	moгуće deformacije pod ekstremnim uvjetima
Elastomerni polimeri	Prirodna guma, neopren, nitril, silikonska guma, poliuretan, bubreće gume	visoka fleksibilnost, duktilnost	otpornost na pomicanje formacija i promjene tlaka, trajna elastičnost	manja čvrstoća u usporedbi s termoplastima i termičkim polimerima

## 7. METODE POSTAVLJANJA CEMENTNIH ČEPOVA

Pravilno postavljanje cementnih čepova zahtijeva pažljiv odabir i primjenu odgovarajuće metode, koja se bira ovisno o specifičnim uvjetima i zahtjevima bušotine, kao i stanju i konstrukciji bušotinskog kanala. Svaka metoda ima svoje prednosti i ograničenja u smislu sigurnosti, učinkovitosti i troškova. Govoreći o metodama postavljanja cementnih čepova razlikuju se:

- metoda uravnoteženjem stupca cementne kaše (engl. *Balanced-Plug method*)
- metoda pri kojoj se koristi cementacijski paker za zadržavanje stupca cementne kaše na željenom mjestu (engl. *Cement Retainer method*)
- metoda s dva čepa (engl. *Two-Plug method*), te
- metoda pri kojoj se koristi cementacijska žlica (engl. *Dump Bailer method*).

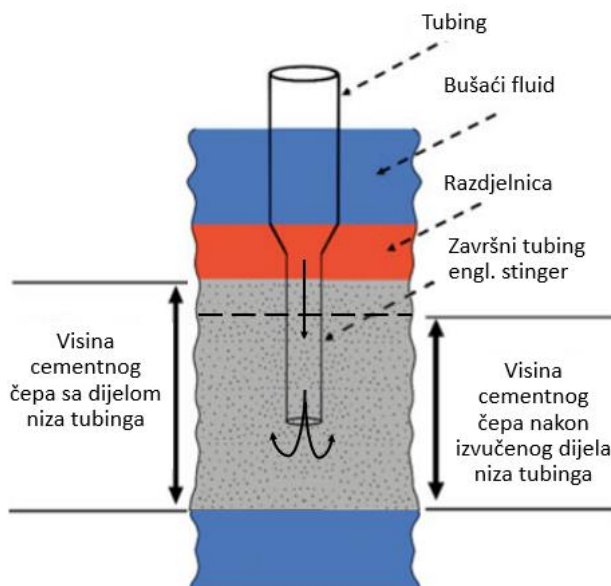
Kod svih metoda napuštanja bušotina, ključni materijal je API cement, posebice klase G i H, zbog svoje svestranosti i prilagodljivosti raznim uvjetima bušotine. Dodavanjem aditiva poput ubrzivača i usporivača, API cement se može prilagoditi specifičnim potrebama, čime se osigurava optimalna izvedba svih metoda napuštanja.



## 7.1. Metoda uravnoteženja stupca cementne kaše (engl. *Balanced-Plug Method*)

Navedena metoda predstavlja jednu od najčešće korištenih metoda za postavljanje cementnih čepova u naftnim i plinskim bušotinama, s obzirom da je pri izvođenju ove metode potrebna samo servisna jedinica za cementaciju te dobre operaterske vještine.

Ova metoda uključuje nekoliko ključnih koraka za postavljanje cementnog čepa. Prvo se izračunavaju potrebni volumeni cementne kaše, razdjelnog fluida i fluida za ispiranje kako bi svi fluidi dosegli željene razine unutar i izvan radnog niza cijevi. Radni niz cijevi spušta se do potrebne dubine, a na dno se postavlja cijev manjeg promjera (engl. *stinger*) bi se povećao zazor između njega i zaštitnih cijevi (engl. *casing*). Razdjelni fluid i fluid za ispiranje pumpaju se ispred i iza cementne kaše kako bi se spriječila kontaminacija bušačim fluidom i osigurao pravilan kontakt s zaštitnim cijevima ili formacijama. Cementna kaša se potom upumpava kroz radni niz cijevi prema dolje, ispunjavajući prostor između radnog niza i zaštitnih cijevi ili geoloških formacija, krećući se prema gore i stvarajući cementni čep na željenoj dubini. Ključno je izbalansirati volumen fluida unutar i izvan radnog niza kako bi cementni čep ostao na planiranom mjestu (Slika 7-1.). Nakon stvrdnjavanja cementa provjerava se integritet čepa, a zatim se oprema uklanja i bušotina zatvara (Khalifeh i Saasen, 2020).



