Specifičnosti izrade geotermalnih bušotina

Čičmir, Jakov

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:169:386364

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

SPECIFIČNOSTI IZRADE GEOTERMALNIH BUŠOTINA

Diplomski rad

Jakov Čičmir

N 369

Zagreb, 2022.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

SPECIFIČNOSTI IZRADE GEOTERMALNIH BUŠOTINA

JAKOV ČIČMIR

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

Sažetak

Geotermalna energija predstavlja održivu alternativu fosilnim izvorima energije te se može koristiti za zagrijavanje objekata ili za proizvodnju električne energije. Za iskorištavanje geotermalne energije potrebno je adekvatno izraditi bušotine koje će odolijevati uvjetima koji vladaju u geotermalnim ležištima. Prilikom izrade geotermalnih bušotina nailazi se na razne probleme; visoke temperature, niski slojni tlakovi, raspucane formacije i prisustvo kiselih plinova. Izrada geotermalnih bušotina usko je povezana s tehnologijama i opremom koja se koristi za izradu naftnih i/ili plinskih bušotina. Najveći naglasak je na korištenju materijala koji je otporan na visoke temperature i na kvalitetno izvedenoj cementaciji zaštitnih cijevi koja je od vitalnog značaja za pravilnu izradu bušotine. Nakon adekvatne izrade bušotina i značajnih kapitalnih troškova, slijedi višegodišnje iskorištavanje geotermalnog ležišta i mali operativni troškovi tijekom proizvodnje energije.

Ključne riječi: geotermalna bušotina, obnovljiv izvor energije, problemi kod geotermalnih bušotina, bušenje, cementacija
Diplomski rad sadrži: 73 stranice, 8 tablica, 41 sliku i 53 reference
Jezik izvornika: hrvatski
Diplomski rad je pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Mentorica: Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica u trajnom zvanju RGNf-a
Komentor: Dr. sc. Petar Mijić, poslijedoktorand RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica u trajnom zvanju RGNf-a
2. Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNf-a
3. Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNf-a

Datum obrane: 8. 7. 2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

SPECIFICS OF GEOTHERMAL WELL DRILLING

JAKOV ČIČMIR

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

Abstract

Geothermal energy is a sustainable alternative to fossil fuels and can be used to heat buildings or to produce electricity. To exploit geothermal energy, it is necessary to adequately construct wells that will withstand the conditions prevailing in geothermal reservoir. During the construction of geothermal wells, various problems are encountered; high temperatures, low formation pressures, fractured formations and the presence of acidic gases. The construction of geothermal wells is closely related to the technologies and tools used to build oil and/or gas wells. The greatest emphasis is put on the use of materials that are resistant to high temperatures and on the quality of casing cementation, which is vital for the proper construction of the well. Adequate well construction and significant capital costs are followed by many years of exploitation of the geothermal reservoir and low operating costs during energy production.

Keywords: geothermal well, renewable energy source, problems with geothermal wells, drilling, cementation
Thesis contains: 73 pages, 8 tables, 41 figures and 53 references
Original in: Croatian
Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Supervisor: Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD
Co-mentor: Postdoctoral Researcher Petar Mijić, PhD

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

Date of defense: July 8, 2022, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA ..... **I**

POPIS TABLICA ..... **III**

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA ..... **IV**

1. UVOD **1**

2. GEOTERMALNA ENERGIJA U REPUBLICI HRVATSKOJ **4**

3. KARAKTERISTIKE GEOTERMALNIH BUŠOTINA **9**

3.1. Problemi u geotermalnim bušotinama 9

3.1.1. Visoke temperature *9*

3.1.2. Gubljenje cirkulacije i filtracija *14*

3.1.3. Debeli isplačni oblog *16*

3.1.4. Utjecaj kiselih plinova *18*

4. IZRADA GEOTERMALNIH BUŠOTINA **21**

4.1. Bušaća postrojenja 21

4.2. Niz bušaćih alatki 23

4.2.1. Žrvanjska dlijeta *24*

4.2.2. Dijamantna i polikristalinska dlijeta *26*

4.3. Isplaka 27

4.3.1. Svojstva isplake *30*

4.3.2. Površinski isplačni sustav *31*

4.3.3. Specifičnosti isplaka kod geotermalnih bušotina *34*

4.4. Bušenje u uvjetima podtlaka 36

4.5. Zacjevljenje bušotine 42

4.5.1. Zaštitne cijevi *43*

4.5.2. Kvaliteta čelika zaštitnih cijevi *45*

4.5.3. Smanjenje vlačne čvrstoće pri višim temperaturama *46*

4.5.4. Aksijalna naprezanja zaštitnih cijevi uzrokovana temperaturnom ekspanzijom čelika *47*

4.6. Cementacija 49

4.6.1. Cement *49*

4.6.2. Cementna kaša *50*

4.6.3. Dizajn cementnih kaša za geotermalne bušotine *51*

4.6.4. Metode cementiranja kolona zaštitnih cijevi *53*
4.6.5. Pjenocement *58*
5. PRIMJERI IZ PRAKSE **61**
5.1. Geotermalne bušotine u Republici Hrvatskoj 62
5.1.1. Najznačajniji geotermalni projekti u RH *62*
5.1.2. Izrada bušotine Bošnjaci-1 ..... *64*
5.2. Geotermalne bušotine u svijetu 65
5.2.1. Geotermalna bušotina Reykjanes 19 (RN-19) *65*
5.2.2. Geotermalna bušotina Olkaria 38 (OW-38) *66*
6. ZAKLJUČAK **69**
7. LITERATURA **70**

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Shematski prikaz sustava geotermalne elektrane 2
Slika 2-1. Geotermalne regije u RH 4
Slika 2-2. Izvori geotermalne vode u Panonskom bazenu s pripadajućom temperaturom ležišta 5
Slika 2-3. Shematski prikaz prijedloga revitalizacije bušotine Pčelić-1 8
Slika 3-1. Shematski prikaz Schlumberger-ove klasifikacije HPHT bušotina 10
Slika 3-2. Ležišni tlak i temperatura nekih naftno-plinskih i geotermalnih bušotina 11
Slika 3-3. Ovisnost prividne viskoznosti isplake o temperaturi 13
Slika 3-4. Fann HPHT filter preša 15
Slika 3-5. Shematski prikaz diferencijalnog prihvata 16
Slika 3-6. Strugači 17
Slika 3-7. H_2S korozija 19
Slika 4-1. Mobilno bušaće postrojenje Saga Soilmec G-55 22
Slika 4-2. Bušaće postrojenje Tyr Drillmec HH-300 23
Slika 4-3. Dlijeto s mlaznicama 25
Slika 4-4. Žrvanjska dlijeta 26
Slika 4-5. PDC dlijeto 27
Slika 4-6. Bentonitna isplaka 29
Slika 4-7. Shematski prikaz isplačnog sustava 32
Slika 4-8. Desanderi i desilteri 33
Slika 4-9. Shematski prikaz isplačnog sustava korištenog za izradu bušotina s temperaturama preko 500 °C 35
Slika 4-10. Hladnjak za isplaku 36
Slika 4-11. Rotirajuća bušaća glava 38
Slika 4-12. Leptirasti ventil 38
Slika 4-13. Protupovratni ventili 39
Slika 4-14. Separator 39
Slika 4-15. Shematski prikaz komponenti bušaćeg postrojenja namijenjenog za bušenje u uvjetima podtlaka 40
Slika 4-16. Standardni dizajn zacjevljenja geotermalnih bušotina 44
Slika 4-17. 3D shematski prikaz otvorene (lijevo) i zatvorene (desno) fleksibilne spojnice 48

Slika 4-18. Prototipovi fleksibilnih spojnica 48
Slika 4-19. Cementacijski agregat 54
Slika 4-20. Shematski prikaz cementacijske glave 54
Slika 4-21. Centralizeri na zaštitnim cijevima 55
Slika 4-22. Shematski prikaz opreme za cementaciju 56
Slika 4-23. Jednostupanjska cementacija 57
Slika 4-24. Mikroskopska fotografija pjenocementa 58
Slika 4-25. Youngov modul elastičnosti cementnog kamena 60
Slika 4-26. Toplinska vodljivost cementnog kamena 60
Slika 5-1. Instalirani kapaciteti za iskorištavanje geotermalne energije 61
Slika 5-2. Mikroskopski prikaz kvarcnog pijeska iz bušotine Boš-1 64
Slika 5-3. Bušaće postrojenje Drillmec H-200 65
Slika 5-4. Dijagram tlaka kod bušenja u uvjetima podtlaka 68

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Trenutno aktivni istražni prostori i predviđeni načini korištenja geotermalne vode 6
Tablica 2-2. Projekti u fazi eksploatacije i načini korištenja geotermalne vode 7
Tablica 3-1. Tipičan sastav plinova proizvedenih s vodenom parom na geotermalnim bušotinama sjeverne Italije 20
Tablica 4-1. Usporedba bentonitne i aerizirane isplake 41
Tablica 4-2. Faktori smanjenja vlačne čvrstoće s povećanjem temperature 46
Tablica 5-1. Najznačajniji geotermalni projekti u RH 63
Tablica 5-2. Bušaći parametri geotermalne bušotine Reykjanes 19 66
Tablica 5-3. Bušaći parametri geotermalne bušotine Olkaria 38 67

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

OZNAKA	OPIS	JEDINICA
$\boldsymbol{\alpha_t}$	Koeficijent linearnog toplinskog rastezanja	K^{-1}
API	Američki naftni institut (engl. American Petroleum Institute)	/
BHCT	Temperatura u optoku na dnu bušotine (engl. *Bottom Hole Circulation Temperature*)	K
BHST	Statička temperatura na dnu bušotine (engl. *Bottom Hole Static Temperature*)	K
BWOC	Udio aditiva na masu cementa (engl. *By Weight on Cement*)	/
BWOW	Udio aditiva na masu vode (engl. *By Weight on Water*)	/
$\boldsymbol{\Delta T}$	Promjena temperature	K
E	Youngov modul elastičnosti	N/m^2
LCM	Materijali za čepljenje (engl. *Lost Circulation Materials*)	/
MPD	Bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *Managed Pressure Drilling*)	/
$\boldsymbol{\sigma_z}$	Aksijalno naprezanje	N/m^2
UBD	Bušenje u uvjetima podtlaka (engl. *Under Balanced Drilling*)	/
WOC	Vrijeme čekanja na očvršćivanje cementne kaše za nastavak radova (engl. *Wait on Cement*)	s (min)

1. UVOD

Razvoj čovječanstva, gledano s tehnološke strane, ponajprije ovisi o znanstvenim dostignućima te o progresivnom iskorištavanju energije. Porast broja stanovnika i sve brži tehnološki razvoj doveli su do porasta potrošnje energije na globalnoj razini, a to se očekuje i u budućnosti. Zbog toga je potrebno stvoriti nove izvore energije, koji bi, po mogućnosti, trebali biti zeleni, tj. takvi da prilikom proizvodnje energije ne emitiraju stakleničke plinove. Jedan od alternativnih izvora energije jest i geotermalna energija.

Riječ „geotermalno“ dolazi od kombinacije grčkih riječi; „geo“, što znači Zemlja te od riječi „therm“, što znači toplina. To doslovno prevedeno znači „Zemljina toplina“. Ležišta iz kojih se crpi geotermalna energija su dijelovi Zemljine kore u kojima je koncentrirana toplinska energija. Geotermalni izvori nalaze se na mjestima gdje je stanjen plašt Zemlje ili je prisutna određena tektonska anomalija u plaštu te je tako omogućeno da magma prodre dublje u Zemljinu koru te na taj način prenese toplinu na okolne stijene, a stijene dalje prenose toplinu na fluide koji se nalaze u njihovim porama.

