

# Izdvajanje kamenca tijekom eksploatacije ugljikovodika i geotermalne vode

---

**Lučić, Borna**

**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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:925603>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-18**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**IZDVAJANJE KAMENCA TIJEKOM EKSPLOATACIJE UGLJIKOVODIKA I  
GEOTERMALNE VODE**

Završni rad

Borna Lučić

N4547

Zagreb, 2024

## IZDVAJANJE KAMENCA TIJEKOM EKSPLOATACIJE UGLJIKOVODIKA I GEOTERMALNE VODE

Borna Lučić

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

### Sažetak

Taloženje kamenca predstavlja ozbiljan problem u eksploataciji ugljikovodika i geotermalne vode, uzrokujući smanjenje protočnosti, čepljenje bušotina i cjevovoda te povećanje troškova održavanja. Ovaj rad analizira uzroke i mehanizme nastanka kamenca, uz poseban naglasak na učinkovite metode prevencije i uklanjanja taloga. Prvi dio rada pruža teoretski pregled problema izdvajanja kamenca, dok se u drugom dijelu analiziraju dva konkretna primjera, jedan vezan uz naftno te jedan vezan uz geotermalno polje, kako bi se prikazali izazovi i rješenja vezana uz izdvajanje kamenca u praksi. Kroz ove analize naglašava se važnost inovativnih tehnologija za kontrolu izdvajanja kamenca i održavanje kontinuiteta eksploatacije.

Ključne riječi: kamenac, eksploatacija ugljikovodika, geotermalna voda, naftne bušotine, geotermalne bušotine

Završni rad sadrži: 28 stranica, 3 slike, i 9 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNF

Komentor: Dr. sc. Igor Medved, RGNF

Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNF  
Izv. Prof. dr. sc. Gordana Bilić RGNF  
Izv. Prof. dr. sc. Sonja Koščak Kolin, RGNF

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>II</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. IZDVAJANJE KAMENCA TIJEKOM EKSPLOATACIJE UGLJIKOVODIKA I GEOTERMALNE VODE .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Kamenac .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Vrste kamenca i njihovo izdvajanje .....</b>	<b>4</b>
2.2.1. Karbonatni kamenac .....	4
2.2.2. Sulfatni kamenci .....	6
2.2.3. Sulfidni kamenac .....	8
2.2.4. Soli .....	10
<b>3. PRIMJERI IZDVAJANJA KAMENCA NA EKSPLOATACIJSKIM POLJIMA 14</b>	
<b>3.1. Izdvajanje kamenca na naftnim bušotinama .....</b>	<b>14</b>
3.1.1. Općenito o eksploatacijskom polju Ekofisk .....	14
3.1.2. Vrste kamenaca .....	16
3.1.3. Metode uklanjanja kamenca koji se izdvaja na polju Ekofisk .....	18
<b>3.2. Izdvajanje kamenca na geotermalnim poljima .....</b>	<b>20</b>
3.2.1. Općenito o geotermalnom polju Krafla Geothermal Power Station .....	20
3.2.2. Vrste kamenca koje se pojavljuju na geotermalnom polju Krafla .....	22
3.2.3. Metode izdvajanja kamenca .....	24
<b>4. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>26</b>
<b>5. POPIS LITERATURE .....</b>	<b>28</b>

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Savitljivi tubing.....	5
<b>Slika 3-1.</b> Platforme na naftnom polju Ekofisk .....	15
<b>Slika 3-2.</b> Geotermalna bušotina Krafla Geothermal Power Station.....	22

## 1. UVOD

Eksploatacija ugljikovodika i geotermalne vode često nailazi na značajne tehničke izazove, među kojima je jedan od najzastupljenijih i najproblematičnijih izdvajanje kamenca. Kamenac, koji se uglavnom sastoji od kalcijevog karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ), magnezijevog karbonata ( $\text{MgCO}_3$ ), barijevog sulfata ( $\text{BaSO}_4$ ) i drugih mineralnih naslaga, stvara se uslijed promjene fizikalno-kemijskih uvjeta unutar bušotina, tubinga i postrojenja za obradu pridobivenih fluida. Proces taloženja kamenca može dovesti do smanjenja protočnosti u proizvodnom sustavu, sužavanjem unutarnjeg promjera tubinga i opreme, čime se otežava normalno funkcioniranje sustava, smanjuje proizvodnja i povećavaju troškovi održavanja. U najgorim slučajevima, taloženje kamenca može dovesti do potpunog čepjenja bušotina i prekida eksploatacije, čime se ugrožava cjelokupna ekonomska isplativost projekata (Bellarby, 2009).

Formiranje kamenca u naftnoj industriji i kod geotermalnih sustava najčešće se događa zbog promjena temperature, tlaka i kemijskog sastava ležišnih ugljikovodika koji protječu kroz bušotinu i ugrađenu proizvodnu opremu. Tijekom eksploatacije ugljikovodika, slojna voda iz ležišta, zasićena različitim mineralima, dolazi u kontakt s proizvodnim cijevima gdje dolazi do smanjenja tlaka i temperature. Te promjene uzrokuju taloženje minerala iz vode, što rezultira formiranjem kamenca. Slično tome, u geotermalnim bušotinama, geotermalna voda, bogata otopljenim mineralima, pri protjecanju prema površini prolazi kroz slične promjene u uvjetima, što dovodi do sličnog problema (Bellarby, 2009). Razumijevanje mehanizama taloženja kamenca ključno je za predviđanje i minimiziranje štetnih učinaka ovog fenomena. Razvoj različitih tehnologija za kontrolu i sprječavanje nastanka kamenca predstavlja ključni dio modernih pristupa u upravljanju bušotinama. Te metode uključuju upotrebu kemijskih inhibitora, mehaničkih metoda čišćenja te, u nekim slučajevima, modifikaciju operativnih uvjeta kako bi se spriječilo samo izdvajanje minerala iz pridobivenih ležišnih fluida. U geotermalnim sustavima, problem kamenca može biti posebno izražen zbog visokog sadržaja otopljenih minerala u vodi koja se koristi za proizvodnju energije (Bellarby, 2009).

Ovaj završni rad podijeljen je u dva dijela. Prvi dio posvećen je teoretskoj analizi fenomena nastanka i taloženja kamenca kao i njegova izdvajanja tijekom eksploatacije

ugljikovodika i geotermalne vode. Detaljno su objašnjeni uzroci koji dovode do formiranja kamenca u naftnim i geotermalnim bušotinama, mehanizmi koji tumače taloženja te vrste kamenca koje se najčešće javljaju. Također, obrađene su različite tehnologije koje se koriste za sprječavanje i uklanjanje kamenca, uključujući kemijske, mehaničke i drugi tehnološki pristupi koji su razvijeni s ciljem očuvanja proizvodne infrastrukture i povećanja operativne učinkovitosti.

Drugi dio rada bavi se analizom dva konkretna primjera polja, jedne naftne bušotine i jedne geotermalne. Na primjeru naftne bušotine prikazano je kako se taloženje kamenca manifestira tijekom eksploatacije nafte, uz detaljan opis specifičnih izazova s kojima se operatori susreću i koje metode koriste za rješavanje problema. S druge strane, na primjeru geotermalne bušotine bit će prikazano kako se kamenac pojavljuje u geotermalnim sustavima, uz opis specifičnih metoda prevencije i uklanjanja istaloženih minerala.

Cilj ovog rada je detaljno istražiti i analizirati procese izdvajanja kamenca tijekom eksploatacije ugljikovodika i geotermalne vode, s posebnim naglaskom na identifikaciju uzroka, mehanizama nastanka te učinkovitih metoda prevencije i uklanjanja kamenca. Također, rad se fokusira na usporedbu izazova i rješenja u industriji nafte i plina u odnosu na geotermalne sustave, kroz analizu konkretnih primjera bušotina iz oba sektora. Time se nastoji pružiti cjelovita slika problema, uz prijedloge za poboljšanje metoda suzbijanja taloženja kamenca, što je ključno za održavanje kontinuiteta proizvodnje i smanjenje operativnih troškova.

## **2. IZDVAJANJE KAMENCA TIJEKOM EKSPLOATACIJE UGLJIKOVODIKA I GEOTERMALNE VODE**

Kamenac utječe na brojne probleme u naftnoj industriji te je potrebno dobro poznavati proces nastanka kamenca, uvjete u kojima nastaje, vrste, mjere za sprečavanje njegovog nastanka i razne načine za uklanjanje kamenca.

### **2.1. Kamenac**

Kamenac predstavlja anorganske krutine koje su se izdvojile iz vode i potom istaložile na određenoj površini. Kamenci su uobičajeni oblik oštećenja formacije, odnosno začepjenja ili ograničenja na perforacijama, filterima, lajneru ili u tubing. Kao i većina problema u proizvodnji koji se odnose na kemizam pridobivenih fluida, oni predstavljaju sigurnosni problem zbog gubitka operativnosti kontrolnih ventila, sigurnosnih ventila ili, u težim slučajevima, zasuna na erupcijskom uređaju. Za predviđanje potencijala izdvajanja kamenca iz slojne vode, potreban je reprezentativni uzorak vode. To zahtijeva istražnu bušotinu koja proizvodi vodu, te da se zagađivači kao što su proizvodni fluid ili bušaći fluid također analiziraju kako bi se uklonile smetnje. Kemijski sastav vode u ležištima koja sadrže ugljikovodike vrlo je različit, u rasponu od vrlo niske ionske jakosti do slanih otopina visokog saliniteta koje sadrže širok raspon različitih iona (Bellarby, 2009). Također, valja napomenuti da ne postoji slojna voda istog sastava.