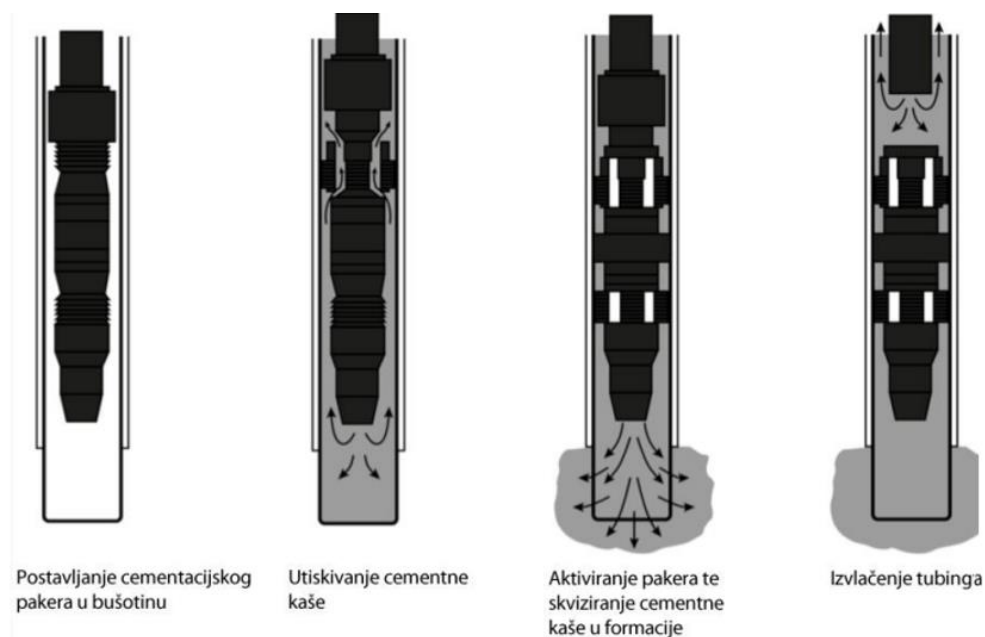
**Slika 7-1.** Primjena metode uravnoteženja stupca cementne kaše (preuređeno prema Khalifeh i Saasen, 2020)

## 7.2. Metoda pri kojoj se koristi cementacijski paker

Navedena metoda je klasificirana kao specijalna primjena metode uravnoteženja stupca cementne kaše. Prilikom primjene ove metode cementacijski paker se pričvršćuje na dno radnog niza tubinga te spušta na željenu dubinu. Cementna kaša se zatim utiskuje kroz paker dok razina cementne kaše ne dosegne 15 do 30 metara iznad konačne dubine postavljanja pakera. Potom se paker aktivira i izolira prstenasti prostor između tubinga i zaštitnih cijevi.

Nakon aktivacije pakera, cementna kaša se protiskuje kroz ventil pakera u prostor ispod njega i okolnu stijenu. Kada je utisnut željeni volumen cementne kaše, ventil se zatvara. Radni niz tubinga se zatim odvaja od pakera (koji ostaje u bušotini) i polako izvlači iz cementne kaše, kao što je prikazano na Slici 7-2. Nakon što je tubing podignut iznad vrha cementne kaše, potrebno je očistiti bušotinski kanal obrnutom cirkulacijom (Kuhlthau i dr., 1983).

Najveća prednost ove metode je da nakon postavljanja cementnog čepa nije potrebno njegovo testiranje, što omogućuje operateru da odmah započne s postavljanjem sljedećeg cementnog čepa. Međutim, zbog korištenja nepovratnog cementacijskog pakera, ova metoda je skuplja u usporedbi s drugim metodama i nije preporučljiva za upotrebu u nezacijevljenim dijelovima bušotinskog kanala.