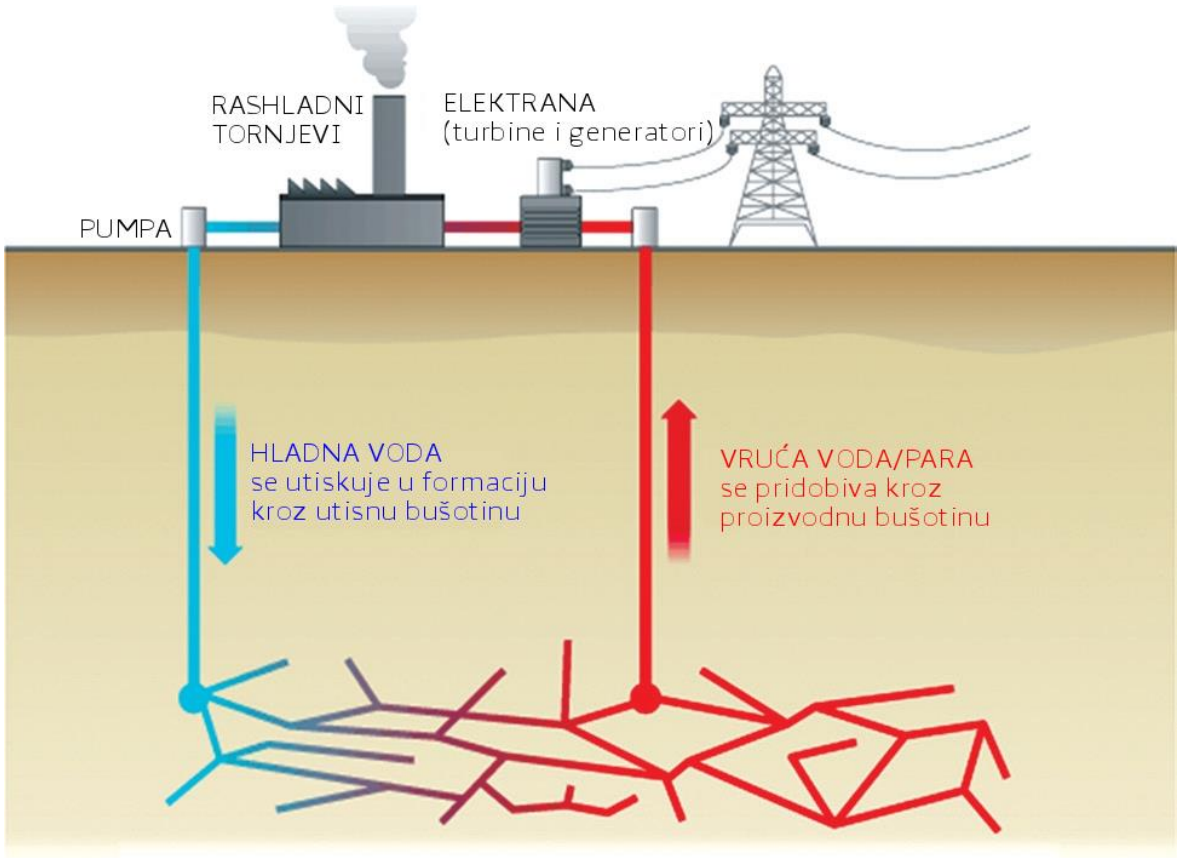
Temperatura geotermalne vode u ležištu je, u konačnici, najvažniji faktor prilikom izrade geotermalnih bušotina. Ponajprije, to je temperatura koja će se, u pravilu, pojaviti kao najviša u cijelom procesu izrade bušotine te se prema njoj dimenzioniraju svi elementi bušotine. Temperatura ovisi o geotermalnom gradijentu. Geotermalni gradijent se definira kao porast temperature s porastom dubine te se izražava u mjernim jedinicama temperature po mjernoj jedinici duljine, a najčešće je to °C/m ili °C/10m. Pritom, geotermalni gradijent može varirati od 1,8 °C/10m pa do 1,8 °C/m za ograničene vertikalne intervale (Gaurina-Međimurec et al., 1994). Na temelju temperature, geotermalna ležišta se mogu podijeliti u dvije skupine ovisno o mogućnosti iskorištenja dostupne toplinske energije (Gaurina-Međimurec et al., 1994):

a) ležišta s temperaturom vode manjom od 120 °C i
b) ležišta s temperaturom vode većom od 120 °C.

Ležišta iz prve skupine (T < 120 °C) se koriste za grijanje i u rekreativno-zdravstvene svrhe, a ležišta s temperaturom većom od 120 °C su pogodna za iskorištavanje u energetske svrhe. Toplinska energija ležišta iz druge skupine (T > 120 °C) se potencijalno može iskoristiti za proizvodnju električne energije. Da bi se voda ili vodena para iz geotermalnog ležišta pridobila na površinu, potrebno je dizajnirati i izraditi kanal bušotine te ugraditi

odgovarajuće zaštitne cijevi i cementirati ih protiskivanjem adekvatno dizajnirane cementne kaše kako bi bušotina bila u mogućnosti proizvoditi 20 ili 30 godina (Gaurina-Međimurec et al., 1994).

Za potrebe korištenja geotermalne vode za proizvodnju električne energije, uvijek se izrađuju minimalno dvije geotermalne bušotine. To su proizvodna i utisna bušotina. Proizvodna geotermalna bušotina služi za pridobivanje vruće vode ili vodene pare, dok utisna geotermalna bušotina služi za utiskivanje ohlađene geotermalne vode ili vodene pare nakon iskorištenja njezinog toplinskog potencijala. Tako se formira zatvoreni krug u kojem voda ili vodena para iz geotermalnih ležišta služi za pokretanje turbine generatora električne energije ili za grijanje objekata predavanjem svoje topline. Nakon obavljanja zadatka ohlađena geotermalna voda ili vodena para utiskuje se kroz utisnu bušotinu natrag u geotermalno ležište. To mogu biti iste formacije iz kojih je pridobivena ili neke druge podzemne strukture koje se smatraju pogodnima za takvu namjenu. Shematski prikaz sustava geotermalne elektrane nalazi se na slici 1-1.



Slika 1-1. Shematski prikaz sustava geotermalne elektrane (Salim i Amani, 2013)

Geotermalne bušotine spadaju u visoko-temperaturne bušotine, stoga je potrebno posebnu pozornost posvetiti izboru materijala od kojih će biti izrađeni elementi bušaćeg niza, zaštitne cijevi, proizvodni niz te ostala oprema ugrađena u takvu bušotinu. Također, pažnju treba posvetiti izboru isplake koja će se koristiti tijekom izrade kanala bušotine i cementne kaše koja će se koristiti u procesu cementacije ugrađenih kolona zaštitnih cijevi. Poseban oprez se očekuje kod odabira sastava cementne kaše jer će ga biti potrebno uskladiti sa zahtjevima za HT (engl. *High Temperature*) uvjete koji vladaju u geotermalnim bušotinama, a koji će za pojedine bušotine zahtijevati temperaturno stabilne polimerne aditive i često složene i jedinstvene sastave cementne kaše.

U radu su na sistematičan način prikazani tehnološki procesi i alatke koje se koriste tijekom izrade geotermalnih bušotina. Analizirane su specifičnosti i problemi izrade geotermalnih bušotina u odnosu na izradu naftnih i plinskih bušotina. Osim toga, prikazani su i postupci provedbe geotermalnih projekata i obrađeni primjeri iz prakse u Republici Hrvatskoj i svijetu.

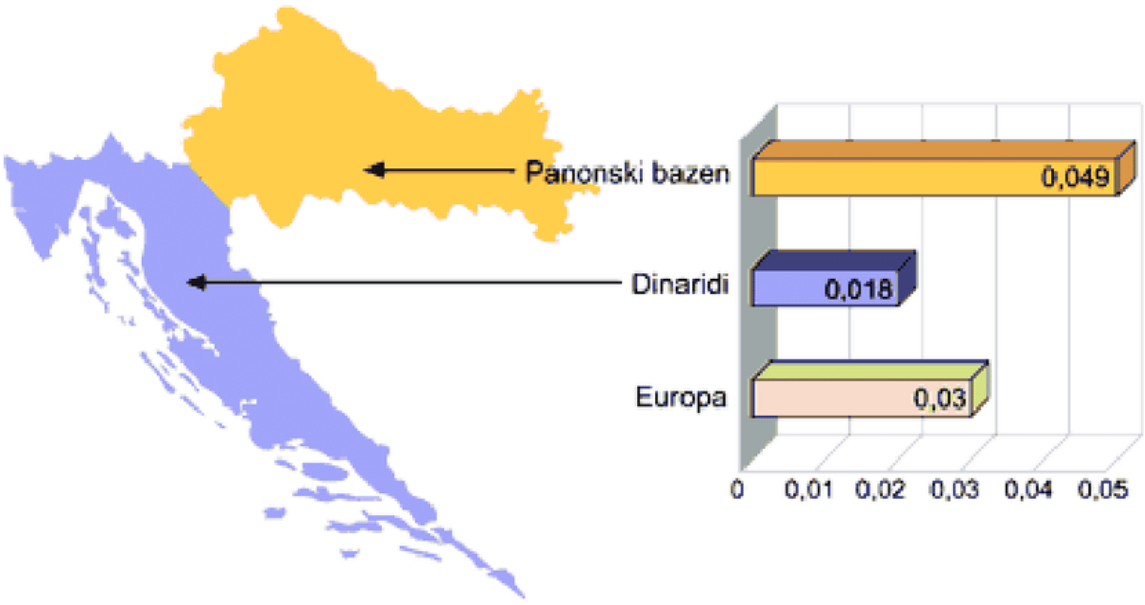
2. GEOTERMALNA ENERGIJA U REPUBLICI HRVATSKOJ

U Republici Hrvatskoj geotermalni izvori energije najprije su se počeli koristiti u zdravstveno-rekreacijske svrhe. Postoji nekoliko toplica koje koriste vruću vodu iz geotermalnih ležišta, njihov kolokvijalni naziv je terme. To su, primjerice, krapinske, tuheljske, stubičke i bizovačke toplice kao jedne od najpoznatijih u RH. Primjerice, bizovačke toplice pridobivaju iz dva intervala. Dublji interval nalazi se na dubini od 1 830 m, a temperatura vrele vode na ušću bušotine je 96 °C. Plići interval je na dubini od 1 650 m te je temperatura vode na ušću 85 °C (https://hr.wikipedia.org/wiki/Bizovačke_toplice).

INA-Naftaplin je prilikom istražnih bušenja 1970-ih godina u Panonskom bazenu došla do otkrića povišenog geotermalnog potencijala Panonskog bazena. Prosječni geotermalni gradijent u Europi je 0,03 °C/m, dok u RH, generalno, postoje dvije regije s različitim geotermalnim potencijalom prikazane slikom 2-1.

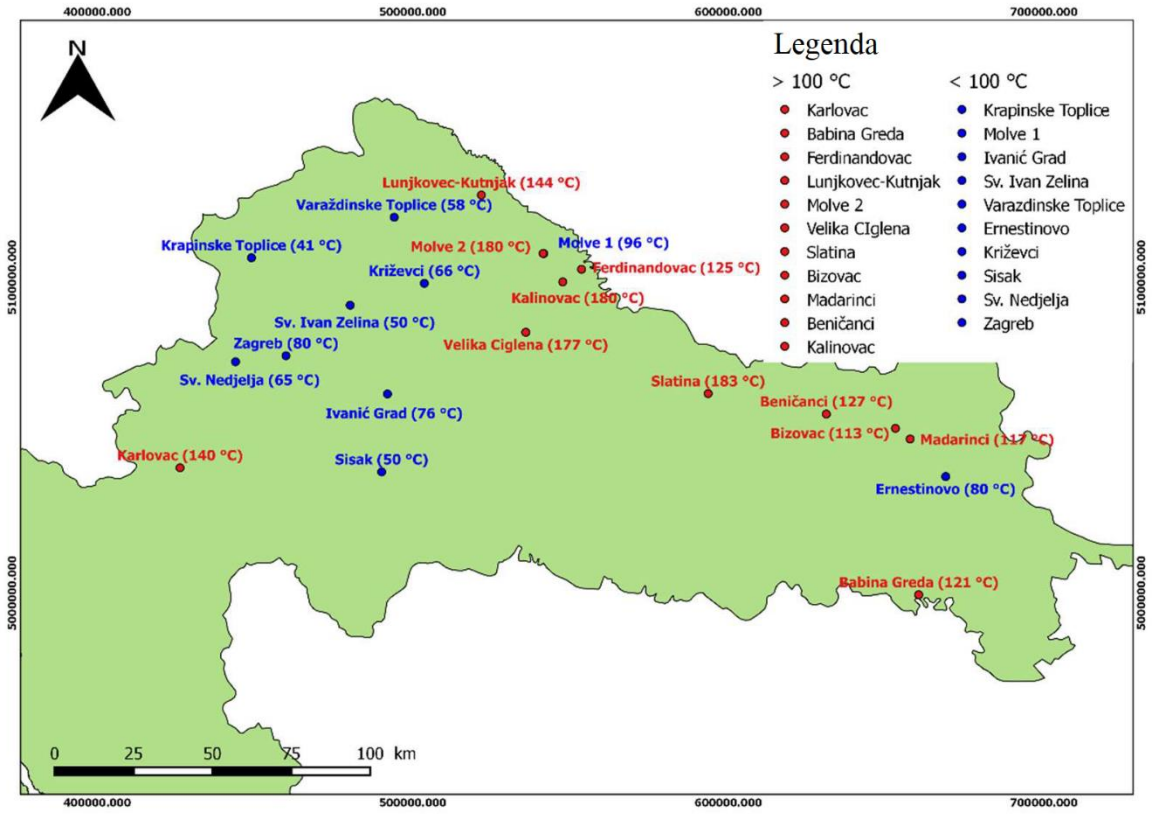
To su (https://hr.wikipedia.org/wiki/Geotermalna_energija_u_Hrvatskoj):

1) Dinaridi i Jadran (0,015 – 0,025 °C/m) i
2) Panonski bazen (> 0,04 °C/m).