U ležištu postoji ravnotežno stanje ugljikovodika, tj. sve potencijalne reakcije koje su se odvijale tijekom tisuća ili milijuna godina prije nego je formirano samo ležište su u ravnoteži. Te reakcije odgovorne su za čvrstoću ležišne stijene i promjenu propusnosti ili poroznosti. Također ležišna voda sadrži otopljene soli budući da su neka ležišta bila povezana s morem tijekom njihovog nastajanja. Mnoge vrste sedimenata potječu iz morskog ili drugog bočatog okoliša. Veći salinitet može potjecati od kristalizacije magme budući da (mnoge mineralne rude nastaju na ovaj način). Visoki salinitet također može biti rezultat kontakta s naslagama evaporita koje su nastale isparavanjem drevnih mora.

Evaporiti (npr. solne dolme) uobičajeni su u mnogim dijelovima svijeta, na primjer u Sjevernom moru, Meksičkom zaljevu i Iranu, i često čine dio izolatorskih naslaga na ležištima ugljikovodika. Ravnoteža koja je postojala dugo vremena poremećena je u geološki maloj vremenskoj skali tijekom proizvodnje ugljikovodika. Proizvodnja uzrokuje promjenu tlaka i temperature pri čemu treba imati u vidu i potencijalno miješanje sa drugim



fluidima poput slojne vode iz drugih ležišta ili remontnim fluidom (Bellarby, 2009). Navedene promjene uzrokuju taloženje kamenca.

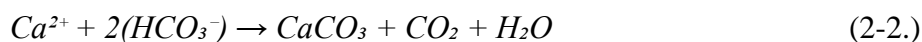
Prema Bellarby-u glavne vrste kamenaca su (Bellarby, 2009):

- **Karbonati** – uglavnom kalcijev karbonat, ali i željezov karbonat;
- **Sulfati** – barijev sulfat, stroncijev sulfat i kalcijev sulfat;
- **Sulfidi** – rjeđe se mogu sresti, ali odnose se na olovov sulfid, cinkov sulfid i željezov sulfid;
- **Soli** - uglavnom natrijev klorid.

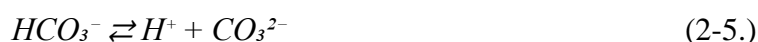
## 2.2. Vrste kamenca i njihovo izdvajanje

### 2.2.1. Karbonatni kamenci

Formiranje kalcijevog karbonata složen je proces koji ovisi o tlaku, temperaturi, sastavu vode i ugljikovom dioksidu ( $CO_2$ ). Kalcit nastaje reakcijom kalcijevih ( $Ca^{2+}$ ) iona s bikarbonatnim ( $HCO_3^-$ ) ili karbonatnim ( $CO_3^{2-}$ ) ionima prema sljedećim reakcijama:



Vetter i Kandarpa (Bellarby, 2009) navode primjer potpune blokade protoka kroz tubing unutar nekoliko dana, uzrokovan izdvajanjem kamenca. Pri uobičajenim pH uvjetima većine naftnih ležišta karbonatni ioni su vrlo rijetki, stoga reakcija (2-2.) predstavlja glavnu reakciju koja stvara kalcijev karbonat. Bikarbonatni ion je u ravnoteži s  $CO_2$  prema sljedećim reakcijama (Bellarby, 2009):



Ove reakcije mogu ići u oba smjera ovisno o parametrima poput ležišnog tlaka i temperature te pH vrijednosti. Smjer odvijanja ravnotežne kemijske reakcije određuje se pomoću *Le Chatelierov principa*. Ovaj princip navodi: ako je kemijski sustav u ravnoteži, svaka promjena koncentracije, volumena, tlaka ili temperature uzrokovat će odvijanje reakcije u smjeru koji dovodi do ponovne uspostave kemijske ravnoteže. Na primjer, ako se

$CO_2$  ukloni iz sustava, reakcija (2-2) se nastavlja, a kalcijev karbonat se taloži ako postoji dovoljno kalcija da formira zasićenu otopinu (Bellarby, 2009). Povećanje temperature potiče formiranje kalcijevog karbonata, a to je razlog zašto se bijele naslage formiraju u čajnicima u područjima s tvrdom vodom.

U usporedbi s talogom barijevog sulfata, kalcit je mekši i lako reagira s većinom kiselina, poput klorovodične kiseline. Klorovodična kiselina se često koristi za uklanjanje kalcita zbog brze reakcije i niskih troškova. S druge strane druge kiseline, poput organskih kiselina, mogu biti manje korozivne i reagirati sporije (Bellarby, 2009).

Uz pretpostavku odgovarajuće inhibicije korozije, talog kalcita u proizvodnim cijevima može se uspješno ukloniti tretmanom s kiselinom i namakanjem. Uklanjanje taloga izdvojenog na situ, lajneru ili u blizini kanala bušotine ovisit će o taloženju prije nego što dođe do potpune blokade. Kao i kod svake kemijske obrade u pribušotinskoj zoni problem kontakta kiseline s talogom postaje složeniji s dugim dionicama kanala bušotine kroz ležište. S obzirom na učinkovitost kiseline u uklanjanju kalcita, prva reakcija pri susretu s oštećenjem formacije je utiskivanje kiseline. Prije nego što se odluči na ovaj korak, vrijedi razmotriti druge mogućnosti i osigurati da kiselina neće uzrokovati druge probleme, poput taloženja asfaltna, koroziju proizvodne opreme, stvaranje emulzija, taloženja željeza i potencijalnu proizvodnju pijeska (otapanjem kalcita u cementnom vezivu ležišne stijene). Otapanje karbonata tijekom tretmana kiselinom može ostaviti netopive produkte kemijske reakcije, poput gipsa, koji se talože s kalcitom i mogu uzrokovati dodatno oštećenje ležišne stijene (Bellarby, 2009). Uklanjanje kiseline, primjerice, sa savitljivim tubingom, može biti manje štetno u tim okolnostima. Slika 2-1. prikazuje savitljivi tubing na postrojenju.



**Slika 2-1.** Savitljivi tubing (Avegenii, n.d.)

Savijljivi tubing u rudarstvu i naftnoj industriji predstavlja sustav najčešće čeličnih cijevi namotan na bubanj koji se koristi za različite operacije unutar bušotina. Ova tehnologija omogućuje izvođenje različitih zadataka bez potrebe za izvlačenjem proizvodne opreme iz bušotine i njene ponovne ugradnje, što štedi vrijeme i troškove. Potrebno je također optimizirati količinu kiselinske obrade. Kiselinska obrada iziskuje korištenje inhibitora korozije. Ukoliko kiselina uđe u formaciju, inhibitor se adsorbira na stijenu i može biti štetan ili smanjiti koncentraciju inhibitora u neiskorištenoj (nepotrošenoj) kiselini, što može dovesti do korozije cijevi i procesne opreme (Bellarby, 2009).

### 2.2.2. Sulfatni kamenci

Sulfatni kamenci sastoje se od sulfatnih soli metala prvenstveno barija, stroncija i kalcija. Topivost ovih soli opada s povećanjem atomskog broja. Prisutnost sulfatnih taloga berilija i magnezija je malo vjerojatna, ako ne i nepoznata, u proizvodnji nafte zbog njihove visoke topljivosti u vodi, iako se visoke koncentracije magnezija često susreću u ležištima s izrazito slanim slojnim vodama (Bellarby, 2009). Većina slojne vode ima nisku koncentraciju sulfata. Međutim, morska voda je bogata sulfatima. Miješanjem morske vode (ili fluida za opremanje i održavanje bušotina pripremljenih od morske vode) s slojnim vodama može doći do formiranja sulfatnih soli kalcija, stroncija ili barija. Barijev sulfat,  $BaSO_4$ , je najjednostavniji za objašnjenje i također najproblematičniji (Bellarby, 2009). Gotovo je netopiv u slojnoj vodi (2,3 mg/l pri 25 °C) u usporedbi s kalcijev karbonatom (53 mg/l pri 25°C) (Bellarby, 2009). Iako topljivost raste s povećanjem temperature, tlaka i saliniteta, ona i dalje ostaje vrlo niska. U prvoj aproksimaciji, količina istaloženog barijevog sulfata ovisi samo o koncentraciji barija i sulfata. Na primjer, ako se fluid iz ležišta pomiješa u jednakim omjerima s tipičnom morskom vodom tada će biti 4,73 mmol/ kg barija (relativna molekulska masa 137,34) i 28,12 mmol/ kg sulfata (relativna molekulska masa 96,04). Stoga postoji višak sulfata jer 1 mol barijevog sulfata uključuje 1 mol barijevog kationa i za 1 mol sulfatnog aniona ( $Ba^{2+}SO_4^{2-}$ ). Pri omjeru 5,95 dijelova slojne vode i 1 dio morske vode, što je 86% slojne vode, sav barij i sulfat će se potrošiti i potencijal taloženja će biti najveći s 945 mg taloga za svaki kilogram morske vode (Bellarby, 2009).