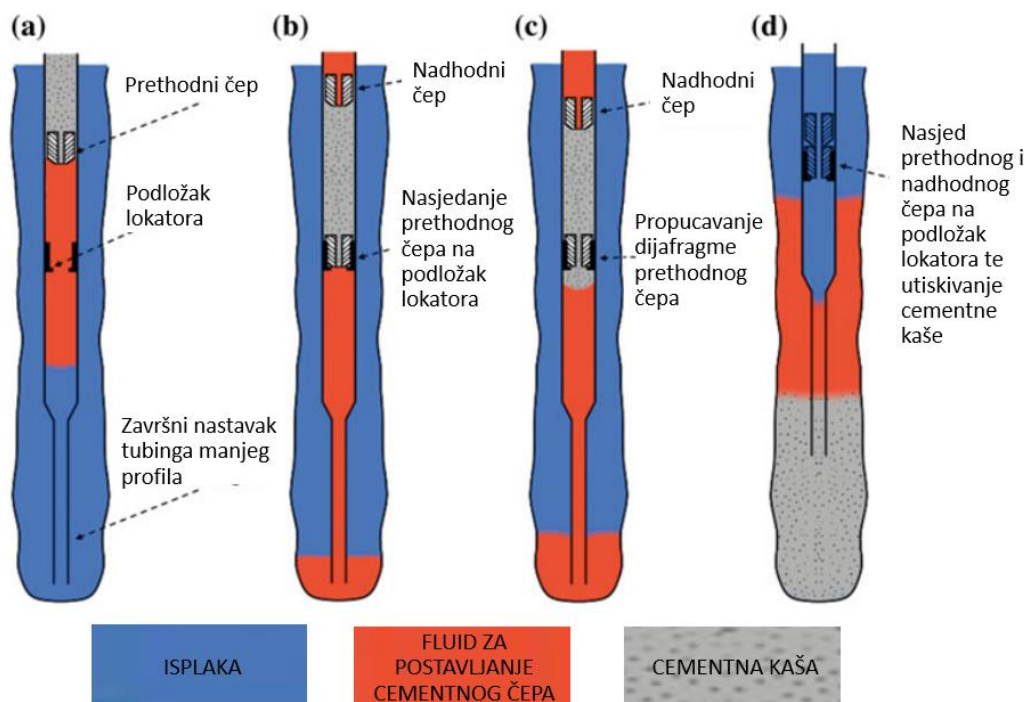


**Slika 7-2.** Metoda pri kojoj se koristi cementacijski paker (Samardžić, 2012)

### 7.3. Metoda korištenja dva čepa (engl. *Two Plug method*)

Metoda s dva čepa koristi se za precizno postavljanje cementnog čepa u bušotinu uz minimalnu kontaminaciju cementne kaše. Ova metoda koristi dva čepa (prethodni i nadhodni čep) za odvajanje cementne kaše od ostalih fluida, čime se osigurava učinkovita cementcija i održava integritet bušotine. Ujedno, svaki čep ima dijafragmu koja zadržava tlak do točke pucanja, dok je radni niz opremljen lokatorom na dubini projektirane ugradnje čepa (Khalifeh i Saasen, 2020). Ugradnja cementnog čepa ovom metodom je prikazan Slikom 7-3., a sastoji se od sljedećih koraka:

- [a] Prethodni čep se postavlja ispred cementne kaše kako bi spriječio miješanje kaše s razdjelnim fluidom ili bušaćim fluidom ispred njega. Cementna kaša se pumpa kroz radni niz (engl. *tubing*), potiskujući prethodni čep prema dolje kroz bušotinu.
- [b] Zatim se u radni niz upušta nadhodni čep, izolirajući cementnu kašu od okolnih fluida do dubine ugradnje. Nadalje, daljnjim protiskivanjem fluida za postavljanje cementnih čepova kaša (odnosno prethodni čep, cementna kaša i nadhodni čep) se kreće prema dolje sve dok prethodni čep ne dosegne lokator (zaustavnu ploču) postavljenu na dubini ugradnje čepa. Lokator služi kao referentna točka za konačnu poziciju čepa.
- [c] Kada prethodni čep dosjedne na lokator, zbog nemogućnosti daljnjeg pomicanja tlak u bušotini raste sve dok dijafragma prethodnog čepa ne pukne, omogućujući cementnoj kaši da prođe kroz čep i uđe u prstenasti prostor između cijevi i stijenki bušotine.
- [d] Daljnjim upumpavanjem fluida za postavljanje cementnog čepa cementna kaša se utiskuje na projektirano mjesto sve dok nadhodni čep ne dođe u kontakt s predhodnim (dok se cementna kaša u potpunosti ne istisne), što označava završetak postavljanja cementne kaše. Ponovnim povećanjem tlaka radni niz (*tubing*) se odvaja od alata te izvlači iz bušotine.