Slika 2-1. Geotermalne regije u RH (https://www.researchgate.net)

Na slici 2-1. prikazane su geotermalne regije u RH, dok je na slici 2-2. prikazana karta Panonskog bazena te su na njoj naznačene dvije skupine bušotina (ovisno o temperaturi u ležištu) koje se koriste za iskorištavanje geotermalne energije.



Slika 2-2. Izvori geotermalne vode u Panonskom bazenu s pripadajućom temperaturom ležišta (Živković et al., 2019)

Intenziviranjem i valorizacijom ovog ogromnog prirodnog potencijala mogle bi se ostvariti stotine MW nove, čiste, obnovljive i neciklične energije, a što je ujedno i zajednički cilj svih zemalja EU i navodi se kao jedan od ciljeva „Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu“ (NN, 25/2020) (https://www.azu.hr).

Uravnoteženje proizvodnje i potrošnje u realnom vremenu u sustavu sa značajnom penetracijom intermitentnih izvora predstavlja izazov za budući razvoj prijenosne mreže te upravljanje i vođenje elektroenergetskih sustava. Iz tog razloga bilo bi potrebno voditi računa o iskorištavanju geotermalnih elektrana kao najstabilnijeg izvora obnovljive energije, a pogotovo iz aspekta prirodnog potencijala kojeg Republika Hrvatska posjeduje, za razliku od mnogih drugih europskih zemalja (https://www.azu.hr).

Prema procjenama postojećih nalazišta geotermalnih izvora, trenutni potencijal je oko 500 MW iz geotermalne energije. Na oko 40-ak postojećih bušotina koje su se bušile u svrhu istraživanja nafte i plina, potvrđen je geotermalni potencijal. Konačni potencijal tek treba procijeniti, a to je moguće samo ukoliko se istražuje (https://www.azu.hr).

Trenutno je u Republici Hrvatskoj aktivno 8 istražnih prostora geotermalne vode za energetske svrhe na kojima je fokus usmjeren na istražne aktivnosti s ciljem proizvodnje električne energije te u manjoj mjeri na proizvodnju toplinske energije, a koje se većinom odnose na lokalne zajednice koje imaju planove koristiti toplinsku energiju za grijanje naselja (https://www.azu.hr).

U tablici 2-1. prikazano je osam trenutno aktivnih istražnih prostora s predviđenim načinima korištenja geotermalne vode.

Tablica 2-1. Trenutno aktivni istražni prostori i predviđeni načini korištenja geotermalne vode (https://www.azu.hr)

Trenutno aktivni istražni prostori	**Predviđeni načini korištenja geotermalne vode**
1. GT Zagreb	toplinska energija
2. Babina greda 1	električna energija
3. Babina greda 2	električna energija
4. Karlovac 1	električna/toplinska energija
5. Križevci	toplinska energija
6. Slatina-2	električna energija
7. Slatina-3	električna energija
8. Virovitica 2	toplinska energija

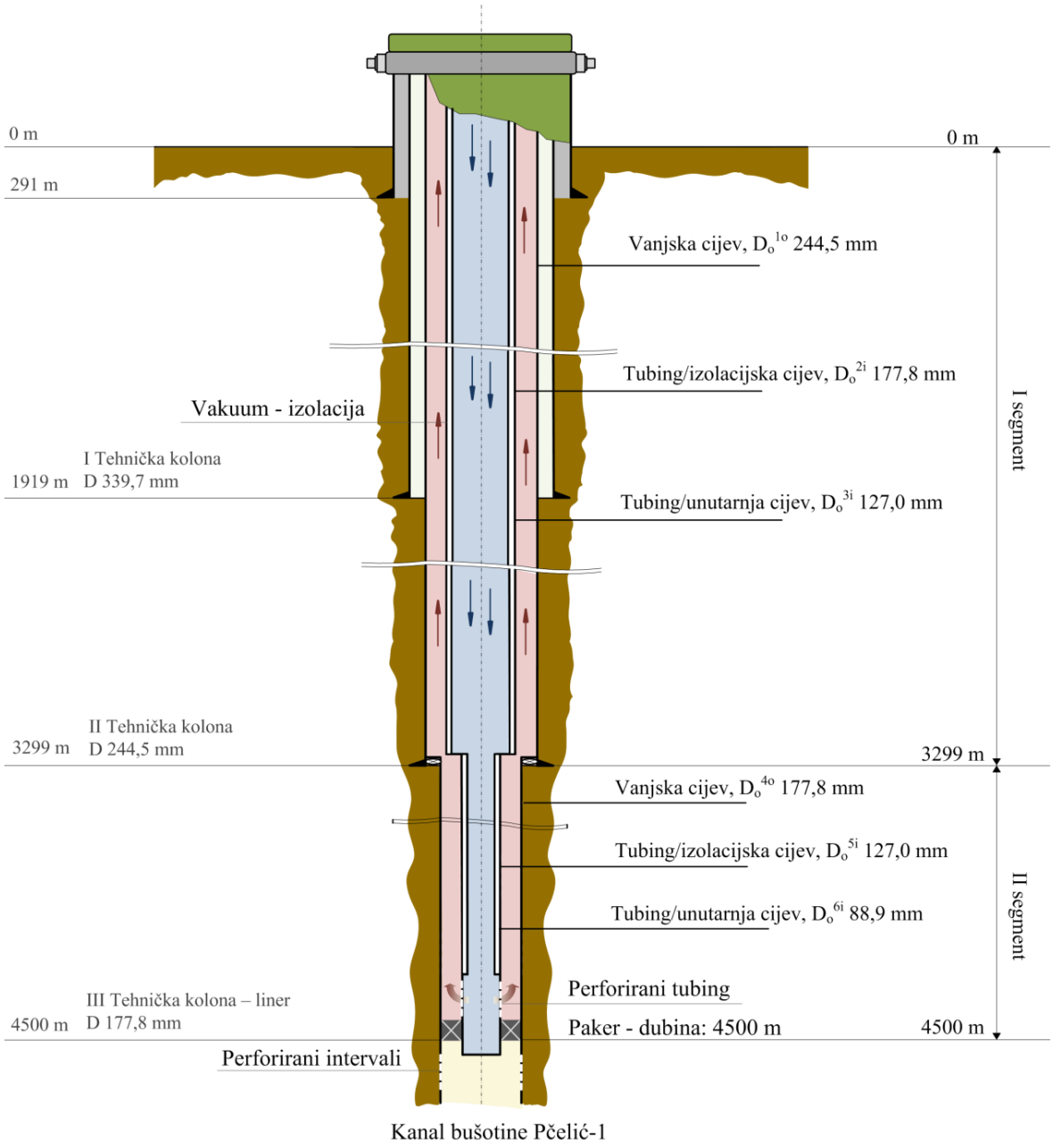
Projekti koji su trenutno u istražnoj fazi mogu proizvesti 59 MW_e električne energije i oni mogu biti u punoj implementaciji od 2022. godine do 2025.godine (https://www.azu.hr).

U tablici 2-2. prikazano je šest projekata koji su, prema podatcima Agencije za ugljikovodike, u fazi eksploatacije.

Tablica 2-2. Projekti u fazi eksploatacije i načini korištenja geotermalne vode (https://www.azu.hr)

Projekt u fazi eksploatacije	**Način korištenja geotermalne vode**
1. Velika Ciglena	električna energija
2. Draškovec	električna energija
3. Bizovac	toplinska energija
4. Ivanić	toplinska energija
5. Sveta Nedelja	toplinska energija - poljoprivreda
6. Bošnjaci sjever	toplinska energija - poljoprivreda

Kako bi se iskoristio geotermalni potencijal, bilo za iskorištenje toplinske energije ili za proizvodnju električne energije, potrebne su odgovarajuće izrađene i opremljene nove geotermalne bušotine ili pregledane i opremljene postojeće bušotine koje se prenamijenjuju u geotermalne. Macenić u svom radu iz 2020. navodi primjer revitalizacije bušotine Pčelić-1 izrađene 1989. godine. Bušotina se nalazi u istoimenom mjestu 10-ak kilometara udaljenom od Virovitice. Bušotina je projektirana kao istražna za eksploataciju nafte i plina. Međutim, kada se došlo do ciljne dubine od 5 214 m, ustanovljeno je da su propusni slojevi zasićeni slojnom vodom, ali ne i ugljikovodicima. Nakon toga bušotina je dobila status utisne, a napuštena je 1999. godine. Na dubini od 4 772 metra je tijekom izvođenja DST-a (engl. *Drill Stem Test*) izmjerena temperatura od 206,2 °C te geotermalni gradijent na tom području iznosi 4,3 °C/100 m. Za revitalizaciju bušotine potrebno je ugraditi paker na dubini od 4 500 m, tubing koji je zatvoren na dnu – ali je perforiran; što omogućava nesmetan protok fluida, te se na taj način formira bušotina kao izmjenjivač topline. U tom slučaju, hladna voda se utiskuje kroz tubing i izlazi na dnu tubinga kroz perforacije, neposredno iznad ugrađenog pakera. Hladna voda iz tubinga ulazi u prstenasti prostor između zaštitnih cijevi i tubinga te u cirkulaciji prema ušću bušotine prima toplinu i zagrijana izlazi na površinu. Shematski prikaz prijedloga revitalizacije bušotine Pčelić-1 nalazi se na slici 2-3. Predloženo tehnološko rješenje utiskivanja hladne vode kroz tubing te pridobivanja zagrijane vode na površinu kroz prstenasti prostor još uvijek nije realizirano.



Slika 2-3. Shematski prikaz prijedloga revitalizacije bušotine Pčelić-1 (Macenić, 2020)

3. KARAKTERISTIKE GEOTERMALNIH BUŠOTINA

Za geotermalne bušotine su karakteristične visoke temperature i, u većini slučajeva, mali ležišni tlakovi. Takvi uvjeti zahtijevaju pažljivo dizajniranje isplake i cementne kaše, kao i izbor materijala otpornih na visoke temperature. Temperatura geotermalne vode na dnu bušotine može dosegnuti i do 370 °C (Gaurina-Međimurec et al., 1994). Slojna voda će imati visok salinitet, puno otopljenih plinova, od kojih često može biti CO_2 ili H_2S koji su korozivni i opasni. Također, može se očekivati da je u slojnoj vodi otopljeno dosta teških i toksičnih metala (Finger i Blankenship, 2010).

Kemijski sastav geotermalne vode varira od slatke vode do slane mineralizirane vode (engl. *saline brines*) s više od 200 000 mg/L ukupno otopljenih čestica (Gaurina-Međimurec et al., 1994). Geotermalne slane vode (engl. *reservoir brines*) osim natrijeva klorida često sadrže i znatne količine karbonata i sulfata (natrijev i magnezijev sulfat) koji negativno utječu na cementni kamen. Prema tome, geotermalnu bušotinu treba dizajnirati tako da svi elementi potrebni za njenu izradu i opremanje budu otporni na uvjete kojima će biti izloženi.

3.1. Problemi u geotermalnim bušotinama

Prilikom izrade geotermalnih bušotina u obzir treba uzeti potencijalne probleme vezane uz visoku temperaturu, gubljenje cirkulacije, debeli isplačni oblog i utjecaj kiselih plinova. Navedeni problemi utjecat će na izbor i dizajn bušotinskih fluida te na alat koji se koristi za izradu bušotine. Bitno je voditi računa o materijalu od kojeg su izrađene bušaće alatke i zaštitne cijevi kao i o izboru adekvatnih aditiva u isplaci i cementnoj kaši.

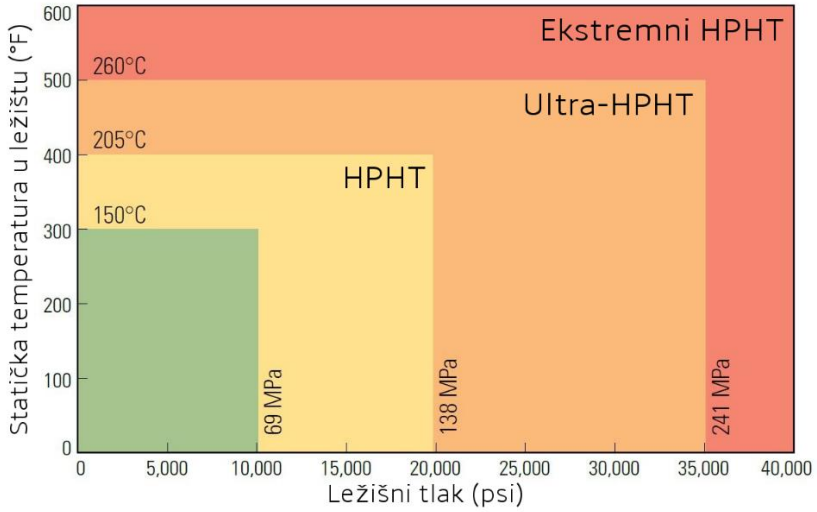
3.1.1. Visoke temperature

Naftna tvrtka Schlumberger napravila je svoju klasifikaciju HPHT bušotina. Ona takve bušotine dijeli u 3 skupine:

1. HPHT: bušotine kod kojih je ležišni tlak od 69 do 138 MPa (10 000 do 20 000 psi) te je statička temperatura u ležištu od 150 do 205 °C (300 do 400 °F),
2. Ultra-HPHT: bušotine kod kojih je ležišni tlak od 138 do 241 MPa (20 000 do 35 000 psi) te je statička temperatura u ležištu od 205 do 260 °C (400 do 500 °F),

3. Ekstremni HPHT: bušotine kod kojih je ležišni tlak veći od 241 MPa (35 000 psi) te je statička temperatura u ležištu veća od 260 °C (500 °F).