Tijekom procesa zavodnjavanja ležišta s morskom vodom, sklonost izdvajanju sulfata bit će niska jer se radi o izričito originalnoj slojnoj vodi. Kada dođe do proboja morske vode, sklonost taloženju brzo će se povećati i ostati visoka dok se iz pojedinih zona ili perforacija proizvodi mješavina morske vode i slojne vode. Kasnije u životnom vijeku bušotine,

sklonost izdvajanju barijevog kamenca će se smanjiti, osobito kada prestane proizvodnja slojne vode. Talog će se formirati gdje se fluidi miješaju, budući da je reakcija vrlo brza (Bellarby, 2009). Stoga će područje pribušotinske zone, perforacija (ili filtera), uključujući lajner i donje dijelove proizvodne opreme, biti izloženi taloženju. Važno je napomenuti da se glavna distribucija fluida događa u vertikalnom smjeru, pri čemu je vertikalna propusnost najčešće mnogo manja od horizontalne propusnosti. Stoga je bušotina (lajner/filtar) najviše izložena miješanju fluida. S obzirom na način završnog opremanja bušotine, najosjetljiviji su sustavi koji uključuju postavljanje filtra, posebno oni s malim površinama otvora filtra. Sklonost taloženju u višim dijelovima bušotine bit će manja, jer će se svi nespojivi fluidi već pomiješati i reagirati. Autori Wylde i suradnici (Bellarby, 2009) izvještavaju da je najkritičnije mjesto za taloženje barijevog sulfata što naravno ovisi o složenoj interakciji između temperature, tlaka, miješanja fluida, potencijala apsorpcije i supersaturacije 60 metara iznad perforacija. Drugo područje za formiranje barijevog sulfata bit će proizvodni razdjelnik bušotina, s nekim bušotinama koje proizvode uglavnom slojnu vodu (višak barija), i onih drugih koje proizvode morsku vodu ili mješavine morske vode i slojne vode (višak sulfata) (Bellarby, 2009).

Priroda taloga barijevog sulfata (barit) varira od mekog do vrlo tvrdog, ovisno o kemijskom sastavu otopine iz koje se izdvojio i okruženju taloženja. Barit je velike gustoće i općenito teško ga je ukloniti. Talози kalcijevog sulfata (gips i anhidrit) obično su tvrdi, ali manje gustoće od barita. Kemijski, za razliku od kalcita, sulfatni talози su netopivi u kiselinama, a samo kelatni agensi nude određeni stupanj otapanja. Kelatni agensi su kemijski kompleksni spojevi u kojima je metalni atom (ili ion) koordinacijski povezan s dva ili više atoma iste molekule. Pritom molekula okruži metalni atom pa nastaju prstenaste strukture. Spojevi s takvim molekulama nazivaju se kelatni agensi. Klorofil, hemoglobin i porfirin su primjeri kelatnih spojeva. Kako su kelati, osobito oni s peteročlanim prstenom, vrlo stabilni, većinom slabo topljivi spojevi, dodavanje kelatnih agenasa i stvaranje kelata prikladan je način za uklanjanje metalnih atoma iz neke sredine. To se primjenjuje za uklanjanje kalcijevih iona u mekšanju vode (Hrvatska enciklopedija, 2013-2024).

Sulfatni talog može se uspješno ukloniti fizički primjenom glodača ili mlaznim čišćenjem. Radni fluid poput morske vode treba biti inhibiran kako bi se spriječilo dodatno taloženje. Drugi alati za intervenciju uključuju fluidne oscilatore (u kombinaciji s tekućinama za uklanjanje taloga) i glodače na žici za uklanjanje manjih taloga (Bellarby, 2009). Perforacije se također mogu ponovo izraditi kako bi se zaobišao talog u blizini bušotine. Uklanjanje taloga izvan perforacija, na primjer iz pukotine ili istaloženog preko

filtera, je teško jer mali broj kemikalija lako otapa barijev sulfat. Snažni kelatni agensi poput EDTA (engl. *Ethylenediaminetetraacetic acid*) i DPTA (engl. *diethylenetriaminepentaacetic acid*) (Bellarby, 2009) mogu se koristiti, s ili bez katalizatora odnosno akceleratora (Bellarby, 2009). Kao i kod svake kemijske reakcije, reaktanti trebaju biti u neposrednom kontaktu s materijalom koji se otapa – u ovom slučaju, s talogom. Nažalost, kako stehiometrija reakcije (relativni omjeri reaktanta) tako i stupanj izloženosti otapala glavnom talogu (tj. mali kontaktni prostor) nisu povoljni za brzo uklanjanje, čak i pri visokim temperaturama, potreban je adekvatan kontaktni period (period namakanja). Kelatni agensi predstavljaju ekološki rizike i imaju određena ograničenja, ali sada su dostupne ekološki prihvatljivije alternative (Bellarby, 2009). Ako je talog prekriven ugljikovodikom, otapala poput ksilena, moraju se dodati u postupak obrade kako bi se omogućilo otapanje u vodenom mediju. Ako su pore ležišne stijene, filter ili perforacije blokirani, kemijski kontakt s talogom je nemoguć (Bellarby, 2009).

### 2.2.3. Sulfidni kamenac

Metalni sulfidni kamenci, iako manje česti od karbonatnih i sulfatnih kamenaca, još uvijek predstavljaju opasnost za neke proizvodne bušotine i ležišta. Talози olova, cinka i željeza u obliku sulfida zabilježeni su, posebno u visoko-temperaturnim ležištima i ležištima s fluidom koji sadrže veliki udio soli (Bellarby, 2009). Cinkovi i olovovi sulfidi mogu biti prisutni u ležištu; u obliku olovnog sulfida odnosno galenita, te cinkovog sulfida odnosno sfalerita. Ovi minerali reagirat će sa slojnom vodom (i moguće injektiranom vodom), stvarajući ionske oblike cinka i olova u koncentracijama do 70 ppm olova i 245 ppm cinka. Cink i olovo su toksini, pa čak i bez problema s taloženjem, sigurno zbrinjavanje slojne vode koja ih sadržava predstavlja problem. Cink se na primjer, bioakumulira u morskim organizmima, osobito u školjkama. Željezo može biti prisutno u formaciji kao željezov karbonat. Također se može unijeti u ležište i kao nusproizvod korozije. Mali količine željezovog sulfida mogu biti korisne, tj. dolazi do formiranja zaštitnog sloja taloga na metalnim površinama koji može ublažiti opću koroziju, ali pogoršati rupičastu ili točkastu koroziju (Bellarby, 2009). Rupičasta korozija je specifična vrsta korozije koja se javlja na metalnim površinama, posebno u okruženjima s visokim sadržajem klorida ili kiselina. U rudarstvu i naftnoj industriji, rupičasta korozija može imati značajan utjecaj na integritet i dugovječnost metalnih komponenti proizvodnog sustava, kao što su cijevi, spremnici i oprema za obradu pridobivenih fluida. Sulfidni ioni obično dolaze iz otopljenog  $H_2S$ . Autori

Biggs i sur. (1992.) izvještavaju da razine  $H_2S$  niže od svega 2 ppm mogu biti dovoljne za stvaranje problema s sulfidnim talozima (Bellarby, 2009).

Talozi olovovog i cinkovog sulfida su izrazito netopljivi. Njihova topljivost smanjuje se s povećanjem pH i smanjenjem temperature, uz samo minimalne promjene zbog varijacija tlaka. Moguće je inhibirati stvaranje taloga sulfida (Bellarby, 2009), iako inhibitori koji su uspješni u borbi protiv karbonatnih ili sulfatnih taloga daju jednake rezultate kod inhibiranja stvaranja sulfida ili zahtijevaju veće koncentracije inhibitora. Uklanjanje sulfida moguće je s kiselinom, pri čemu je željezov sulfid (u obliku  $FeS$ ) najlakše otopiti, dok je olovov sulfid obično najteže ukloniti. Autori Nasr-El-Din i sur. (2001. g.) ukazuju na velike varijacije u topljivosti željezovih sulfida u kiselini ovisno o mineraloškom sastavu. Te topljivosti variraju od 3 % do 85 % u istoj bušotini uz upotrebu 20 % klorovodične kiseline (Bellarby, 2009). U ovom slučaju, mlazno ispiranje s kiselinom uspješno je korištena metoda koja kombinira mehaničko i kemijsko djelovanje. Mlazno ispiranje s kiselinom u rudarstvu i naftnoj industriji odnosi se na tehniku koja se koristi za čišćenje i uklanjanje taloga ili oštećenja unutar bušotina ili cijevi primjenom kiseline pod visokim tlakom. Sulfidi su također često prekriveni organskim materijalom, što otežava kontakt s kiselinom. Korištenje kiseline, osobito u bušotinama s visokim tlakom i temperaturom, također je problematično (Bellarby, 2009).