**Slika 7-3.** Metoda postavljanja cementnog čepa primjenom dva čepa za cementaciju (preuređeno prema Khalifeh i Saasen, 2020)

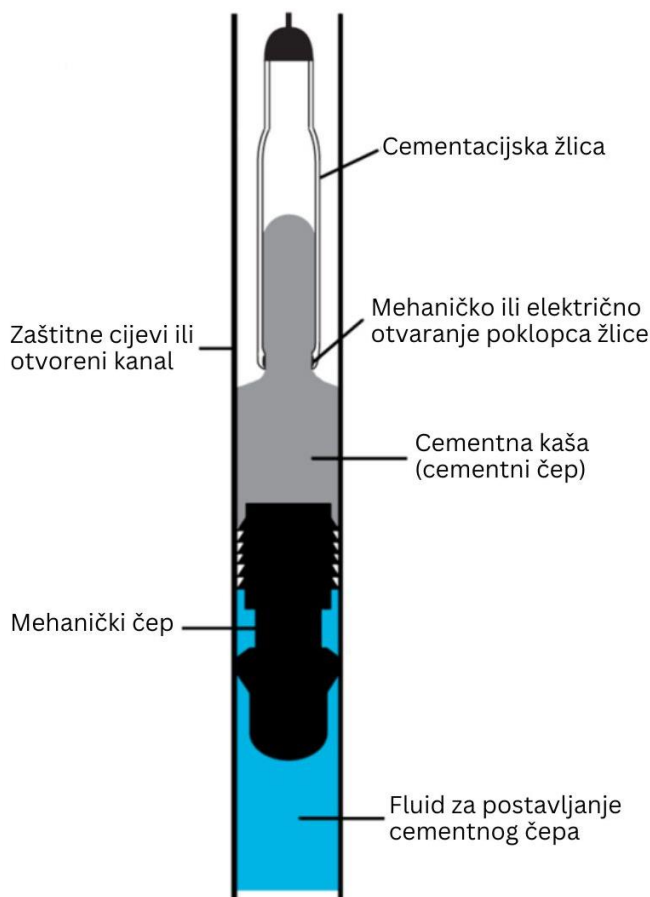
#### **7.4. Metoda postavljanja cementnog čepa pri kojoj se koristi cementacijska žlica (engl. *Dump Bailer method*)**

Ovo je relativno lako izvediva metoda koja se koristi za postavljanje cementnog čepa u bušotinu, posebno u situacijama kada je potrebno precizno postaviti manje količine cementne kaše uz minimalnu kontaminaciju. Metoda je jednostavna za izvođenje i omogućuje dobru kontrolu nad smještanjem cementne kaše. Uobičajeno se koristi za bušotine na kopnu jer ne zahtijeva bušaće postrojenje, već koristi opremu na žici (engl. *wireline*) za rukovanje cementacijskom žlicom u bušotinu.

Postupak započinje spuštanjem mehaničkog čepa pomoću opreme na žici (engl. *wireline*) do projektirane dubine u bušotini. Mehanički čep služi kao oslonac za cementnu kašu koja će se naknadno ispustiti. Nakon što je mehanički čep postavljen, cementacijska žlica (engl. *dump bailer*) se puni cementnom kašom na površini. Žlica se pričvršćuje na žicu i spušta u bušotinu do željene dubine iznad mehaničkog čepa. Kada žlica dosegne ciljnu dubinu, poklopac

žlice se otvara elektronički putem signala ili mehanički dodiranjem s postavljenim mehaničkim čepom. Otvaranjem žlice, cementna kaša se gravitacijski ispušta i ispunjava prostor iznad mehaničkog čepa. Cementna kaša se tada stvrdnjava na predviđenom mjestu, formirajući čvrsti cementni čep koji učinkovito izolira ciljana područja unutar bušotine. Procedura postavljanja cementnog čepa pomoću ove metode prikazana je na Slici 7-4. (Khalifeh i Saasen, 2020).

Ova metoda je jednostavna i učinkovita, omogućuje dobru kontrolu nad smještanjem cementa, minimalizira kontaminaciju, te ne zahtijeva bušaće postrojenje, što smanjuje operativne troškove i skraćuje vrijeme operacije u usporedbi s drugim metodama cementacije. Međutim, zbog ograničenog volumena cementne kaše koja se može spustiti u bušotinu tijekom jednog manevra, metoda se najčešće koristi u plitkim bušotinama. U slučaju korištenja u dubokim bušotinama koristi se usporivač kako bi se spriječio preuranjeni prijelaz cementne kaše u cementni kamen (Kuhlthau i dr., 1983).