Na slici 3-1. nalazi se shematski prikaz Schlumberger-ove klasifikacije HPHT bušotina.

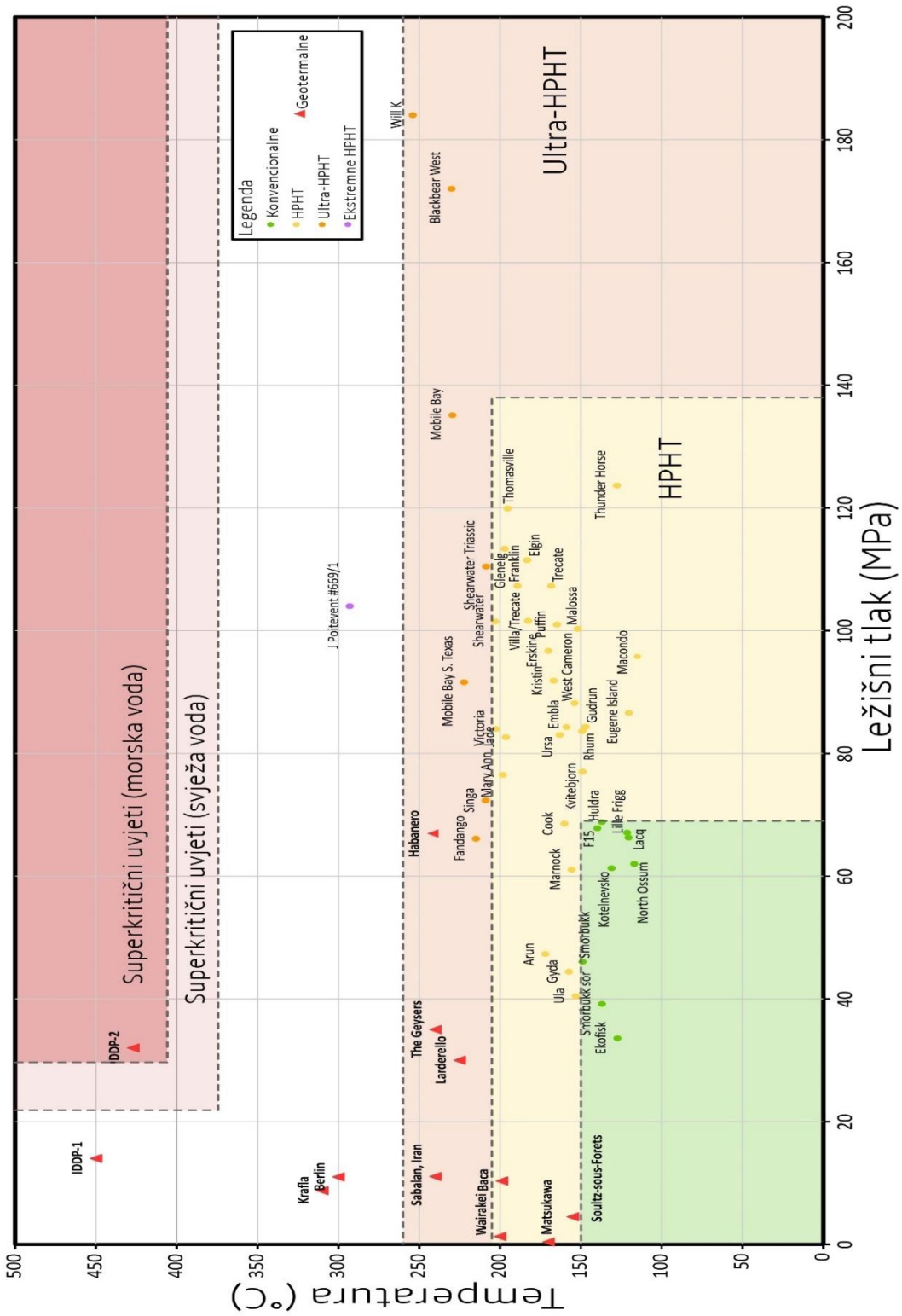


Slika 3-1. Shematski prikaz Schlumberger-ove klasifikacije HPHT bušotina (https://www.slb.com)

Na slici 3-2. prikazane su naftno-plinske (konvencionalne, HPHT, ultra HPHT i ekstremne HPHT) i geotermalne bušotine s obzirom na njihov ležišni tlak i temperaturu. Može se zaključiti da geotermalne bušotine imaju manje tlakove od naftno-plinskih bušotina, uglavnom do 40 MPa, ali znatno veće ležišne temperature. Dvije geotermalne bušotine na Islandu (IDDP-1 i IDDP-2) imaju ležišnu temperaturu preko 400 °C, dok je najveća ležišna temperatura naftne bušotine (ekstremna HPHT bušotina) malo ispod 300 °C.

Geotermalna bušotina IDDP-1 je izbušena 2009. godine u blizini geotermalne elektrane Krafla i to je najtoplija geotermalna bušotina u svijetu (magma na 2 100 m, vruća para do 450 °C). Geotermalna bušotina IDDP-2 nalazi se u blizini geotermalne elektrane Reykjanes. Dosegnula je dubinu preko 4 200 m u studenom 2016. i postala najdublja geotermalna bušotina na Islandu. U bušotinu su ugrađene zaštitne cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8") do 2 940 m, a nakon njihova cementiranja nastavljeno je bušenje dlijetom promjera 0,2159 m (8 1/2") te je tijekom bušenja došlo do prilično velikih gubitaka isplake. Cilj bušotine IDDP-2 je bio bušenje do 5 000 m, do superkritične zone pare i temperature od 400-500 °C. (https://www.mannvit.com)

Sve geotermalne bušotine prikazane na slici 3-2. imaju statičku temperaturu od preko 150 °C. Može se zaključiti da su geotermalne bušotine samo HT bušotine te da kod njih nema prevelikih opasnosti od visokih ležišnih tlakova.



Slika 3-2. Ležišni tlak i temperatura nekih naftno-plinskih i geotermalnih bušotina (https://www.linkedin.com)

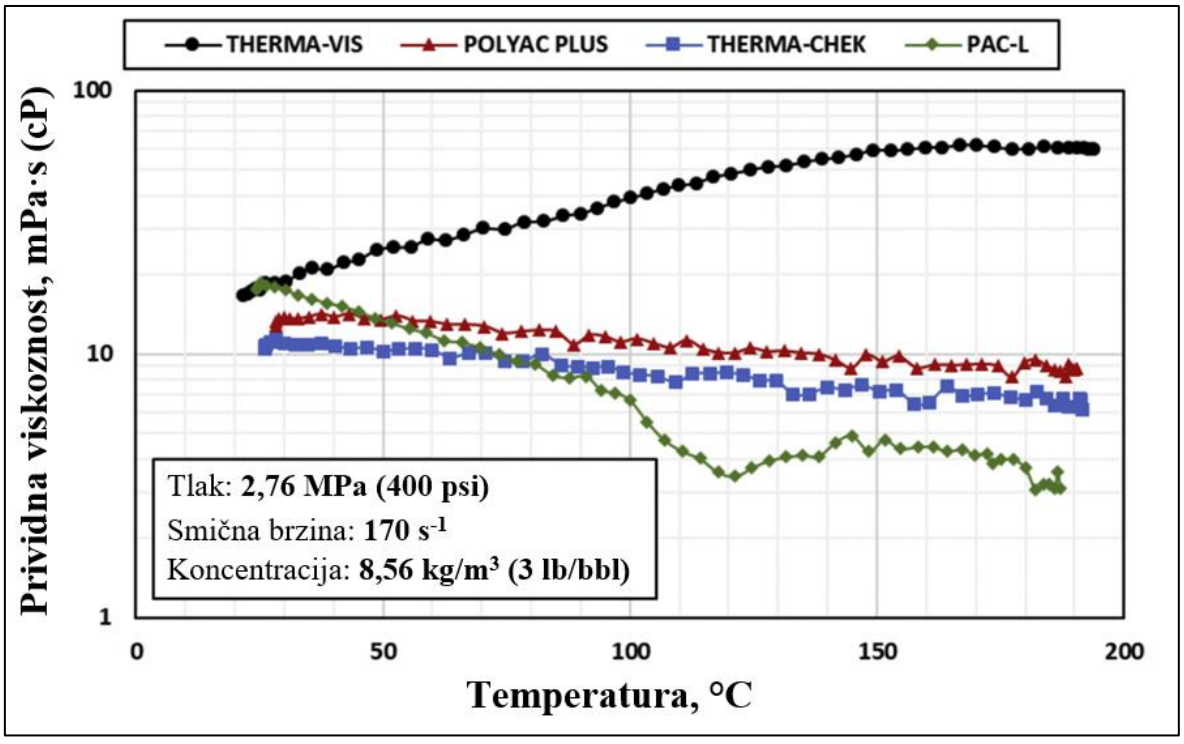
Kod izbora cementa i aditiva za pripremu cementne kaše za cementaciju kolona zaštitnih cijevi ugrađenih u geotermalnu bušotinu treba imati na umu da nakon očvršćivanja nastane cementni kamen minimalne tlačne čvrstoće od 6,9 MPa (1000 psi), a propusnosti za vodu manje od $10^{-4}\,\mu m^2$ (<0,1 mD) (Gaurina-Međimurec, 2021). Cementni kamen pri temperaturi od oko 110 °C počinje gubiti na tlačnoj čvrstoći, a istovremeno mu se povećava propusnost (Salim i Amani, 2013). Postoje dva razloga za smanjenje čvrstoće cementnog kamena na visokim temperaturama (Gaurina-Međimurec, 2021):

1) promjena u strukturi hidratiranog cementa (CSH gel prelazi u alfa dikalcij silikat hidrat $C_2SH(\alpha)$) i
2) gubitak vode.

Pri hidrataciji silikata, koji ulaze u sastav portland cementa, nastaju hidrosilikati kalcija i kalcijev hidroksid. Interesantni su hidrosilikati kalcija koji nastaju u reakciji silikata s vodom. Hidrosilikati kalcija označavaju se kao CSH faza koja će svojim prisustvom dovesti do smanjenja tlačne čvrstoće cementnog kamena i povećanja njegove propusnosti. Taj fenomen je u engleskom govornom području poznat pod terminom *strength retrogression*. Kako bi se ublažilo taj fenomen i dobilo cementni kamen povoljnih svojstava, potrebno je portland cementu dodati minimalno 35% kvarcnog pijeska (35% BWOC; engl. *By Weight Of Cement*). Kvarc (silicijev dioksid; SiO_2) na visokim temperaturama ulazi u reakciju s mineralima klinkera i sprječava stvaranje alfa dikalcij silikat hidrata ($C_2SH(\alpha)$) koji posjeduje malu čvrstoću. Umjesto alfa dikalcij silikat hidrata stvaraju se umjetni minerali (tobermorit, ksonotlit i dr.), koji su mnogo čvršći od alfa dikalcij silikat hidrata (Gaurina-Međimurec, 2021).

Generalno, kod isplaka za HPHT bušotine se zahtijeva veća gustoća nego kod konvencionalnih isplaka (Bland et al., 2006). Također, postrojenja za izradu takvih bušotina su skuplja od konvencionalnih jer većina opreme treba biti predimenzionirana kako bi mogla izdržati uvjete rada kojima će biti izložena. Isplake za HPHT bušotine trebaju biti izrazito termalno stabilne da izdrže visoke bušotinske temperature te da se izbjegnu bilo kakve komplikacije vezane uz degradaciju isplaka. Također, zbog velikog tlaka takve isplake trebaju biti propisno otežane, a preveliko otežavanje isplake je uvijek rizično jer lako može dovesti do raspucavanja naslaga uslijed djelovanja tlaka isplake i do taloženja oteživača na dnu kanala bušotine te posljedično manjih brzina bušenja.