Klorovodična kiselina problematična je zbog korozije uzrokovane kloridima, dok organske kiseline mogu biti spore u reakciji. Autori Orski i suradnici (2007.g.) izvještavaju o korištenju 15% octene kiseline za uspješno uklanjanje sulfida iz polja Elgin i Franklin (Bellarby, 2009). Nusproizvod reakcije sulfida s kiselinom je  $H_2S$ , koji može uzrokovati probleme vezane za sigurnosti i koroziju uzrokovanu naprezanjem. U tom slučaju trebalo bi dodati sredstva za uklanjanje  $H_2S$  kako bi se smanjili ovi rizici. Visoki tlakovi u ovim bušotinama također dovode do problema stvaranja hidrata tijekom obrade. Elementarni sumpor također može nastati nakon obrade. Korištenje nedovoljne količine kiseline može uzrokovati ponovno taloženje željezovog sulfida kada pH ponovno poraste (Bellarby, 2009). Ponovno taloženje željeza može se spriječiti dodavanjem sredstva za vezanje željeza. U nekim slučajevima, izotop olova ( $^{210}Pb$ ) je povezan s naslagama sulfida.  $^{210}Pb$  je radioaktivan i, kao i kod svih naslaga male gustoće (engl. *Low specific activity*, LSA) povezanih s radioaktivnim materijalima, predstavlja ozbiljan problem.  $^{210}Pb$  može se pojaviti u sulfatskim naslagama jer je nusproizvod raspada izotopa radija ( $^{226}Ra$ ). Međutim, većina naslaga je relativno recentna u odnosu na vrijeme poluraspada radija, stoga koncentracije izotopa olova 210 ostaju relativno niske. Moguće je naići na velike komade elementarnog

olova u proizvodnom sustavu, iako nije poznato da takav događaj uzrokuje blokadu u bušotini. Smatra se da taloženje elementarnog olova zahtijeva koroziju čelika, stoga bi korištenje legura otpornijih na koroziju trebalo smanjiti taloženje elementarnog olova. Alternativno, olovo se može pojaviti u obliku vrlo tankih (gotovo nevidljivih) naslaga ili pomiješano s drugim naslagama, kao što su olovni sulfidi (Bellarby, 2009).

#### 2.2.4. Soli

Naslage soli natrijevog klorida su vrsta kamenca koji se stvara kada voda postane zasićena natrijevim kloridom (halit). Ovaj problem nije čest i uvjetovan je postojanjem vodene otopine soli s visokim koncentracijama soli ili male količine vode. Čini se da je češće kod plinskih bušotina, no izvještava se i o prisutnosti na nezasićenim naftnim ležištima (Bellarby, 2009). Izdvajanje soli može uzrokovati dramatične padove u proizvodnosti bušotina. Autori Place i Smith (1984. g.) izvještavaju o gotovo 50% smanjenju brzine proizvodnje u roku od 6 dana na određenom postrojenju uzrokovanog izdvajanjem soli (Bellarby, 2009). Slojna voda postaje zasićena solima iz niza različitih razloga. Prvo, promjene u tlaku, ali prvenstveno temperaturi utječu na topivost soli u slojnoj vodi. Općenito, snižavanje temperature potiče kristalizaciju. Niži tlakovi također potiču kristalizaciju, iako je taj učinak slab osim ako su temperature niske. Za razliku od fluida za proizvodno opremanje bušotine, u plinskim ležištima, slojna voda je u kontaktu s hidrokarbonskim plinovima, posebno metanom. Ovi plinovi su obično zasićeni vodom u ležišnim uvjetima. Kako se tlak i temperatura mijenjaju, količina vode koju plinovi mogu zadržati će se promijeniti. Također, topliji plinovi i plinovi pri nižem tlaku zadržavaju više vode (Bellarby, 2009). Isparavanje također ovisi o salinitetu vode, tj. s porastom saliniteta, isparavanje se smanjuje. Prisustvo  $CO_2$  i  $H_2S$  značajno utječe na topivost (Bellarby, 2009).

U ležištima, dominantni mehanizam za taloženje halita je smanjenje slojnog tlaka kombinirano s proizvodnjom plina i zasićenom ili gotovo zasićenom slojnom vodom. Plin je taj koji dehidrira (isparava) slojnu vodu, stvarajući veću koncentraciju soli i uvjete za eventualno njeno taloženje. U slučaju potpunog zasićenja rezidualnom vodom (nema mobilne vode), čestice stijene bit će prekrivene malim slojem halita koji će malo utjecati na produktivnost ležišta. Međutim, ako postoji kontinuirani dotok vode uzrokovan tlačnim gradijentom uokolo kanala bušotine, sol će se nakupljati dok ne blokira porni prostor. Kao i kod mnogih problema s kamencem, kritična područja blizu bušotine bit će najviše pogođena, pri čemu se fenomen samo pojačava (Bellarby, 2009).

Predviđanje magnitude taloženja soli komplicirano je i omjerom voda i plin (Bellarby, 2009). Uz isparavanje, niski omjeri vode i plina će dovesti do veće vjerojatnosti da nezasićena slojna voda postane zasićena – manji volumen za isparavanje. Kod zasićene slojne vode, izdvajanje soli će se dogoditi bez obzira na omjer voda i plin. U tubingu, učinak temperature će biti složeniji s dva suprotna fenomena. Prvo, hlađenje će potaknuti kondenzaciju vode iz plina, čime se smanjuje salinitet pridobivene vode. Ovaj blagotvoran učinak će biti važan ako je omjer voda i plin vrlo nizak. Drugo, slojna voda može prići temperaturi kristalizacije. Ovaj utjecaj bit će neovisan o omjeru vode i plina (Bellarby, 2009).

Za razliku od nekih naslaga, taloženje se odvija ubrzo nakon zasićenja, pri čemu Nieuwland i Collins (2004. g.) izvještavaju o taloženju halita već pri 5 % prekomjernog zasićenja (prema Bellarby, 2009). Moguće je otkriti taloženje halita u bušotini smanjenjem koncentracije natrijevog klorida u usporedbi s topivijim solima kao što je kalijev klorid. Pad omjera natrij-kalij ili natrij-litij mjereno iz proizvedene vode može upućivati na taloženje halita u bušotini. Za razliku od isparavanja morske vode pri atmosferskom tlaku, pri višim tlakovima u ležišnim uvjetima, moguće je da se halit taloži prije kalcijevog karbonata i gipsa (Bellarby, 2009).

Postoji mogućnost izdvajanja halita iz tragova natrijevog klorida prisutnog u vrućem, kiselom plinu pod visokim tlakom iako nisu dostupni terenski dokazi (Bellarby, 2009).

Do relativno nedavno, jedina metoda za inhibiciju taloženja soli bila je razrjeđivanje vodom. Konvencionalni inhibitori koji štite od nukleacije i rasta kristala karbonata i sulfata nemaju učinka na halit (Bellarby, 2009). Autori Szymczak i suradnici (2007.g.) spominju posebni polimerni inhibitor koji se može primijeniti kroz proces injektiranja inhibitora ili injektiranjem kroz kapilarne cijevi. Uobičajeni dodatak isplake za bušenje kroz naslage soli kao i sredstvo protiv nakupljanja kristala kuhinjske soli, je kalijev heksacianoferrat, koji se može koristiti kao inhibitor (Bellarby, 2009).

Za ispiranje soli, uobičajena je praksa pumpanje vode kroz prostor između cijevi i stijenke kanala bušotine (npr. bušotina na kopnu bez pakera). Paker je dio dubinske opreme koji se koristi u opremanju naftnih i plinskih bušotina kako bi se stvorila čvrsta barijera između unutarnjeg i vanjskog dijela cijevi u bušotini. Za primjenu na moru ili druga područja gdje zahtjevi za barijerama nalažu upotrebu pakera, svježa voda može se pumpati kroz prostor između cijevi i stijenke kanala bušotine te kroz protupovratni ventil u vreteno s bočnim džepom. Alternativa je pumpanje vode kroz cijev, što je relativno jednostavno kod plinskih bušotina – iako zahtijeva da bušotina bude ugušena (Bellarby, 2009).



Jasno je da s bilo kojim sustavom za ispiranje naslaga soli s vodom, voda mora biti kompatibilna s tubingom, zaštitnim cijevima i ležišnim fluidima. U praksi to znači da fluid ne smije sadržavati kisik, a ako se koristi morska voda, trebalo bi ukloniti sulfate kako ne bi došlo do neželjenih reakcija (Bellarby, 2009). Morska voda je 5-10 puta nezasićenija u odnosu na vodenu otopinu halita (Bellarby, 2009).

Zaključno u teoretskom dijelu ovog završnog rada valja napomenuti kako se u bušotinama često mogu pojaviti različite vrste kamenca, a svaka vrsta ima specifične karakteristike te samim tim zahtijeva drugačije metode uklanjanja. Kalcit se najčešće stvara kada je voda zasićena kalcijem i karbonatom. Ova vrsta kamenca obično se javlja u naftnim i plinskim bušotinama, gdje voda iz ležišta može sadržavati visoke koncentracije ovih minerala. Kalcit se može relativno lako ukloniti upotrebom kiselina kao što je klorovodična kiselina ili mehaničkim metodama poput glodanja.

S druge strane, sulfati, uključujući gips i anhidrit, mogu uzrokovati ozbiljne probleme u bušotinama jer se formiraju u prisutnosti sulfata. Ovi minerali često nastaju kao rezultat reakcija s vodom bogatom sulfatima i teže se uklanjaju. Za uklanjanje sulfata često su potrebne specijalizirane kemikalije, uključujući kelatne agense i druga sredstva za otapanje.

Barijev sulfat, poznat i kao barit, nastaje kada su koncentracije barija i sulfata u vodi visoke. Ova vrsta kamenca je vrlo slabo topiva i najčešće se pojavljuje u ležišnim fluidima s visokom koncentracijom soli i visokotemperaturnim ležištima. Uklanjanje barita je izazovno i često zahtijeva upotrebu snažnih kelatnih agenasa ili mehaničkih metoda kao što je glodanje.

Halit se formira kada je voda zasićena natrijevim kloridom. Ovo se obično događa kod slojnih voda visokog saliniteta i pri promjenama temperature i tlaka. Uklanjanje halita može biti teško, a tradicionalne metode uključuju pranje vodom ili korištenje specijaliziranih inhibitora.