**Slika 7-4.** Metoda postavljanja cementnog čepa pri kojoj se koristi cementacijska žlica (preuređeno prema Kuhlthau i dr., 1983)

## 8. PROCEDURA LIKVIDACIJE KANALA BUŠOTINE

Proces likvidacije bušotine, poznat i kao P&A (engl. *Plug and Abandonment*), zahtijeva pažljivo planiranje i provedbu kako bi se osiguralo trajno zatvaranje bušotine i otklonila opasnost od migracije fluida ili kontaminacije okoliša. Prije izvođenja P&A operacija, operator podnosi zahtjev lokalnom regulatornom tijelu koje ga pregledava i odobrava ili traži izmjene programa napuštanja. Općenito, cjelokupan proces P&A operacija može se podijeliti u tri faze:

- faza 1 - napuštanje ležišta
- faza 2 - napuštanje, i
- faza 3 - uklanjanje ušća bušotine i zaštitnih cijevi.

Prikazana kategorizacija je neovisna o lokaciji bušotine (npr. na moru ili na kopnu), vrsti bušotine (npr. istražna, proizvodna, utisna itd.) i statusu bušotine (npr. djelomično napuštena, zatvorena itd.). Svaka faza uključuje specifične korake i procedure za osiguranje uspješnog ishoda, temeljenog na preporukama i primjerima iz prakse tvrtke CROSCO i drugih izvora.

### 8.1. Faza 1 - napuštanje ležišta

Proces napuštanja ležišta započinje pregledom ušća bušotine i snimanja stanja u bušotini korištenjem opreme na žici, s ciljem procjene pristupa kanalu bušotine i stanja proizvodnog niza cijevi. Ova preliminarna faza (poznata i kao Faza 0 - intervencija na bušotini), znatno smanjuje vrijeme izvođenja P&A operacije. Također, tijekom te faze uspostavljaju se sustavi zbrinjavanja otpada (tekuće i krute faze) koji se generiraju daljnjim procesom (Khalifeh i Saasen, 2020).

Faza 1 započinje testom utiskivanja s svrhom ispitivanja integriteta bušotine. Ukoliko je integritet potvrđen cementna kaša se protiskuje s ciljem odjeljivanja ležišta od kanala bušotine, a nakon što cementni čep postigne dovoljnu čvrstoću, njegova se kvaliteta utvrđuje tlačnim ispitivanjem. Međutim, ukoliko se ne potvrdi integritet bušotine tlačnim testovima, potrebno je postaviti BOP (preventerski sklop) na ušće bušotine.

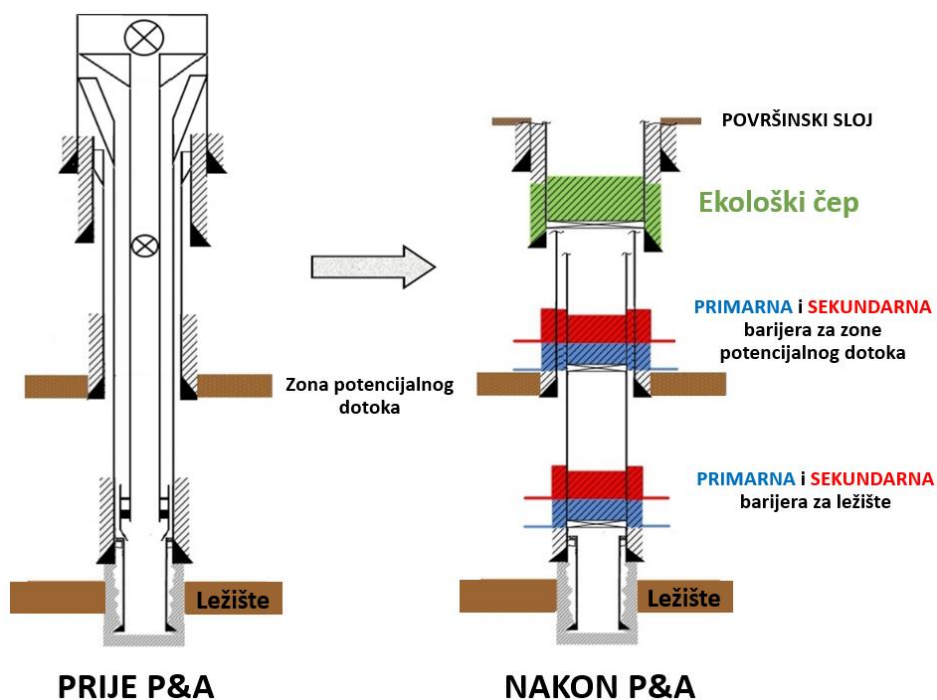
Općenito govoreći, faza 1 je završena kada su postavljene primarne barijere koje trajno izoliraju ležište od ostatka bušotine, što može uključivati izvlačenje ili ostavljanje proizvodnih cijevi kao dijela barijere.