Ležišni tlakovi u geotermalnim bušotinama, kao što je prikazano na slici 3-2., nisu veliki, tako da nije potrebno značajnije otežavanje isplake koja se koristi tijekom bušenja kroz geotermalno ležište. Otežavanje isplake bit će potrebno tijekom bušenja kroz eventualno prisutne natpritisnute zone prije samog geotermalnog ležišta. Međutim, HT uvjeti kakvi vladaju u geotermalnim bušotinama negativno utječu na svojstva isplake jer izazivaju smanjenje viskoznosti i povećanje filtracije isplake uz posljedicu lošijeg iznošenja krhotina stijena i čišćenja kanala bušotine. Dodatno, bentonit kao najčešće korišten viskozifer u isplakama, u HT uvjetima teži koagulaciji što je također uzrok smanjenja viskoznosti. Fenomen koagulacije bentonita događa se pri temperaturama višim od 120 °C (250 °F) (Mohamed et al., 2021). Mohamed i suradnici proveli su istraživanje ovisnosti viskoznosti isplake o temperaturi. Koristili su 4 kemijska viskozifera. Samo jedan od njih pokazao je povećanje viskoznosti s povećanjem temperature, dok su ostala tri imali trend smanjenja viskoznosti s povećanjem temperature. Na slici 3-3. nalazi se dijagram ovisnosti viskoznosti isplake o temperaturi. Također, visoke temperature nisu pogodne za korištenje nekih aditiva u isplaci. Primjerice, većina polimera se raspada na temperaturama između 120 i 150 °C. Neki tipovi sintetičkih polimera mogu se koristiti i do 240 °C (Gaurina-Međimurec, 2018).



Slika 3-3. Ovisnost prividne viskoznosti isplake o temperaturi (Mohamed et al., 2021)

3.1.2. Gubljenje cirkulacije i filtracija

Gubljenje cirkulacije. Integritet i kompaktnost formacija za iskorištavanje geotermalne energije su uglavnom loši te variraju od loše-konsolidiranih do jako-raspucanih formacija s malim slojnim tlakom. U takvim stijenama mogu se tijekom bušenja očekivati gubitci značajnih količina isplake te cementne kaše tijekom cementacije, a nije rijetkost da se cementna kaša uopće ne pojavi na površini (Finger i Blankenship, 2010).

Da bi se izbjeglo gubljenje cementne kaše tijekom cementacije u području zona malog tlaka koristi se cementna kaša male gustoće, odnosno kaša u koju su dodani olakšivači. Neki od najčešćih olakšivača su lebdeći pepeo, bentonit ili perlit (Gaurina-Međimurec, 2021). Ipak, za geotermalne bušotine se ne preporučuje korištenje lebdećeg pepela jer postoji mogućnost njegove degradacije tijekom vremena na temperaturama iznad 230 °C, što će za posljedicu imati smanjenje tlačne čvrstoće (Salim i Amani, 2013).

Filtracija. Filtracija predstavlja proces izdvajanja tekuće faze iz suspenzije (iz isplake ili iz cementne kaše) pod djelovanjem diferencijalnog tlaka. Odvija se i u statičkim i u dinamičkim uvjetima.

Mali slojni tlakovi i raspucane stijene dovode do izdvajanja filtrata iz isplake što se sprječava ili smanjuje stvaranjem žilavog i tankog isplačnog obloga na stijenkama kanala bušotine. Takav oblog ograničava daljnje prodiranje filtrata u stijenu, očvršćuje stijenke kanala bušotine i sprječava njihovo zarušavanje. Aditivi koji se koriste za smanjenje filtracije isplake trebaju biti stabilni na temperaturama koje vladaju u geotermalnim bušotinama. To se postiže korištenjem sintetičkih polimera ili nekim vrstama nanočestica koje mogu biti stabilne i do 325 °C (Cheraghian, 2020).

Filtraciju cementne kaše je gotovo nemoguće izbjeći, samo je pitanje kakvog će intenziteta biti. Za cementaciju kolona zaštitnih cijevi u geotermalnim bušotinama koriste se cementne kaše male gustoće. One često imaju velik vodo-cementni faktor pa je, zbog visokog sadržaja vode u cementnoj kaši, cementacija geotermalnih bušotina veliki izazov. Također, s porastom temperature povećava se i filtracija cementne kaše. Smanjenje filtracije postiže se pomoću jednog ili više sljedećih mehanizama (Gaurina-Međimurec, 2021):

- poboljšanjem distribucije čestica cementne kaše (tako djeluju dispergatori i bentonit),

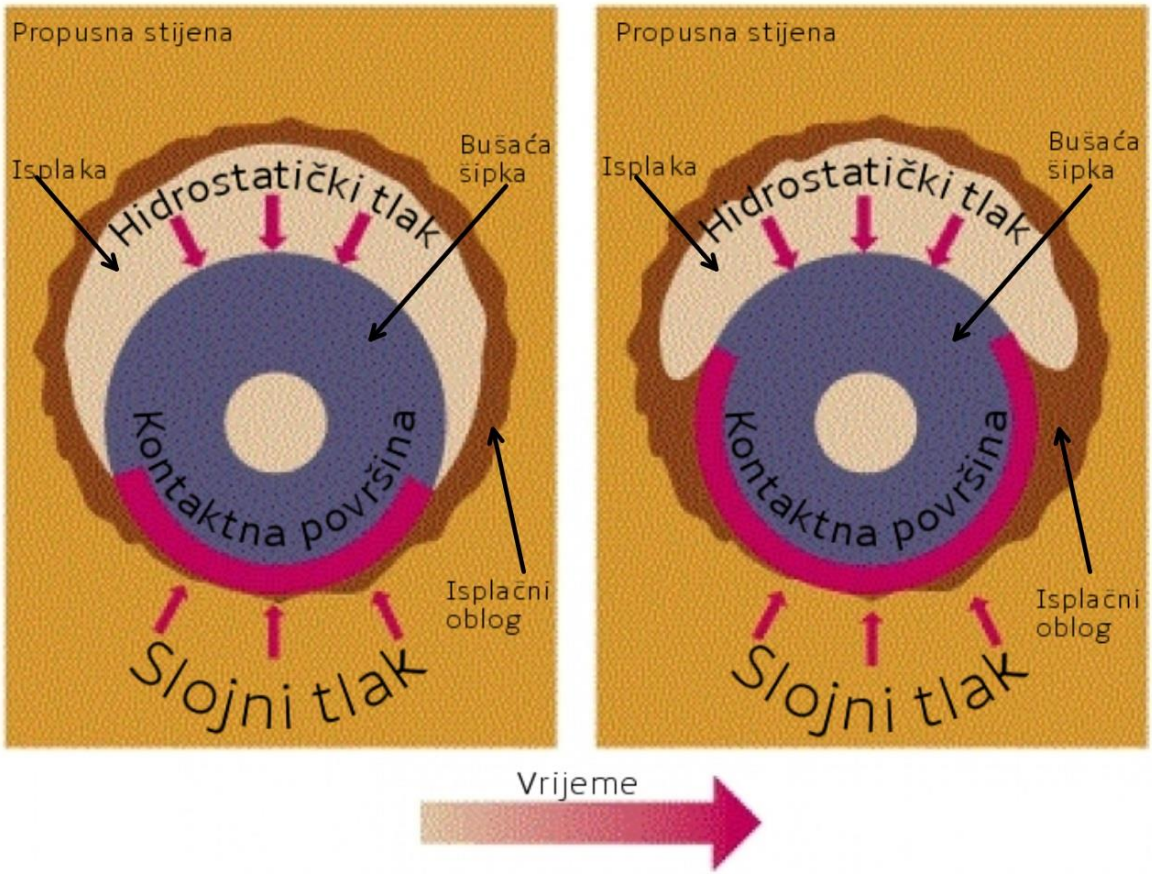
- povećanjem viskoznosti tekuće faze (vode) cementne kaše (tako najvjerojatnije djeluju derivati celuloze; nedostatak je povećanje viskoznosti same cementne kaše) te
- formiranjem nepropusnog filma između cementnog obloga i poroznih stijena (tako najvjerojatnije djeluju sintetički polimeri).

Filtracija isplake i cementne kaše je jedna od osnovnih laboratorijskih analiza koje se rade prilikom određivanja odgovarajuće recepture isplake ili cementne kaše. Filtracija se određuje uređajem koji se naziva filter preša, a postoje API (engl. *American Petroleum Institute*) i HPHT filter preše. HPHT filter preša sastoji se od ćelije u koju se ulije isplaka ili cementna kaša. Na gornji kraj ćelije postavlja se poklopac s otvorom kroz koji se dovodi medij za ostvarenje tlaka. Na donji kraj ćelije postavlja se dno koje ima odvodnu cjevčicu i brtve potrebne da osiguraju djelotvorno brtvljenje te sklop za ostvarivanje protutlaka. Ispitivanje filtracije traje 30 minuta, a volumen filtrata se izražava mL. Medij za ispitivanje filtracije isplake je filtar papir ili porozni metalni disk, a medij za ispitivanje filtracije cementne kaše su čelična sita (najčešće se postavljaju dva) Na slici 3-4. prikazana je HPHT filter preša.

Slika 3-4. Fann HPHT filter preša (https://www.fann.com)

3.1.3. Debeli isplačni oblog

Tijekom izrade kanala bušotine, filtracija isplake može dovesti do formiranja debelog isplačnog obloga na njegovim stijenkama. To dovodi do uvjeta koji su povoljni za razvoj diferencijalnog prihvata alatki. Diferencijalni prihvat definira se kao prihvat bušaćih alatki prouzročen diferencijalnim tlakom. Diferencijalni tlak se definira kao razlika između hidrostatskog tlaka isplake i slojnog tlaka. On djeluje na niz bušaćih alatki tako da ih „lijepi“ za isplačni oblog kojim su obložene stijenke kanala bušotine u području propusnih naslaga (Simon et al., 2005). Na slici 3-5. shematski je prikaz diferencijalnog prihvata.



Slika 3-5. Shematski prikaz diferencijalnog prihvata (https://glossary.oilfield.slb.com)

Na slici 3-5. je vidljivo da, s vremenom, uslijed djelovanja hidrostatičkog tlaka stupca isplake koji je veći od slojnog tlaka, dolazi do povećavanja kontaktne površine između bušaćih alatki i isplačnog obloga. Diferencijalni prihvat se može dogoditi u području bušaćih šipki, ali je ipak veća vjerojatnost da će se dogoditi u području teških šipki jer su one većeg promjera od bušaćih šipki pa je samim tim i zazor između teških šipki i isplačnog obloga manji. Diferencijalni prihvat je nepovoljna i neželjena pojava koja se djelomično može

izbjeći formiranjem kvalitetnog (tanak, žilav i nepropustan) isplačnog obloga, odnosno izborom odgovarajućeg sastava isplake. Diferencijalni prihvat dovodi do zastoja u procesu bušenja kao i u procesu ugrađivanja zaštitnih cijevi što u konačnici znači povećanje troškova izrade bušotine.

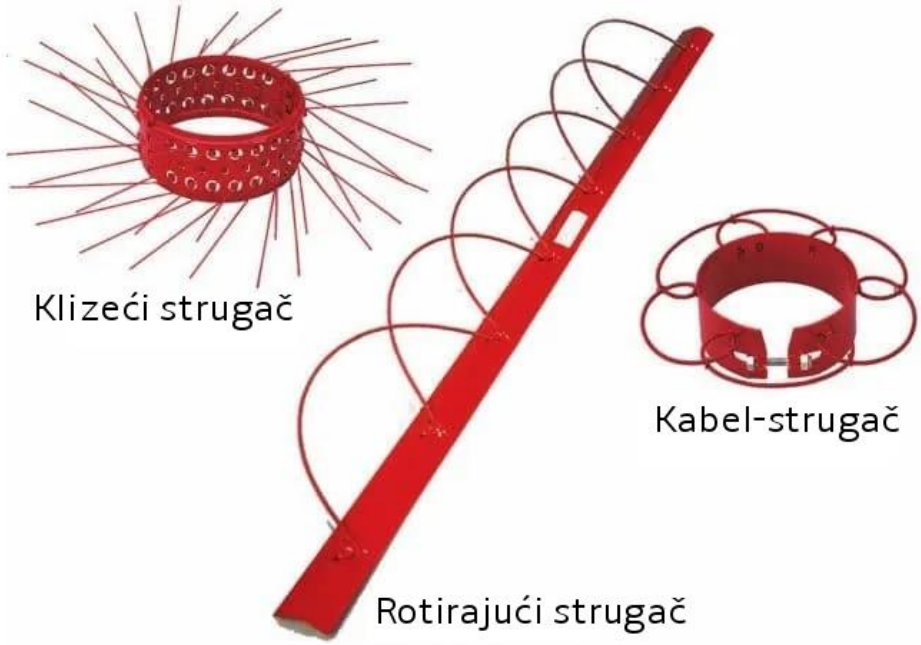
Gubitak filtrata isplake, ovisi o propusnosti slojeva kroz koje se buši te o sastavu isplake tj. dodanim aditivima. Preporuča se da 30-minutna filtracija isplake u vertikalnim HPHT bušotinama bude između 15 i 45 mL (Gaurina-Međimurec, 2018). Prije cementacije, isplačni oblog se treba ukloniti sa stijenki kanala bušotine mehaničkim ili kemijskim metodama.