Metalni sulfidi, uključujući olovov i cinkov sulfid, mogu se formirati u visokotemperaturnim i visoko-slanim uvjetima. Ovi sulfidi često uzrokuju probleme u proizvodnji, a uklanjanje metalnih sulfida obično zahtijeva primjenu kiselina i specijaliziranih kemikalija. Neki slučajevi zahtijevaju korištenje dodatnih agenasa za sprečavanje ponovnog taloženja.

Metode za uklanjanje kamenca uključuju kemijsko i mehaničko uklanjanje. Kemijsko uklanjanje često se postiže upotrebom kiselina, dok specijalizirani kemijski agensi mogu biti potrebni za specifične vrste kamenca. Mehaničko uklanjanje uključuje metode poput glodanja ili mlaznog ispiranja za fizičko uklanjanje kamenca. U mnogim slučajevima može

biti potrebna kombinacija kemijskih i mehaničkih metoda za učinkovito uklanjanje kamenca, posebno u složenim situacijama gdje samo jedna metoda nije dovoljna. Razlikovanje vrsta kamenca koji se formiraju u određenoj bušotini i primjena odgovarajućih metoda za njihovo uklanjanje ključno je za održavanje uvjeta za kontinuiranu proizvodnju ugljikovodika i geotermalne vode.

### **3. PRIMJERI IZDVAJANJA KAMENCA NA EKSPLOATACIJSKIM POLJIMA**

Kako bi se bolje razumjelo kako izdvajanje kamenca iz naftnih i geotermalnih bušotina utječe na proizvodnost bušotina, životni vijek, opremu i koje dodatne troškove i izazove donosi, najbolje je uzeti konkretne primjere iz prakse. U nastavku se nalazi primjer za naftno polje te za geotermalno polje

#### **3.1. Izdvajanje kamenca na naftnim bušotinama**

Za pojašnjenje problema koji uzrokuje izdvajanje kamenca na eksploatacijskom polju uzet je primjer naftnog polja Ekofisk

##### **3.1.1. Općenito o eksploatacijskom polju Ekofisk**

Polje Ekofisk je jedno od najvažnijih naftnih polja u Sjevernom moru i predstavlja značajan dio norveške energetske industrije. Otkriveno je 1969. godine, a proizvodnja je započela 1971. godine. Nalazi se u norveškom sektoru Sjevernog mora, točnije u Bloku 2/4, na dubini mora oko 70 metara. Ležište je smješteno u geološkoj formaciji poznatoj kao Ekofisk, koja se proteže na više od 500 kvadratnih kilometara. Geološki gledano, ležište Ekofisk je smješteno u slojevima krečnjaka starim otprilike 400 milijuna godina. Ovo ležište formirano je unutar geološkog sloja poznatog kao kreda, koji je bogat fosilima i poznat po svojoj poroznosti i sposobnosti za skladištenje nafte i plina. Strukturno ležište je u obliku antiklinale, što omogućava akumulaciju nafte i plina. Ova struktura je rezultat tektonskih procesa koji su uzrokovali stvaranje poroznih slojeva, s mnogo praznina, što je omogućilo prolazak fluida poput pare ili plina kroz stijene. Takva struktura može biti pogodna za formiranje naftnih ležišta jer porozni slojevi stijena mogu zadržavati naftu ili plin, omogućavajući njihovu akumulaciju u pojedinim dijelovima strukture (Norwegianpetroleum.no, n.d.). Polje Ekofisk je jedno od prvih velikih eksploatacijskih polja ugljikovodika u Sjevernom moru i odigralo je ključnu ulogu u razvoju naftne industrije u tom području. Eksploatacija se odvija kroz složen sustav naftnih platformi. Polje Ekofisk ima nekoliko platformi koje su dio kompleksa, uključujući glavne platforme za proizvodnju

ugljikovodika, platforme za kompresiju plina i platforme za skladištenje. Proizvodnja na polju Ekofisk obuhvaća eksploataciju nafte i plina iz dubokih slojeva ležišta. Nafta se transportira na kopno putem cjevovoda ili tankerima, dok se plin može obrađivati na licu mjesta ili transportirati u druga postrojenja za obradu i distribuciju ugljikovodika. Polje Ekofisk ima razvijenu infrastrukturu za upravljanje proizvodnjom i obradom nafte i plina, uključujući napredne tehnologije za nadzor i upravljanje bušotinama, kontrolu tlaka i temperature te optimizaciju proizvodnih procesa (Norwegianpetroleum.no, n.d.)

Kroz godine eksploatacije, polje Ekofisk je prošlo kroz brojne faze modernizacije i nadogradnje, kako bi se prilagodilo novim tehnologijama i zahtjevima industrije. Razvoj novih tehnologija omogućio je poboljšanje učinkovitosti proizvodnje i smanjenje utjecaja aktivnosti na okoliš. Na primjer, napredni sustavi za otkrivanje curenja plina i tehnologije za upravljanje otpadom doprinose održivosti i sigurnosti proizvodnje. Nadalje, polje Ekofisk ima značajnu povijest i ulogu u energetskej industriji na području Sjevernog mora. Kao jedno od najranijih velikih polja u ovom području, pružilo je osnovu za daljnji razvoj tehnologije eksploatacije ležišta nafte i plina u Sjevernom moru. Danas se poljem upravlja kao dijelom većeg skupa naftnih i plinskih polja u tom području, a njegova proizvodnja ostaje ključna za opskrbu naftom i plinom u Europi. Upravljanje poljem Ekofisk zahtijeva stalno praćenje i prilagodbu operacija kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost proizvodnje. S obzirom na kompleksnost polja i izazove u proizvodnji, razvoj novih tehnologija i strategija za upravljanje resursima igra ključnu ulogu u održavanju dugoročne uspješnosti ovog važnog energetskeg projekta (Norwegianpetroleum.no, n.d.). Naftne platforme na polju Ekofisk prikazane su na Slici 3-1.



**Slika 3-1.** Platforme na naftnom polju Ekofisk  
(Hester, 2019)

### 3.1.2. Vrste kamenaca

Polje Ekofisk, kao jedno od najvažnijih naftnih polja u Sjevernom moru, poznat je po svojoj kompleksnoj geološkoj strukturi i prisutnosti različitih vrsta kamenaca (Hermansen, 2008). Ovo eksploatacijsko polje se suočava s brojnim izazovima vezanim uz stvaranje i izdvajanje kamenaca, koji mogu značajno utjecati na učinkovitost proizvodnje i rad bušotina. U nastavku ovog poglavlja kratko su opisane, specifične vrste kamenaca koje se izdvajaju na polju Ekofisk, njihovo porijeklo i količine u kojima se pojavljuju.

- Kalcit ili kalcijev karbonat ( $CaCO_3$ ), jedna je od najčešćih vrsta kamenca koji se mogu pojaviti na polju Ekofisk. Specifično je da se pojavljuje u pješćanim slojevima i slojevima krede. Kalcit se formira kada voda s visokim sadržajem otopljenog kalcija i bikarbonata dođe u kontakt s geološkim slojem i uzrokuje taloženje kalcijevog karbonata. Na polju Ekofisk, kalcit je prisutan u značajnim količinama, često u obliku slojeva ili naslaga unutar ležišta. Količina kalcita može varirati ovisno o specifičnoj lokaciji unutar polja (ležišta) i uvjetima proizvodnje. U nekim dijelovima ležišta, posebno u dijelovima s visokim temperaturama i povišenim tlakovima, količine kalcita mogu biti veće, što može uzrokovati značajne probleme u proizvodnji.
- Kalcijev sulfat ( $CaSO_4$ ), pojavljuje se na polju Ekofisk kao rezultat reakcija između sulfata prisutnih u vodi i kalcija u stijenama. Drugi naziv za njega je gips, a on se najčešće pojavljuje u slojevima blizu površine, gdje se može formirati kroz procese isparavanja ili kao sekundarni mineral. Iako je manje prisutan u odnosu na kalcit, gips odnosno kalcijev sulfat može se akumulirati u značajnim količinama u određenim dijelovima bušotine. Njegova prisutnost može uzrokovati složene probleme u eksploataciji nafte, jer ga je teško ukloniti iz proizvodnih cijevi i bušotina.
- Barit ili barijev sulfat ( $BaSO_4$ ), je još jedan kamenac koji se može naći na polju Ekofisk. Barit se formira u uvjetima visoke koncentracije barija i sulfata u vodi. Na polju Ekofisk, barit se često pojavljuje u područjima gdje se miješaju različite vrste voda, kao što su to slojne vode i morska voda. Barit je poznat po svojoj visokoj gustoći i otpornosti na kemijske reakcije, što ga čini vrlo teškim za uklanjanje. Njegova prisutnost može biti značajna, posebno u slojevima gdje se javljaju visoke koncentracije sulfata i barija.

- Hematit ili željezov(III) oksid ( $Fe_2O_3$ ), može se pojaviti na polju Ekofisk kao rezultat oksidacije željeza prisutnog u stijenama ili kao sekundarni mineral. Hematit je često prisutan u slojevima gdje dolazi do interakcije između željezovih spojeva i kisika. Iako nije najčešći oblik kamenca, hematit se može naći u određenim dijelovima bušotine i može uzrokovati probleme u eksploataciji nafte zbog svoje tvrdoće i sposobnosti da se akumulira u cijevima i opremi.
- Vodikov sulfid ( $H_2S$ ) može se također pronaći na Ekofisk polju, iako nisu klasični kamenci u pravom smislu te riječi.  $H_2S$  se može otapati u vodi i formirati sulfide, koji se mogu akumulirati u ležištu. Vodikov sulfid može uzrokovati stvaranje sulfida poput željezo-sulfida ( $FeS$ ) u prisutnosti željezovih spojeva. Sulfidi su često prisutni u područjima gdje su visoke koncentracije  $H_2S$ , i mogu uzrokovati probleme u opremi zbog svoje sposobnosti da reagiraju s metalima i stvaraju koroziju te tako uništavaju proizvodnu opremu.