## 8.2. Faza 2 - napuštanje

Uključuje aktivnosti usmjerene na izolaciju preostalih zona unutar bušotine koje mogu biti potencijalni izvori dotoka fluida. To zahtjeva glodanje i vađenje zaštitnih cijevi, postavljanje barijera za izolaciju zona zasićenih ugljikovodicima ili vodom te postavljanje ekološkog čepa. Proizvodne cijevi mogu se djelomično izvući ako to nije učinjeno u prvoj fazi. Glavni cilj ove faze je osigurati sve preostale potencijalne zone dotoka. Faza 2 završava kada su sve zone unutar bušotine izolirane od površinskih i podzemnih voda (Khalifeh i Saasen, 2020).

## 8.3. Faza 3 - uklanjanje ušća bušotine i zaštitnih cijevi

U posljednjoj fazi, fokus je na vraćanju površinskog područja u njegovo „prvobitno stanje“, što uključuje rezanje ušća bušotine i bušotinske glave ispod površine te njihovo vađenje. Ovaj korak je posebno važan u marinskom okruženju kako bi se izbjegla buduća interferencija s drugim pomorskim aktivnostima. Nakon uklanjanja svih komponenata, površina se izravnava i vraća u prirodno stanje, čime se završava proces likvidacije bušotine. Završetkom procesa, konstrukcija nekoć aktivne proizvodne bušotine poprima sljedeći izgled (Slika 8-1.).



**Slika 8-1.** Pojednostavljena ilustracija tipične proizvodne bušotine prije i nakon P&A (preuređeno prema Vrålstad i dr., 2019)

## 9. ZAKLJUČAK

Proces napuštanja naftnih i plinskih bušotina ključan je za zaštitu podzemnih i površinskih voda te očuvanje okoliša, dok je sam P&A proces rezultat ekonomske neisplativosti bušotine za daljnju proizvodnju ili negativno izbušene bušotine.

Povijesno gledano, tehnike napuštanja bušotina koristile su osnovne tehnologije, poput drvenih čepova i cementnih kaša bez dodataka, što je često dovodilo do problema kontaminacije cementne kaše i neadekvatnog čepljenja i napuštanja bušotina. Iako osnovni pristupi P&A operacijama ostaju isti, suvremene metode znatno su napredovale zahvaljujući aditivima koji poboljšavaju svojstva cementne kaše i novim tehnikama koje omogućuju preciznije i sigurnije napuštanje bušotina.

Značajan napredak postignut je i u zakonodavstvu, koje se prilagodilo međunarodnim propisima i standardima zaštite okoliša. Pravilnici sada zahtijevaju da operatori slijede stroge smjernice za pravilno zatvaranje bušotina, što, unatoč percepciji da je riječ o nužnom trošku bez izravnih koristi, dugoročno smanjuje troškove potencijalne sanacije i tužbi.

Detaljnim razmatranjem svih aspekata i stanja u bušotini izrađuje se pravovaljan plan napuštanja, koji uključuje pripremu bušotine te planiranje uspostave hidrauličkog i mehaničkog integriteta prilikom napuštanja, osiguravajući trajnu sigurnost i zaštitu okoliša.

Zaključno, napuštanje bušotina je složen proces koji zahtijeva pažljivo planiranje, stručnost i prilagodljivost. Pravilno izvedene P&A operacije ključne su za dugoročnu sigurnost i održivost naftne i plinske industrije, dok kontinuirano unapređenje tehnologija i metoda, uz strogo pridržavanje regulativa, može značajno smanjiti potencijalne rizike i osigurati održivost u budućnosti. Uzevši sve u obzir, daljnji rast i razvoj P&A operacija leži u ulaganju u edukaciju, istraživanje i razvoj novih materijala i tehnologija. Takva ulaganja ne samo da mogu povećati učinkovitost i sigurnost operacija, već i pojednostaviti proces te ga učiniti ekonomski isplativijim.