Kemijsko ispiranje bušotine prije same cementacije vrši se s više različitih, kemijski obrađenih fluida. Moguće je koristiti kiseline, enzime, obrađenu slojnu vodu ili njihovu kombinaciju (Finger i Blankenship, 2010).

Mehaničko uklanjanje isplačnog obloga postiže se:

a) pomicanjem kolone zaštitnih cijevi gore-dolje,
b) rotacijom kolone zaštitnih cijevi te
c) postavljanjem strugača na zaštitne cijevi.

Uloga strugača je mehanički sastrugati što je više moguće isplačnog obloga kako bi se postigla što kvalitetnija veza cementnog kamena i stijenki kanala bušotine. Neki tipovi strugača prikazani su na slici 3-6.



Slika 3-6. Strugači (https://www.drillingmanual.com)

3.1.4. Utjecaj kiselih plinova

Geotermalne vode često sadrže kisele plinove među kojima su najzastupljeniji sumporovodik (H_2S) i ugljikov dioksid (CO_2), te druge korozivne elemente i spojeve. Kiseli plinovi u kemijskoj reakciji s vodom daju kiseline koje nagrizaju bušaće alatke, ugrađenu opremu u bušotini, ali i opremu na površini kroz koju protječu fluidi pridobiveni iz bušotine, a koji u određenoj mjeri sadrže kiseline. Osim na metalne površine, CO_2 utječe na degradaciju i smanjenje tlačne čvrstoće cementnog kamena, a time i na povećanje njegove propusnosti. CO_2 prodire u kapilarne pore cementnog kamena te u kemijskoj reakciji s vodom daje ugljičnu kiselinu (H_2CO_3). Kemijska jednadžba nastanka ugljične kiseline prikazana je jednadžbom 3-1.

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \tag{3-1}$$

Ugljična kiselina reagira s kalcijevim hidroskidom ($Ca(OH)_2$), jednim od minerala koji tvore cementni kamen. U toj reakciji dolazi do karbonizacije kalcijevog hidroksida, a kemijska jednadžba je prikazana kemijskom jednadžbom 3-2.

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O \tag{3-2}$$

Reakcija karbonizacije će uzrokovati stvaranje kalcijevog karbonata ($CaCO_3$) koji će reagirati sa stvorenom ugljičnom kiselinom i na taj način se otapati u njoj. Otapanje kalcijevog karbonata u ugljičnoj kiselini prouzročit će smanjenje tlačne čvrstoće i povećanje propusnosti cementnog kamena. Otapanje $CaCO_3$ je dugotrajan fenomen i događa se isključivo kada je cementni kamen u kontaktu s vodom koja sadrži otopljeni CO_2 (Gaurina-Međimurec i Pašić, 2011). Kemijska jednadžba otapanja kalcijevog karbonata prikazan je jednadžbom 3-3, a kao produkt reakcije nastaje kalcijev bikarbonat ($Ca(HCO_3)_2$).

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca(HCO_3)_2 \tag{3-3}$$

H_2S ne izaziva koroziju cementnog kamena, ali može izazvati jaku koroziju zaštitnih cijevi i bušaćeg alata (Gaurina-Međimurec, 2021).

Iako se isplake dizajniraju tako da imaju, među ostalim, i sposobnost sprječavanja korozije metala, ipak u mnogim slučajevima dolazi do korozije. Kiseli plinovi CO_2 i H_2S značajno ubrzavaju koroziju čelika te time smanjuju radni vijek bušaćeg alata.

Željezo iz čelika reagira s ugljikovim dioksidom te se na površini metala taloži produkt te reakcije. Produkt reakcije je željezov (II) karbonat ($FeCO_3$). Reakcija je prikazana jednadžbom 3-4.

$$CO_2 + H_2O + Fe \rightarrow FeCO_3 + H_2 \quad (3\text{-}4)$$

Metalni dijelovi se također mogu oštetiti ukoliko dođu u kontakt s H_2S-om i vodom. Voda je važan element koji čini H_2S korozivnim (Shadravan, 2015). Dolazi do reakcije prikazane jednadžbom 3-5, uslijed koje se smanjuje debljina stijenke i čvrstoća korodirane cijevi. Produkt reakcije je FeS koji se taloži na površini metala.

$$H_2S + Fe + H_2O \rightarrow FeS + 2H + H_2O \quad (3\text{-}5)$$

Na slici 3-7. nalazi se zaštitna cijev korodirana H_2S-om.

Slika 3-7. H_2S korozija (http://himipex.com)

U sjevernoj Italiji je izbušeno nekoliko geotermalnih bušotina. U tim bušotinama je prosječan protok vodene pare iznosio između 10 i 50 tona po satu, te je u prosjeku vodena para sadržavala 2% volumno raznih plinova (Alescio et al., 1999). Tipičan sastav plinova prikazan je u tablici 3-1.

Tablica 3-1. Tipičan sastav plinova proizvedenih s vodenom parom na geotermalnim bušotinama sjeverne Italije (Alescio et al., 1999)

Komponenta	**Udio (%)**
Ugljikov dioksid (CO_2)	85
Sumporovodik (H_2S)	3,5
Metan (CH_4)	3
Vodik (H_2)	7
Dušik (N_2)	1,5

Zbog povišenog udjela sumporovodika, bilo je potrebno instalirati senzore za mjerenje zasićenosti zraka H_2S-om. Problemi s korozijom na ugrađenoj opremi počeli su se javljati 3 do 6 mjeseci nakon puštanja bušotine u rad. Kako bi se izbjegli problemi s korozijom, korištene su legure otporne na koroziju.

4. IZRADA GEOTERMALNIH BUŠOTINA

Bušenje geotermalnih bušotina je jako slično bušenju naftno-plinskih bušotina. Glavne razlike između bušenja geotermalnih i naftno-plinskih bušotina su (Greene et al., 1982):

1) gotovo sva bušenja geotermalnih bušotina provode se pod malim tlakovima,
2) većina geotermalnih bušotina doseže relativno plitke dubine uz veliku temperaturu ciljne formacije i
3) izuzev sedimentnih bazena, većina geotermalnih bušotina izbušena je u magmatskim i metamorfnim stijenama.

U ovom poglavlju bit će obrađena postrojenja korištena za izradu geotermalnih bušotina, dlijeta, isplake, zaštitne cijevi te cementacija geotermalnih bušotina.

4.1. Bušaća postrojenja

Ovisno o konačnoj dubini bušotine, mogu se koristiti postrojenja koja se koriste za naftno-plinske bušotine ili mobilna postrojenja. Mobilna postrojenja koriste se za manje dubine. Moguće je korištenje jednog ili više načina rotacije bušaćeg niza. To su:

1) vrtaći stol,
2) vršni pogon i
3) uronjeni motor.

Islandska tvrtka „*Iceland Drilling*“ na svojim web-stranicama navodi da za operacije geotermalnog bušenja koriste nekoliko vrsta postrojenja. Najmanje među njima je mobilno postrojenje koje ima nosivost na kuki od 490,33 kN (50 t), a za rotaciju bušaćeg niza koristi se vršni pogon koji može proizvesti okretni moment od 23 000 Nm. Maksimalna dubina bušenja je 1 300 m (https://www.jardboranir.is/equipment-rigs/saga/). Postrojenje je prikazano na slici 4-1. Ista tvrtka posjeduje i postrojenja za veće dubine. Najveće postrojenje s kojim izvode radove je nosivosti 2 667,41 kN (272 t). Također, koristi snažan vršni pogon okretnog momenta od 50 000 Nm. Maksimalna dubina bušenja s ovim postrojenjem je 5 500 m (https://www.jardboranir.is/equipment-rigs/tyr/). Postrojenje je prikazano na slici 4-2.

Slika 4-1. Mobilno bušaće postrojenje Saga Soilmec G-55 (https://www.jardboranir.is/equipment-rigs/saga/)

Slika 4-2. Bušaće postrojenje Tyr Drillmec HH-300
(https://www.jardboranir.is/equipment-rigs/tyr/)

4.2. Niz bušaćih alatki

Niz bušaćih alatki sastoji se od dlijeta, teških šipki i bušaćih šipki. Dlijeto je potrebno za razrušavanje stijena te će se prilikom izrade bušotine najviše oštetiti (istrošiti), a često će se prilikom izrade zahtjevnijih bušotina potrošiti i nekoliko dlijeta. Teške šipke služe za ostvarenje opterećenja na dlijeto i kao medij kroz koji prolazi isplaka, kao i za prijenos rotacije na dlijeto. Uloga bušaćih šipki je prijenos rotacije na dlijeto te također služe kao medij za provođenje isplake. Teške i bušaće šipke se ne troše tolikom brzinom kao i dlijeta te se s jednom garniturom šipki može izbušiti na desetke bušotina. Stoga, biti će obrađena samo dlijeta kao element niza bušaćih alatki koji trpi najveća opterećenja i najviše se troši.

Odabir dlijeta za izradu kanala geotermalne bušotine ne razlikuje se od odabira dlijeta za izradu naftnih i plinskih bušotina. Informacije potrebne za dizajn programa korištenja dlijeta su (Greene et al., 1982):

1) bušaći dnevnici o korištenim dlijetima u istražnim bušotinama na području bušenja (ako postoje),
2) geološki presjek formacija kroz koje se buši → vrste stijena,
3) temperature i tlakovi u sloju,
4) vanjski promjeri i dubine ugradnje zaštitnih cijevi,
5) cijena dlijeta i
6) dubina ciljane formacije.

Pošto se geotermalna ležišta najčešće nalaze u magmatskim i metamorfnim stijenama, koje su uglavnom veće tvrdoće od sedimentnih stijena, potrebno je koristiti odgovarajuća dlijeta. To mogu biti (Matanović, 2013):

a) žrvanjska dlijeta s čeličnim zubima za tvrde i abrazivne stijene,
b) žrvanjska dlijeta s insertima za tvrde i abrazivne stijene,
c) dijamantna dlijeta i
d) polikristalinska dlijeta.

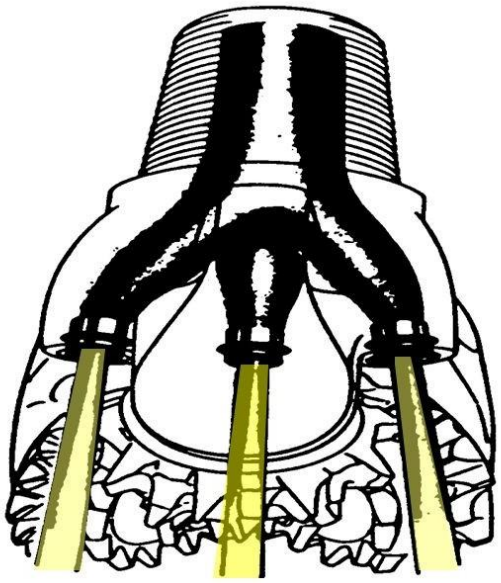
4.2.1. Žrvanjska dlijeta

Žrvanjska dlijeta su najčešće korišten tip dlijeta u naftnoj industriji (Matanović, 2013). Sastoje se od tri žrvnja, rijetko od dva. Svaki žrvanj ima svoju osovinu kao i sustav ležajeva te se rotacija vrtaćeg stola preko bušaćeg niza prenosi na samo dlijeto, a time i na žrvnjeve.

Za bušenje tvrdih i vrlo tvrdih stijena koriste se dlijeta čiji su zubi ojačani u cijelosti. Također, umjesto zubi, žrvanjska dlijeta mogu imati inserte. Za bušenje srednje tvrdih i tvrdih formacija koriste se dlijeta čiji su zubi kratki, zaobljeni i bliže smješteni; za razliku od žrvanjskih dlijeta za meke stijene kod kojih su zubi dugi, oštri i široko razmaknuti. Inserti žrvanjskih dlijeta za tvrde stijene su koničnog oblika ili u obliku polukugle (Matanović, 2013).

Dlijeto osim funkcije razrušavanja stijena mora osigurati i prolaz isplake, koja ga podmazuje, hladi i čisti. Mlaznice značajno povećavaju brzinu strujanja isplake što uvelike pridonosi lakšem odstranjivanju krhotina s dna te podizanju krhotina u prstenasti prostor

između dlijeta i stijenke kanala bušotine. U mekšim stijenama mlaz isplake povećava mehaničku brzinu bušenja jer posjeduje dovoljnu hidrauličku snagu za razrušavanje stijene. Shematski prikaz dlijeta s mlaznicama nalazi se na slici 4-3.



Slika 4-3. Dlijeto s mlaznicama (Matanović, 2013)

Materijali od kojih su izrađena dlijeta za izradu kanala geotermalne bušotine trebaju biti čvrsti, izrazito kompaktni i otporni na djelovanje topline. Najčešći materijali za izradu takvih dlijeta su legirani čelici s velikim postotkom nikla i molbidena. Tvrdi čelici sadrže još i krom, ugljik, silicij i kobalt. Volframov karbid se primjenjuje za ojačavanje reznih površina i površina koje su u kontaktu sa stijenom – ramena dlijeta i obodi žrvnjeva, te za izradu inserata dlijeta za vrlo tvrde formacije.