Prisutnost i količine ovih kamenaca mogu značajno varirati ovisno o specifičnoj lokaciji unutar ležišta odnosno polja, sastavu stijena na polju i uvjetima eksploatacije nafte. Ukratko, specifični kamenci i njihova količina igraju značajnu ulogu u proizvodnji i upravljanju resursima na polju Ekofisk. Razumijevanje njihovih svojstava, prisutnosti i količina pomaže u optimizaciji operacija i rješavanju problema povezanih s izdvajanjem kamenca što u konačnici može poboljšati eksploataciju ugljikovodika iz ležišta. Na primjer, u određenim dijelovima polja, koncentracije kalcita mogu doseći između 5% i 15% volumena ležišne stijene, ovisno o specifičnim uvjetima i kompoziciji formacije. Kalcit se najčešće pojavljuje u pješčanim slojevima i slojevima krede, a njegova prisutnost može uzrokovati značajne probleme zbog taloženja u cijevima i proizvodnoj opremi. Količina barita može doseći između 3% i 10 % volumena ležišne stijene u određenim dijelovima polja. Barit je poznat po svojoj gustoći i otpornosti na kemijske reakcije, što ga čini značajnim problemom zbog poteškoća s uklanjanjem. Hematit se pojavljuje u manjoj količini na polju Ekofisk, obično u rasponu od 1% do 3% volumena ležišne stijene. Hematit se formira kroz oksidaciju željeza u stijenama i može se naći u slojevima gdje dolazi do interakcije između željezovih spojeva i kisika. Iako nije najčešći kamenac, prisutnost hematita može uzrokovati probleme u eksploataciji zbog svoje tvrdoće. Kao što je već ranije spomenuto sulfidi, uključujući željezo-sulfide ( $FeS$ ), mogu se pojaviti na polju Ekofisk, ali u vrlo varijabilnim količinama. U područjima s visokom koncentracijom vodikovog sulfida ( $H_2S$ ), sulfidi mogu doseći između 2% i 5 % volumena ležišne stijene. Ove količine mogu varirati ovisno o specifičnim uvjetima i koncentracijama  $H_2S$ . Sulfidi mogu uzrokovati ozbiljne probleme s opremom koja

se koristi u naftnoj bušotini zbog njihove sposobnosti da reagiraju s metalima i na taj način uzrokuju koroziju.

### 3.1.3. Metode uklanjanja kamenca koji se izdvaja na polju Ekofisk

Na polju Ekofisk, koje je jedno od najvećih i najstarijih naftnih polja u Norveškom sektoru Sjevernog mora, uklanjanje kamenca predstavlja značajan izazov zbog prisutnosti različitih vrsta kamenaca. U nastavku su detaljno opisane metode uklanjanja pojedinih vrsta kamenca, uključujući kalcit, gips, barit, hematit i sulfide, koji se pojavljuju na ovom polju.

- Kalcit

Na polju Ekofisk naslage kalcita uklanjaju se kemijski budući da se kalcit se lako otapa u kiselinama. Najčešće korištena kiselina za uklanjanje kalcita na polju Ekofisk je kloridna ili solna kiselina (*HCl*). Čišćenje kiselinama uključuje primjenu kloridne kiseline koja reagira s kalcitom i otapa ga u vodenim otopinama. Postupak uključuje utiskivanje kisele otopine u bušotinu, gdje kiseline reagiraju s kalcitom koji se taložio na unutarnjim stijenkama cijevi i u slojevima stijena. Tipična koncentracija kloridne kiseline koja se utiskuje je u rasponu od 10% do 15%, ovisno o debljini i količini kalcita. Nakon reakcije, slijedi ispiranje s vodom pod visokim tlakom.

Mehaničko uklanjanje slijedi ukoliko je taloženje kalcita značajno, budući da tada kemijska metoda može biti nedovoljna. U tim slučajevima koriste se mehanički alati poput rotirajućih mlaznica i četki za čišćenje unutarnjih površina cijevi. Ovi alati fizički uklanjaju slojeve kalcita. Također, za uklanjanje velikih količina kalcita koriste se i mlazne pumpe koje koriste vodu pod visokim tlakom za razbijanje i ispiranje kamenaca.

- Gips

Gips se može ukloniti kemijskim i mehaničkim metodama, a sam odabir metoda ovisi prvenstveno o tome koliko je gips tvrd, kolika mu je debljina te koja količina taloga se stvorila.

Kemijsko uklanjanje gipsa podrazumijeva upotrebu specijalnih kemijskih agensa, uključujući kiseline poput kloridne kiseline u kombinaciji s kelatnim agensima. Kelatni agensi su specijalne kemikalije koje se koriste za stvaranje kompleksnih spojeva s metalnim ionima u otopinama. Ova sredstva se često primjenjuju u industriji, uključujući naftnu industriju, za razne svrhe, uključujući uklanjanje kamenca, regulaciju tvrdoće vode i čišćenje metalnih površina. Ključna karakteristika kelatnih agenasa je njihova sposobnost da se vežu

za metalne ione i formiraju stabilne kompleksne spojeve koji su obično topljivi u vodi. Kelatni agensi poput EDTA (etilendiamintetraoctena kiselina), koriste se zbog svoje sposobnosti da se vežu za ione kalcija i magnezija, čime pomažu u razgradnji gipsa. U praksi, često se koristi kombinacija kloridne kiseline i EDTA kako bi se osigurala učinkovita reakcija i uklanjanje gipsa.

Mehaničko uklanjanje, u slučajevima gdje je gips teško ukloniti, uključuje metode poput rotirajućih mlaznica i abrazivnih četki za čišćenje slojeva gipsa s unutarnjih površina cijevi i stijenki kanala bušotine. Ove metode su učinkovite u uklanjanju tvrdokornih naslaga koje se ne mogu lako razgraditi kemijski.

- Barit

Barit je poznat po svojoj velikoj gustoći i otpornosti na kemijske reakcije, što ga čini posebno teškim za uklanjanje. Barit je gotovo nerazgradiv u uobičajenim kiselinama, ali se mogu koristiti specijalizirani reagensi. Kelatni agensi kao što su EDTA i DTPA (engl. *diethylenetriaminepentaacetic acid*) često se koriste u kombinaciji s jakim kiselinama. Ove kemikalije pomažu u razgradnji barita stvarajući kompleksne spojeve koji se mogu lakše ukloniti. Također se koriste i specijalizirani barit-otapajući agensi koji su razvijeni za specifične vrste baritnog kamena.

S obzirom na to da je barit tvrd i velike gustoće, često je potrebno koristiti mehaničke metode. Rotirajuće mlaznice i alati za glodanje mogu se koristiti za razbijanje barita i uklanjanje s površina u bušotini. Ove metode mogu uključivati i korištenje visokotlačnih voda za ispiranje barita iz bušotinskog sustava.

- Hematit

Hematit se često pojavljuje u manjoj količini, ali može uzrokovati probleme zbog svoje tvrdoće. On se može otopiti pomoću specijaliziranih kemijskih agensa koji sadrže kiseline. Iako se kloridna kiselina može koristiti, ponekad su potrebne jače kiseline ili specijalizirane otopine za uklanjanje hematita. Ova metoda zahtijeva pažljivo praćenje i nadzor kako bi se izbjeglo oštećenje opreme.

Za uklanjanje hematita, često se koriste mehaničke abrazivne metode poput rotirajućih mlaznica i glodanja. Hematit se može ukloniti fizičkim trošenjem s površine, a potom se otpadni materijal ispire vodom pod visokim tlakom.

- Sulfidi (uključujući  $FeS$ )

Sulfidi, uključujući željezov sulfid, predstavlja poseban izazov zbog njihove sposobnosti da reagira s metalima i uzrokuje koroziju.



Za uklanjanje sulfida, često se koristi kombinacija kiseline i specijaliziranih otapala. Sulfidi su osjetljivi na kiseline, ali mogu zahtijevati dodatak oksidansa poput vodikovog peroksida za poticanje reakcije. Ovi reagensi pomažu u pretvaranju sulfida u topive spojeve koje je lakše isprati iz naftne bušotine.

S obzirom na to da sulfidne naslage mogu biti prilično tvrde, mehaničke metode uključuju korištenje abrazivnih četki, rotirajućih mlaznica i visokotlačnih mlaznica za fizičko uklanjanje naslaga mlazom vode.