## 10. REFERENCE

1. Agencija za ugljikovodike (AZU), n.d. Zakonodavni okvir.  
URL: <https://www.azu.hr/hr-hr/o-nama/zakonodavni-okvir> (20.08.2024.)
2. ARTHUR, J.D., HOCHHEISER, H.W., 2011., Working Document of the NPC North American Resource Development Study: Plugging and Abandonment of Oil and Gas Wells.  
URL: <https://www.scribd.com/document/514564843/2-25-Well-Plugging-and-Abandonment-Paper> (16.08.2024.)
3. CALVERT, D.G., SMITH, D.K., 1994., Issues and Techniques of Plugging and Abandonment of Oil and Gas Wells, SPE 28349, The 1994 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 25-28 September, 1994.  
URL: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/94SPE/All-94SPE/SPE-28349-MS/56376> (22.07.2023.)
4. EL LAITHY, W.F., and S.M. GHZALY., 1998., Sidki well abandonment and platform removal case history in the Gulf of Suez. In SPE international conference on health, safety, and environment in oil and gas exploration and production. SPE-46589-MS, Caracas, Venezuela: Society of Petroleum Engineers.  
URL: <https://doi.org/10.2118/46589-MS> (22.07.2023.)
5. GWPC (2009) State Oil and Natural Gas Regulations Designed to Protect Water Resources. Ground Water Protection Council, National Energy Technology Laboratory. May 2009, pp. 26-27.  
URL: <https://www.gwpc.org/wp-content/uploads/2023/05/State-Regulations-Report-2021-Published-May-2023-FINAL.pdf> (16.08.2024.)
6. HORAČEK, A. (2021). *Hidraulički i mehanički integritet kanala bušotine : diplomski rad* (Diplomski rad). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.  
Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:497738> (20.07.2023.)
7. KHALIFEH M., SAASEN A. ,(2020.,) Introduction to permanent plug and abandonment of wells. Springer, Cham.  
URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39970-2> (20.07.2023.)

8. KUHLETHAU, R., THOMPSON, W.E., AMY, V., MAHAN, J., SMITH, C., 1983., Technical Manual Injection Well Abandonment, No. 68-01-5971.  
URL:[https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-02/documents/final\\_technical\\_manual\\_injection\\_well\\_abandonment.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-02/documents/final_technical_manual_injection_well_abandonment.pdf)  
(21.07.2023.)
9. NORSOK Standard D-010., 2013., Well integrity in drilling and well operations. Standards Norway  
URL:<https://www.npd.no/globalassets/1-mpd/regelverk/skjema/bronnregistreing/eng/norsok-d-010-2013-well-integrity-and-well-operations-rev-4.pdf> (21.07.2023.)
10. SAMARDŽIĆ, A. (2012). *Tehnologija napuštanja bušotina : diplomski rad* (Diplomski rad). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.  
Preuzeto s: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:057273> (20.07.2023.)
11. VAN NUFFEL, L., CIHLAROVA, P., FORESTIER, O., (2022.,) Study on decommissioning of offshore oil and gas installations : a technical, legal and political analysis : final report, Publications Office of the European Union. European Commission, Directorate-General for Energy.  
URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/580313> (25.07.2023.)
12. VRÅLSTAD T., SAASEN A., FJÆR E., ØIA T., YTREHUS J.D., KHALIFEH M., 2019., Plug & abandonment of offshore wells: Ensuring long-term well integrity and cost-efficiency, Journal of Petroleum Science and Engineering.  
URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410518309173>  
(20.08.2024.)
13. Zakon o rudarstvu, NN 56/13, 14/14, 52/18, 115/18, 98/19, 83/23, na snazi od 29.07.2023.  
URL: <https://www.zakon.hr/z/390/Zakon-o-rudarstvu> (20.08.2024.)

## **IZJAVA**

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



---

Robert Lukač



KLASA: 602-01/24-01/123  
URBROJ: 251-70-12-24-2  
U Zagrebu, 11. 9. 2024.

**Robert Lukač, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/123, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 28.06.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### TEHNOLOGIJE NAPUŠTANJA EKSPLOATACIJSKIH BUŠOTINA

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina  
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)