Za poboljšavanje svojstava određenih dijelova dlijeta primjenjuju se toplinske obrade. Postupak podrazumijeva obogaćivanje ugljikom čime se povećava tvrdoća vanjske ljuske. Zagrijavanjem i kaljenjem postiže se maksimalna tvrdoća tog sloja, a popuštanjem se taj sloj oslobađa svih preostalih napetosti uz zadržavanje maksimalne čvrstoće (Matanović, 2013). Na slici 4-4. prikazani su žrvanjsko dlijeto sa zubima i s insertima.

Slika 4-4. Žrvanjska dlijeta (https://www.researchgate.net)

4.2.2. Dijamantna i polikristalinska dlijeta

Druga skupina dlijeta su dijamantna i polikristalinska (PDC) dlijeta. Njihova glavna razlika u odnosu na žrvanjska dlijeta je u konstrukciji i cijeni samih dlijeta koja može biti tri do četiri puta veća od žrvanjskih dlijeta. Glavna konstrukcijska razlika je u tome što dijamantna i PDC dlijeta nemaju žrvnjeve već su izrađeni iz jednog komada lijevanog metala. Materijal korišten za izradu takvih dlijeta je već naveden kod žrvanjskih dlijeta (legure čelika s niklom, molbidenom, kromom, ugljikom, silicijem, kobaltom, te volframov karbid).

Najveća konstrukcijska prednost dijamantnih i PDC dlijeta je u tome što nemaju pokretnih dijelova te su zbog toga dugotrajniji od žrvanjskih. Razlika dijamantnih i PDC dlijeta je u tome što se u dijamantnim dlijetima koriste prirodni dijamanti, a u PDC dlijetima sintetizirani dijamanti. Dijamant je najtvrđi poznati element u prirodi. Dijamantna i PDC dlijeta se izrađuju na način da se dijamanti utiskuju u tijelo dlijeta koje može biti čelično ili od volframovog karbida, s tim da su 2/3 duljine dijamanta unutar tijela, a 1/3 služi kao element za razrušavanje stijena. Veličina i međusobni razmak elemenata za razrušavanje najmanji su kod dlijeta za tvrde stijene. Na slici 4-5. prikazano je PDC dlijeto.

Slika 4-5. PDC dlijeto (https://www.drillingcontractor.org)

4.3. Isplaka

Isplaka je od vitalnog značaja za proces bušenja jer obavlja niz funkcija kao što su (Gaurina-Međimurec, 2020):

- kontrola tlakova u bušotini,
- osiguravanje stabilnosti kanala bušotine,
- osiguravanje djelovanja uzgona na niz bušaćih alatki i zaštitnih cijevi,
- formiranje kvalitetnog isplačnog obloga,
- zadržavanje krhotina u suspenziji kada je prekinuta cirkulacija,
- smanjenje erozije stijenki kanala bušotine,
- čišćenje, hlađenje i podmazivanje dlijeta,
- uklanjanje krhotina s dna i iz kanala bušotine i
- povećanje mehaničke brzine bušenja.

Isplaka se pomoću isplačnih pumpi protiskuje kroz bušaće i teške šipke, mlaznice dlijeta te od dlijeta kreće povratni tok isplake na površinu kroz prstenasti prostor između bušaćeg alata i stijenki kanala bušotine. Pri tome isplaka na površinu iznosi krhotine razrušenih stijena prema površinskom sustavu za pročišćavanje isplake. Cirkulacija isplake može biti i indirektna, tj. da se isplaka utiskuje kroz prstenasti prostor, a na površinu dolazi kroz niz bušaćih alatki.

Postoje četiri vrste isplake koje se koriste za izradu geotermalnih bušotina. To su (Chemwotei, 2011):

1) isplake na bazi vode (bentonit i polimeri),
2) čista voda,
3) aerizirana isplaka i
4) zrak ili pjena.

Isplake koje se koriste kod izrade geotermalnih bušotina slične su isplakama koje se koriste u naftnoj industriji, ali ne moraju biti tretirane kemijskim dodacima u istoj mjeri. Budući da je većina geotermalnog bušenja u tvrdim stijenama i nema problema s povećanim slojnim tlakovima (koji zahtijevaju otežane isplake), mogu se koristiti poprilično „jednostavne“ isplake. Zbog topline koju isplaka primi od stijena tijekom protjecanja prstenastim prostorom često je potreban rashladni toranj za održavanje temperature isplake unutar prihvatljivih granica.

Isplaka se sastoji od 3 komponente (Finger i Blankenship, 2010):

1) Bazni fluid: svježa voda, slojna voda ili ulje. Uljne i isplake na bazi vode su najčešće korišteni tipovi isplake kod bušenja kroz ležišta ugljikovodika. Isplake na bazi svježe vode su one koje se najčešće koriste za bušenje geotermalnih bušotina. Ponekad se slojna voda pridobivena iz geotermalnih ležišta može koristiti kod izrade geotermalnih bušotina ukoliko su gubitci isplake takvi da nema povratnog toka isplake na površini.
2) Aktivne čvrste čestice: gline koje se dodaju u svježu vodu kako bi se formirala koloidna otopina. Koloidne čestice su sve one čestice koje su manje od 2 μm (Gaurina-Međimurec, 2020) te one svojim među-privlačnim silama utječu na viskoznost isplake, a dostatna viskoznost je jako bitna za iznošenje krhotina stijena. Gline djeluju kao viskoziferi.

3) Inertne čvrste čestice: inertne čvrste čestice su sve one čestice koje se nalaze u isplaci u određenom trenutku, a koje su kemijski neaktivne odnosno ne reagiraju u kontaktu s vodom niti s ostalim aditivima. To su krhotine razrušenih stijena (zagađivači) te oteživači (barit, hematit, galenit, $CaCO_3$). Inertne čestice dalje utječu i na viskoznost isplake zbog povećanja trenja među česticama te joj povećavaju gustoću.

Također, u isplaci se nalaze i tvari koje se otapaju u njoj. To su tvari koje se ne mogu na mehanički način izdvojiti iz isplake, već samo pomoću kemijskih procesa. To su najčešće ioni kalcija, magnezija, arsena i klora, koji mogu biti prisutni u svježoj vodi koja se koristi kao bazni fluid za isplaku ili mogu u isplaku dospjeti naknadno otapanjem iz stijena kroz koje se buši (Finger i Blankenship, 2010). Neki izvori svježe vode mogu sadržavati dosta otopljenih iona te stoga nisu prihvatljivi za upotrebu kao bazni fluid.

Tijekom izrade geotermalnih bušotina uglavnom se koristi isplaka na bazi svježe vode uz dodatak bentonitne gline i polimera (Finger i Blankenship, 2010). Na slici 4-6. prikazan je izgled bentonitne isplake nakon izlaska iz bušotine.

Slika 4-6. Bentonitna isplaka (https://www.trenchlesspedia.com)

Isplaka može biti i aerizirana. To znači da se u isplaku injektira zrak, radi smanjenja njezine gustoće, što je potrebno napraviti ukoliko dolazi do značajnog gubitka isplake. Također, nije rijetka pojava da se kao fluid za čišćenje kanala koristi samo zrak. Ispuhivanje zrakom se koristi za geotermalne bušotine koje pridobivaju vruću vodenu paru (Finger i Blankenship, 2010). Ispuhivanje zrakom također ima prednosti što se tiče mehaničke brzine bušenja jer je ona tada veća nego kada se koristi isplaka.

4.3.1. Svojstva isplake

Isplaka se dizajnira na način da ima određena zahtijevana svojstva. Nakon izrade isplake, iznimno je važno konstantno pratiti i podešavati njezina svojstva kako bi se zadržala unutar projektiranih vrijednosti. Dizajn i održavanje isplake je kompleksan i zahtjevan proces, a provodi ga inženjer na terenu zadužen za isplaku. Svojstva isplake su (Chemwotei, 2011; Gaurina-Međimurec, 2018):

- Viskoznost: krucijalno je da je viskoznost dovoljno velika da isplaka bude sposobna iznositi krhotine stijena, a opet je bitno da viskoznost ne bude veća od određene vrijednosti kako ne bi došlo do prevelikih otpora protjecanju, što može dovesti do povećanja tlaka na sloj i gubljenja isplake, a posljedično i do dotoka.
- Gustoća: gustoća fluida utječe na hidrostatički, ali i na hidrodinamički tlak u kanalu bušotine. Što je isplaka veće gustoće, njezin stupac ostvaruje veći tlak na raskrivene stijene. Ako se očekuju veliki slojni tlakovi, isplaku se dizajnira tako da je njezina gustoća dovoljna da nadvlada slojni tlak i spriječi dotok slojnih fluida. Kod geotermalnih bušotina se češće radi o raspucanim stijenama s malim slojnim tlakovima tako da se isplake u tim slučajevima olakšavaju kako ne bi došlo do gubitka cirkulacije.
- Filtracija – isplačni oblog: isplaka treba formirati kvalitetan (žilav, tanak i nepropustan) isplačni oblog na stijenkama kanala bušotine kako bi se smanjilo izdvajanje filtrata u propusne zone i stabiliziralo stijenke kanala bušotine. Bentonitna isplaka će, zahvaljujući pločastim bentonitnim česticama, tvoriti bolji isplačni oblog od polimerne isplake. Ipak, polimeri (viskoziferi i smanjivači filtracije) dodani u isplaku smanjuju gubljenje filtrata u propusne stijene. Razlog tomu je njihov afinitet za vodu i formiranje bubrećih gelova koji čepe pore u propusnim stijenama.

- Mazivost: isplaka mora podmazivati dlijeto, bušaće alatke i stijenke bušotine. Sve isplake imaju određeni stupanj sposobnosti podmazivanja. Standardna mjera sposobnosti podmazivanja je koeficijent trenja koji se dodatno može smanjiti dodavanjem podmazivača (različiti tipovi nafte, sintetičke tekućine, grafit, PAT, glikol, glicerin i dr.) u isplake na bazi vode. Upotrebom isplake na bazi ulja postižu se manji koeficijenti trenja nego upotrebom isplaka na bazi vode. Međutim, ograničavajući faktor je zaštita okoliša, te visoka cijena uljne isplake u odnosu na isplaku na bazi vode.
- pH vrijednost: isplake su blago lužnate te je standardna pH vrijednost isplaka između 9,5 i 10,5. pH vrijednost isplake utječe na koroziju čelika, reološka svojstva isplake i na reakcije isplake s određenim mineralima probušenih stijena.
- Sadržaj čvrstih čestica: predstavlja mjeru koliko dobro radi površinski sustav za pročišćavanje isplake. Također, na temelju sadržaja čvrstih čestica odlučuje se hoće li isplaka biti pogodna za nastavak radova ili je potrebno izraditi novu isplaku.

Bušaći dnevnici s brojnih geotermalnih bušotina daju sljedeće raspone svojstava isplaka korištenih za njihovu izradu (Finger i Blankenship, 2010):

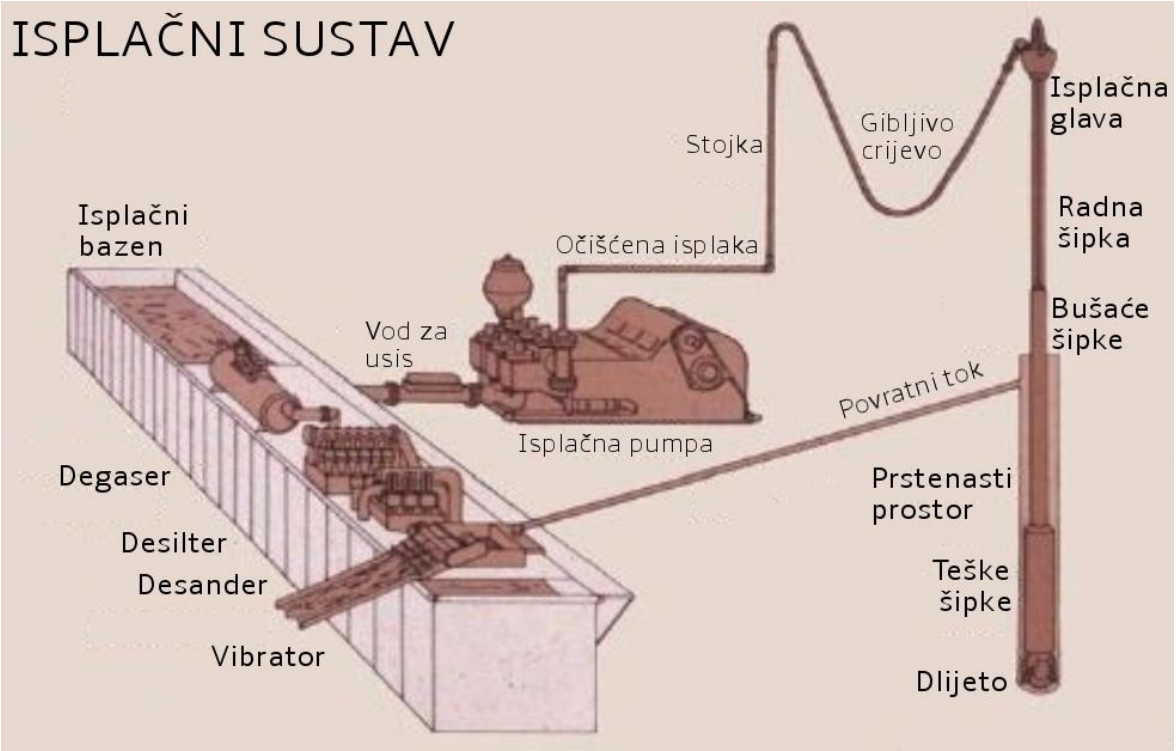
- gustoća: 1 030 – 1 150 kg/m^3,
- pH: 9,5 – 11,5 i
- plastična viskoznost: 0,01 – 0,02 Pa·s.