Na polju Ekofisk, različite vrste kamenca zahtijevaju specifične metode za njihovo učinkovito uklanjanje. Kalcit se najčešće uklanja kemijskim sredstvima poput kloridne kiseline, dok su gips i barit tvrdokorniji i zahtijevaju kombinaciju kemijskih i mehaničkih metoda. Hematit i sulfidi također predstavljaju izazov, pri čemu se koristi specijalizirani kemijski tretman i abrazivne metode. U svakom slučaju, uspješno izdvajanje kamenca u Ekofisk bušotini zahtijeva detaljno razumijevanje tipove kamenaca, njihove karakteristike i učinkovitost metoda za njihovo uklanjanje

### **3.2. Izdvajanje kamenca na geotermalnim poljima**

Za pojašnjenje problema koje uzrokuje izdvajanje kamenca na eksploatacijskom polju uzet je primjer geotermalnog polja Krafla

#### **3.2.1. Općenito o geotermalnom polju Krafla Geothermal Power Station**

Krafla geotermalno postrojenje smješteno je na sjeveroistoku Islanda, unutar vulkanskog kompleksa Krafla. Specifično, nalazi se blizu grada Mývatn, u regiji poznatoj po svojoj intenzivnoj vulkanskoj aktivnosti i geotermalnim resursima. Ovaj kompleks je dio Srednjoatlantskog hrbata, gdje se sastaju tektonske ploče i gdje se često javljaju vulkanske erupcije i geotermalna aktivnost. Geotermalna elektrana Krafla započela je s radom u 1977. godini. Od tada, prošla je kroz nekoliko faza nadogradnje i proširenja kako bi se povećala proizvodnja energije. Geotermalno postrojenje uključuje više bušotina koje omogućuju eksploataciju vruće pare i vruće vode iz dubokih geotermalnih ležišta ispod površine Zemlje (Landsvirkjun, 2024). Bušotine na Krafla geotermalnom polju dostižu dubine od nekoliko kilometara, s ciljem dohвата geotermalnih ležišta smještenih duboko unutar Zemljine kore. Specifične dubine bušotina variraju ovisno o geološkim uvjetima i specifičnostima svakog

ležišta. Ukupni kapacitet Krafla geotermalnog postrojenja varira ovisno o fazi rada i nadogradnji. Na početku, postrojenje je imalo kapacitet od oko 30 MW, a kasnije je prošireno na 60 MW. Zajedno s dodatnim postrojenjima i modernizacijama, kapacitet može biti veći, ovisno o operativnim uvjetima i dostupnim resursima (Landsvirkjun, 2024). Geotermalna elektrana koristi sustav dvostupanjskih turbina za pretvaranje geotermalne pare u električnu energiju. Vruća para iz bušotina pokreće turbine koje generiraju električnu energiju, a kondenzatori zatim hlade paru prije njenog vraćanja u geotermalno ležište ili odbacivanja iz sustava (Landsvirkjun, 2024).

Vulkanski kompleks Krafla je jedan od najaktivnijih vulkanskih sustava na Islandu. Geotermalna aktivnost u ovom području je rezultat tektonskih procesa, gdje se divergiraju tektonske ploče i dolazi do intenzivne vulkanske aktivnosti. Ova aktivnost dovodi do stvaranja vruće pare i geotermalnih resursa u obliku vruće vode i pare koji se koriste u elektranama. Geotermalna energija iz Krafla Geothermal Power Stationa pruža značajnu količinu čiste i održive energije, smanjujući potrebu za fosilnim gorivima i emisijama stakleničkih plinova. Elektrana je ključna za opskrbu električnom energijom lokalnih zajednica na sjeveroistoku Islanda i doprinosi energetskej neovisnosti zemlje (Landsvirkjun, 2024).

Ujedno, razvoj geotermalnog polja također ima ekološke i socijalne aspekte, uključujući potrebu za upravljanjem okolišem i praćenje utjecaja na lokalne ekosustave. U tom smislu, pažnja se posvećuje minimiziranju utjecaja na prirodu i integraciji sa lokalnim zajednicama. Geotermalna istraživanja u području Krafla nastavljaju se, s ciljem povećanja učinkovitosti i održivosti eksploatacije geotermalnih resursa. Povremeno se provode nadogradnje tehnologije i modernizacija postrojenja kako bi se optimizirala proizvodnja energije i produžila operativna mogućnost postrojenja. Krafla geotermalno postrojenje je značajan primjer uspješne integracije geotermalne energije u energetskej sustav jedne zemlje, nudeći uvid u prednosti i izazove korištenja geotermalnih resursa (Landsvirkjun, 2024). Na Slici 3-2. prikazane su geotermalne bušotine na geotermalnom polju Krafla.



**Slika 3-2.** Geotermalne bušotine na Krafla geotermalnom polju (Asgeir Eggertsson, 2004)

### 3.2.2. Vrste kamenca koje se pojavljuju na geotermalnom polju Krafla

Na geotermalnom polju Krafla na Islandu, pojavljuju se specifične vrste kamenca koji predstavljaju izazove za eksploataciju geotermalne vode i pare, uključujući različite mineralne naslage koje se formiraju kao posljedica geotermalnih procesa (Davoli i sur., 2024):

- Kalcit ( $CaCO_3$ ):

Kalcit je jedan od najčešćih minerala u geotermalnim sustavima, a može se naći u raznim slojevima unutar geotermalnih ležišta. Na Krafla geotermalnom polju, kalcit se obično nalazi u višim dijelovima geotermalnog sustava, gdje temperatura može varirati, uzrokujući taloženje ovog minerala. Specifična koncentracija kalcita može varirati ovisno o temperaturi i kemijskim svojstvima fluida u bušotinama. U praksi, kalcit može činiti značajan postotak mineralnih naslaga, često dosegnuvši i do 40-60 % u nekim slojevima, osobito u slučaju sedimentnih stijena.

- Gips ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ):

Gips se formira u geotermalnim sustavima kada su prisutne visoke koncentracije sulfatnih iona. Na polju Krafla, gips može biti prisutan u slojevima gdje voda sadrži visoke koncentracije sulfata. Ovaj mineral se obično taloži na srednjim dubinama gdje su temperatura i tlak umjereniji. Količinski, gips može činiti 10-20% mineralnih naslaga, ovisno o specifičnim uvjetima unutar ležišta.

- Barit ( $BaSO_4$ ):

Barit je još jedan mineral koji se može naći na geotermalnim poljima kao što je Krafla. Formira se u uvjetima visoke koncentracije barijevog sulfata. Barit je obično prisutan u dubokim slojevima, gdje visoki tlak i temperatura pogoduju njegovom taloženju. U postotku, barit može činiti manji dio mineralnih naslaga, obično 5-15%, ali može biti prisutan u većim količinama u određenim slojevima ili područjima s visokom koncentracijom barijev sulfata

- Silicijev dioksid ( $SiO_2$ ):

Silicijev dioksid, kao što su kvarc i opal, također može biti prisutan u geotermalnim bušotinama. Silicijev dioksid se taloži kao posljedica hlađenja geotermalnih fluida i može formirati naslage na površinama stijenci kanal bušotine i cijevi. Silicijev dioksid može činiti do 30% mineralnih naslaga u nekim slučajevima, posebno u slojevima gdje dolazi do brze promjene temperature i tlaka.

- Željezov(III) oksid ( $Fe_2O_3$ ) i drugi željezni oksidi:

U nekim dijelovima geotermalnog sustava mogu se naći i željezovi oksidi kao što je željezov(III) oksid, koji se talože u prisutnosti željeznih iona. Ovi kamenci mogu činiti manji postotak mineralnih naslaga, obično 5-10%, ovisno o kemijskim uvjetima i koncentracijama željeznih iona u geotermalnim fluidima.

Točni postoci mineralnih naslaga mogu varirati ovisno o specifičnim uvjetima unutar svake bušotine. Kamenci se mogu naći u različitim slojevima unutar geotermalnog sustava. Na primjer, kalcit i silicijev dioksid obično se nalaze u više temperaturnim i manje vlažnim dijelovima ležišta, dok gips i barit mogu biti prisutni u srednjim ili dubljim slojevima ležišta. U nekim slučajevima, visok sadržaj gipsa i barita može biti rezultat specifičnih kemijskih reakcija unutar ležišne stijene. Na geotermalnom polju Krafla, različite vrste kamenca predstavljaju izazove za eksploataciju geotermalnih ležišta i mogu značajno utjecati na učinkovitost postrojenja. Kalcit, gips, barit, silicijev dioksid i željezovi oksidi predstavljaju glavne vrste mineralnih naslaga koje se nalaze u različitim slojevima unutar ležišta s različitim udjelima ovisno o specifičnim uvjetima i kemizmu geotermalnih fluida. Razumijevanje raspodjele i koncentracije ovih kamenaca ključna je za upravljanje ležištem i optimizaciju geotermalnog eksploatacijskog procesa.

### 3.2.3. Metode izdvajanja kamenca

Na geotermalnom polju Krafla na Islandu, različite metode se koriste za uklanjanje kamenca, koji se može formirati uslijed geotermalnih procesa (Davoli i sur., 2024). U nastavku teksta dan je detaljan pregleda metoda uklanjanja kamenca koje se primjenjuju na ovom eksploatacijskom polju:

#### 1. Mehaničko uklanjanje

Mehaničko uklanjanje kamenca uključuje upotrebu različitih alata i opreme za fizičko uklanjanje naslaga s unutarnjih površina bušotinskih cijevi i proizvodne opreme. Na eksploatacijskom polju Krafla, ovo su najčešće korištene metode:

- Glodači kamenca i četke - ova metoda koristi rotirajuće glodače ili četke koje se spuštaju u bušotinu kako bi se fizički uklonile naslage kamenaca. Glodači su obično opremljeni čvrstim metalnim zubima ili abrazivnim materijalima koji mogu učinkovito ukloniti naslage poput kalcita, silicijevog dioksida i gipsa. Ova metoda je posebno korisna za uklanjanje naslaga koje su se nakupile na površinama cijevi.
  - Visokotlačno mlazno ispiranje - ova metoda uključuje primjenu visokotlačnog mlaza tekućine (najčešće vode ili specijalnih kemikalija) na površinu kamenca s ciljem njegovog uklanjanja. Ovaj postupak koristi se za čišćenje perforacija i drugih područja unutar bušotine gdje se mineralne naslage mogu akumulirati. Ova metoda pomaže u oslobađanju blokiranih područja i poboljšava protok fluida.

#### 2. Kemijsko uklanjanje

Kemijsko uklanjanje kamenca podrazumijeva primjenu različite kemikalije za otapanje ili razgradnju mineralnih naslaga:

- Primjena kiselina - koriste se različite kiseline za otapanje kamenca. U slučaju polja Krafla i vrste kamenaca koje se pojavljuju najčešće korištene kiseline su:
  - **Klorovodična kiselina ( $HCl$ )**, ova kiselina koristi se za otapanje naslaga kalcita i nekih drugih karbonatnih minerala. Kada se  $HCl$  primijeni, reagira s kalcitom i pretvara ga u vodu, ugljikov dioksid i topivi kalcij. Na polju Krafla, ova metoda se koristi za uklanjanje naslaga kamenaca koje su se formirale u područjima s višom temperaturom i pH vrijednošću.

- **Sumporna kiselina ( $H_2SO_4$ )** - ova kiselina može se koristiti za uklanjanje gipsa (sulfata) i nekih drugih mineralnih naslaga. Sumporna kiselina reagira s gipsom i stvara topive sulfate. Ova metoda je pogodna za područja s visokom koncentracijom sulfata.
- Kelatni agensi kao što su EDTA koriste se za otapanje naslaga barita i drugih teško topivih minerala. Kelatni agensi djeluju stvaranjem stabilnih kompleksa s metalnim ionima u kamencima, što omogućava njihovo otapanje. Ova metoda može biti dugotrajna i zahtijeva pravilnu kontrolu kemijskih reakcija kako bi se osigurao učinkovit proces otapanja mineralnih naslaga.

### 3. Termičko uklanjanje

Termičko uklanjanje kamenca koristi visoke temperature za promjenu stanja ili strukture naslaga:

- **Visokotlačna termalna obrada** - ova metoda koristi visoke temperature i tlakove za promjenu ili razgradnju naslaga kamenca. U nekim slučajevima, ovo može uključivati primjenu pare ili drugih fluida pri visokoj temperaturi kako bi se smanjila čvrstoća naslaga kamenaca i omogućilo njihovo lakše uklanjanje.
- **Parne tehnike**, u nekim slučajevima, primjena pare može pomoći u razgradnji kamenca, osobito u kombinaciji s kemijskim tretmanima. Para može pomoći u otapanju ili omekšavanju mineralnih naslaga, čime se olakšava njihovo fizičko uklanjanje.

Na geotermalnom polju Krafla, uklanjanje naslaga kamenca podrazumijeva primjenu različitih metoda ovisno o vrsti naslaga i specifičnim uvjetima unutar bušotine. Mehaničko uklanjanje koristi rotirajuće alate i visokotlačne mlazove za fizičko čišćenje, dok kemijske metode uključuju upotrebu kiseline i kelatne agense za otapanje mineralnih naslaga, dok termičke metode koriste visoke temperature za razgradnju naslaga kamenaca. Svaka od ovih metoda zahtijeva pažljivo planiranje i nadzor kako bi se osigurala učinkovitost i sigurnost procesa uklanjanja kamenca.

## 4. ZAKLJUČAK

Sprječavanje izdvajanje kamenca u naftnim i geotermalnim bušotinama predstavlja ključan aspekt u održavanju učinkovitosti i dugovječnosti bušotina. Kao što je vidljivo iz obrađenih primjera iz prakse, svako polje i ležište suočava se s specifičnim izazovima u vezi s izdvajanjem naslaga kamenca, koje se razlikuju u vrsti i kemijskom sastavu, te količini i načinu njihovog uklanjanja. Analizom primjera naftnog polja Ekofisk i geotermalnog polja Krafla, moguće je izvući korisne zaključke o metodama i pristupima za izdvajanje kamenca koje se primjenjuju u određenim slučajevima.

Polje Ekofisk, smješteno u Sjevernom moru, predstavlja primjer kompleksnog naftnog polja koja se suočava s neželjenim izdvajanjem različitih vrsta mineralnih naslaga, uključujući karbonatne i sulfatne kamence. Karbonatni kamenci poput kalcita, kao i sulfatni kamenci poput barita, prisutni su zbog specifičnih geo-kemijskih uvjeta i reakcija unutar ležišta. U ovom slučaju, mehaničke metode poput obrade mlaznim ispiranjem ili glodačem koriste se za fizičko uklanjanje kamenca. Kiseline poput klorovodične i sumporne kiseline igraju ključnu ulogu u otapanju karbonatnih i sulfatnih naslaga. U slučajevima kada standardne metode nisu dovoljne, upotreba kelatnih agensa omogućuje učinkovitije uklanjanje složenih kamenaca. Polje Ekofisk može poslužiti kao ilustrativan primjer kako se kombinacijom različitih metoda mogu ukloniti različiti kamenci i održati optimalan protok slojnih fluida i proizvodnja.

S druge strane, geotermalno polje Krafla na Islandu suočava se s problemom izdvajanja različitih vrsta kamenca uslijed geotermalnih procesa i visokih temperatura. Kamenci kao što su silikatni minerali, gips i kalcit mogu se akumulirati unutar bušotine, predstavljajući značajne izazove za normalni rad bušotina i učinkovitost sustava. Na polju Krafla, primjenjuju se mehaničke metode poput glodača i četki za fizičko uklanjanje naslaga, dok se kemijske metode koriste za otapanje mineralnih naslaga. Kiselinske tehnike koriste se za uklanjanje kalcita i gipsa, dok kelatni agensi pomažu u otapanju teško topivih minerala. Termičke metode, kao što je primjena visoke temperature, također igraju ulogu u razgradnji kamenca. Ove metode, u kombinaciji, omogućuju učinkovito upravljanje naslagama u geotermalnim bušotinama, čime se osigurava kontinuitet proizvodnje i smanjenje operativnih problema.

U oba slučaja, ključ uspješnog upravljanja izdvajanjem kamenca leži u primjeni odgovarajućih metoda koje odgovaraju specifičnim uvjetima u bušotini i ležištu i vrsti

naslaga. Dok naftno polje poput Ekofiska zahtijeva kombinaciju mehaničkih i kemijskih metoda za upravljanje karbonatnim i sulfatnim kamencima, geotermalno polje poput Krafle suočava se s izazovima koji uključuju visoke temperature i različite vrste minerala. U oba slučaja, upotreba preciznih metoda otapanja, mehaničkog čišćenja i, gdje je potrebno, termičkih tehnika, ključna je za očuvanje dugovječnosti bušotine i optimizaciju proizvodnje. Stalno istraživanje i razvoj novih tehnologija i metoda za izdvajanje kamenca osiguravaju napredak u industriji i omogućavaju rješavanje sve složenijih izazova u upravljanju bušotinama.



## 5. POPIS LITERATURE

1. Asgeir Eggertsson, 2004. URL:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Krafla\\_Power\\_Station](https://en.wikipedia.org/wiki/Krafla_Power_Station) (01.09.2024).
2. Avegenii, n.d. URL:  
<https://stock.adobe.com/hr/search?k=%22coiled+tubing%22> (01.09.2024)
3. Bellarby, J. (2009). *Well Completion Design*. Aberdeen, UK: Elsevier
4. Davoli, R., Engels, K., Montanaro, C., Ricci, T., Sciarra, A., and Scheu, B. (2024). *Subsurface soil and lithology alteration shaping degassing at Krafla caldera, Iceland*, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria.
5. Hermansen, H. (2008). The Ekofisk Field: Achieving Three Times the Original Value. *Paper presented at the 19th World Petroleum Congress*, Madrid, Spain,
6. Hester, J. 2019 URL: <https://www.conocophillips.com/spiritnow/story/50-years-of-ekofisk/> (01.09.2024).
7. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. URL: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/kelati> (18.9.2024)
8. Landsvirkjun (2024). *Krafla Geothermal Station*. URL:  
<https://www.landsvirkjun.com/powerstations/krafla> (02.09.2024).
9. Norwegianpetroleum.no (2024). Ekofisk. URL:  
<https://www.norskipetroleum.no/en/facts/field/ekofisk/> (02.09.2024).

## **IZJAVA**

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

BORNA LUČIĆ

---



KLASA: 602-01/24-01/72  
URBROJ: 251-70-12-24-2  
U Zagrebu, 11. 9. 2024.

**Borna Lučić, student**

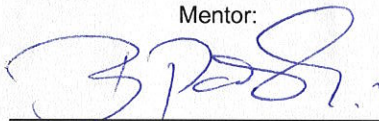
## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/72, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 16.05.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### IZDVAJANJE KAMENCA TIJEKOM EKSPLOATACIJE UGLJIKOVODIKA I GEOTERMALNE VODE

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 i komentora dr. sc. Igor Medved.

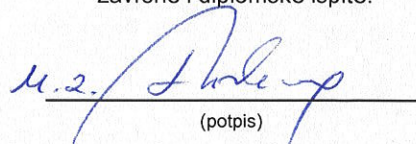
Mentor:

  
(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)

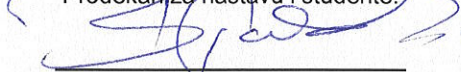
Komentor:

  
(potpis)

dr. sc. Igor Medved

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

  
(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)