4.3.2. Površinski isplačni sustav

Isplaka cirkulira u zatvorenom sustavu. Glavne sastavnice sustava su:

- isplačne pumpe,
- niz bušaćih alatki kroz koje se isplaka protiskuje,
- mlaznice na dlijetu,
- površinski isplačni sustav (vibratori, desanderi, desilteri, otplinjivači, centrifuge).

Na slici 4-7. nalazi se shematski prikaz isplačnog sustava.

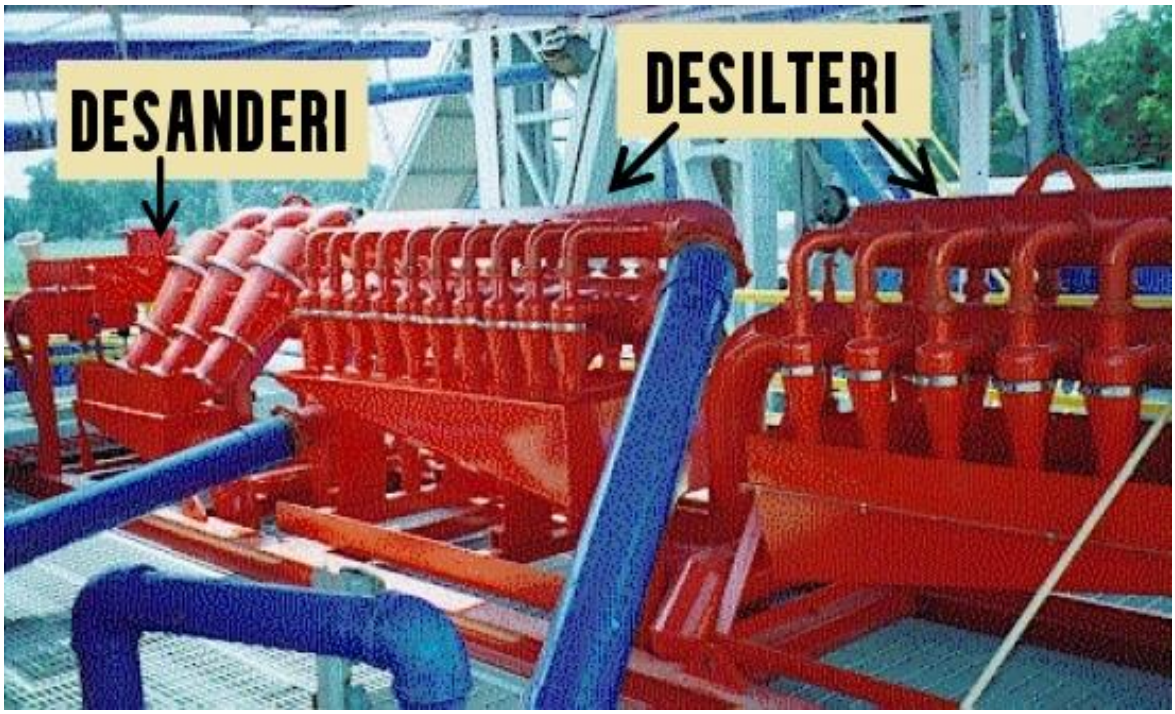


Slika 4-7. Shematski prikaz isplačnog sustava (https://www.pinterest.com)

Isplačne pumpe moraju biti dovoljnog kapaciteta (dobava i tlak) kako bi se postigla brzina mlaza dovoljna za uklanjanje krhotina razrušenih stijena s dna bušotine i uzlazna brzina dovoljna za njihovo iznošenje prstenastim prostorom na površinu. Isplaka treba prenijeti hidrauličku snagu na uronjeni motor u slučajevima kada se on koristi.

Kada isplaka s krhotinama razrušenih stijena pristigne iz bušotine na površinu, prolazi kroz nekoliko različitih uređaja spojenih u seriju. Prvi uređaj, nakon izljevne cijevi, je vibrator sa sitima. Na njemu se iz isplake odvajaju najkrupnije čvrste čestice. Sita se mijenjaju tijekom izrade bušotine (sita većih otvora zamjenjuju se sitima manjih otvora), a kroz njih prolazi isplaka s čvrstim česticama koje su manje od otvora na situ. Vibratori mogu biti s jednim sitom ili dva sita pri čemu se sito s većim otvorom nalazi iznad sita s manjim otvorima. Čvrste čestice izdvojene na sitima se odbacuju iz aktivnog optoka isplake i adekvatno zbrinjavaju jer predstavljaju otpad.

Nakon prolaska kroz vibracijska sita, tok isplake se usmjerava u desandere u kojima se iz isplake izdvajaju čestice veličine pijeska (>74 μm), pa u desiltere u kojima se iz isplake odvajaju čestice veličine silta (2 – 74 μm). Desanderi i desilteri rade na principu hidrociklona. Desanderi i desilteri su prikazani na slici 4-8.



Slika 4-8. Desanderi i desilteri (Gaurina-Međimurec, 2020)

Nakon hidrociklona, a zbog povećanog udjela koloidnih čestica, dio toka isplake se može usmjeriti kroz centrifuge u kojima se uklanjaju koloidne čestice iz isplake. U površinskom sustavu se nalazi i otplinjivač isplake, tj. degaser, kojim se uklanja plin ako dospije u isplaku iz stijena tijekom bušenja. U slučaju prevelikog zagrijavanja isplake, a to je slučaj kod izrade geotermalnih bušotina, u sklopu površinskog sustava nalaze se hladnjaci za hlađenje isplake. Kada je isplaka očišćena od čvrstih čestica, otplinjena i ohlađena, odvodi se u isplačni bazen (usisni bazen) iz kojeg se napaja isplačna pumpa te se isplaka ponovno utiskuje kroz bušaći niz u bušotinu. Ovaj kružni tok isplake je kontinuiran dok traje bušenje, a prekida se u slučajevima vađenja niza bušaćih alatki iz bušotine ili u slučaju nepredviđenih i neželjenih situacija.

Jako je bitno da je površinski sustav učinkovit i da isplaka što dulje zadrži željena svojstva te da se što manje isplake gubi u okolne propusne stijene. Ukoliko tijekom bušenja dođe do pogoršanja svojstava isplake, a obrada je preskupa ili neučinkovita, bit će je potrebno zamijeniti novom isplakom. Ako je potrebno praviti novu isplaku zbog pogoršavanja njezinih svojstava i nedovoljno dobrog ispiranja dna kanala bušotine, to je skupo zbog materijala i zbog gubitka vremena.

4.3.3. Specifičnosti isplaka kod geotermalnih bušotina

Visoke temperature koje su prisutne u geotermalnim bušotinama mogu značajno utjecati na bentonitnu glinu i aditive korištene za podešavanje svojstava isplake. Neke od specifičnosti isplaka za izradu geotermalnih bušotina su (Tuttle, 2005):

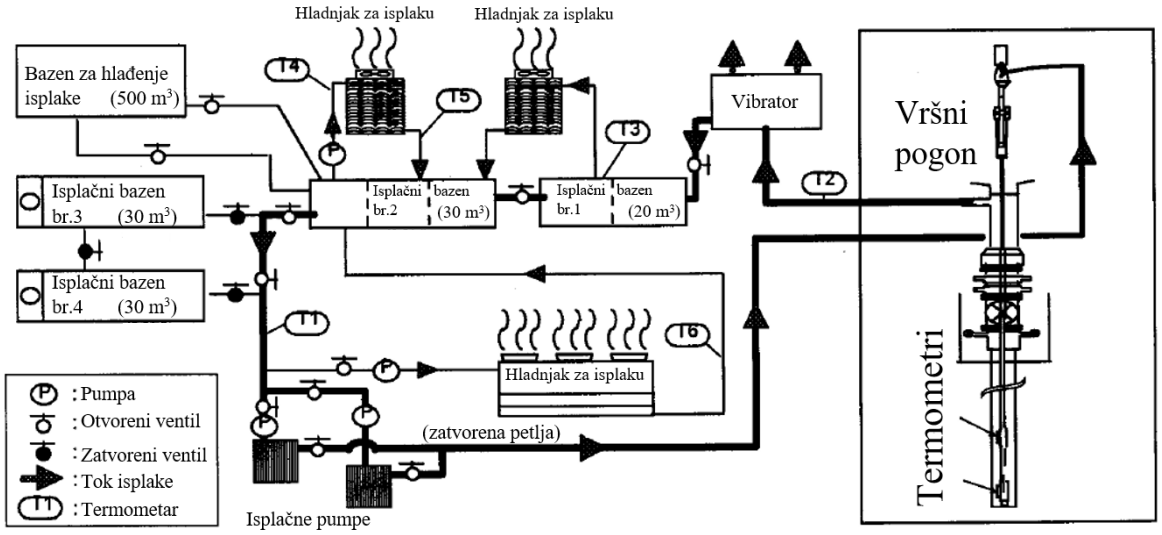
- Kontrola viskoznosti: bentonitna glina visoke kvalitete je primarni viskozifer u isplaci koja se koristi tijekom bušenja geotermalnih bušotina. Za povećanje viskoznosti koriste se i polimeri-viskoziferi, koji su dostupni kao tekućine ili kao praškasti materijal. Međutim, prirodni polimeri nisu temperaturno stabilni i gube svoja svojstva ako su duže vremena izloženi velikim temperaturama pa je njihova primjena ograničena na isplake koje se koriste u početnoj fazi bušenja dok temperatura na dnu bušotine još uvijek nije tolika da bi utjecala na njihove karakteristike. Za veće temperature prirodni polimeri nisu pogodni pa treba koristiti modificirane ili sintetičke polimere. Ukoliko dođe do prevelikog povećanja viskoznosti isplake zbog prisutnih krhotina stijena ili visoko-temperaturnog geliranja, viskoznost isplake treba smanjiti dodatkom odgovarajućih dispergatora kao što su polifosfati, tanini, lignini i lignosulfonati.
- Uklanjanje krhotina: pri većim temperaturama, izbušene krhotine stijena imaju veći afinitet da na sebe vežu slobodnu vodu iz isplake, nego što je to slučaj pri manjim temperaturama. U tom slučaju je efikasno pročišćavanje isplake još važnije nego inače kako bi se spriječilo geliranje i povećanje viskoznosti.
- Kontrola filtracije: zahtjevi za smanjenje filtracije kod geotermalnih bušotina su rigorozniji nego kod naftno-plinskih bušotina. U isplaku se dodaju smanjivači filtracije. Potrebno je analizirati vrijednost filtracije, ne samo za svaku bušotinu, nego i za svaki interval, tako da se ne koriste skupi aditivi za smanjenje filtracije tamo gdje to možda nije potrebno. Filtracija se može smanjiti dodavanjem sintetičkih polimera, akrilata i poliakrilata koji su temperaturno stabilni do 240 °C (Gaurina-Međimurec, 2018).
- pH vrijednost: visoka pH vrijednost je potrebna za smanjenje negativnih efekata određenih neželjenih spojeva koji se mogu naći u isplaci, kao što su CO_2 i H_2S koji stvaraju kisela okruženja, a koja se djelomično ili potpuno neutraliziraju višom pH vrijednošću isplake uslijed čega se smanjuje korozija. Također, viša pH vrijednost doprinosi djelotvornosti nekih isplačnih aditiva (npr. lignita). Za povećanje pH

vrijednosti isplake koristi se natrijev hidroksid (NaOH), a sve češće je u upotrebi i kalijev hidroksid (KOH) zbog svojih blagotvornih utjecaja na stabilnost kanala bušotine.

- Podmazivanje: ponekad bušaći niz zahtijeva dodatno podmazivanje ukoliko se radi o usmjerenom bušenju ili o jezgrovanju, a pogotovo u slučaju kada nema povratnog toka isplake na površini. Podmazivači na ugljikovodičnoj bazi često gube svoja svojstva pri visokim temperaturama, ali postoje ekološki prihvatljivi podmazivači koji su se pokazali adekvatnima za visoke temperature, kao što su grafit ili određene specijalno pripremljene mješavine.

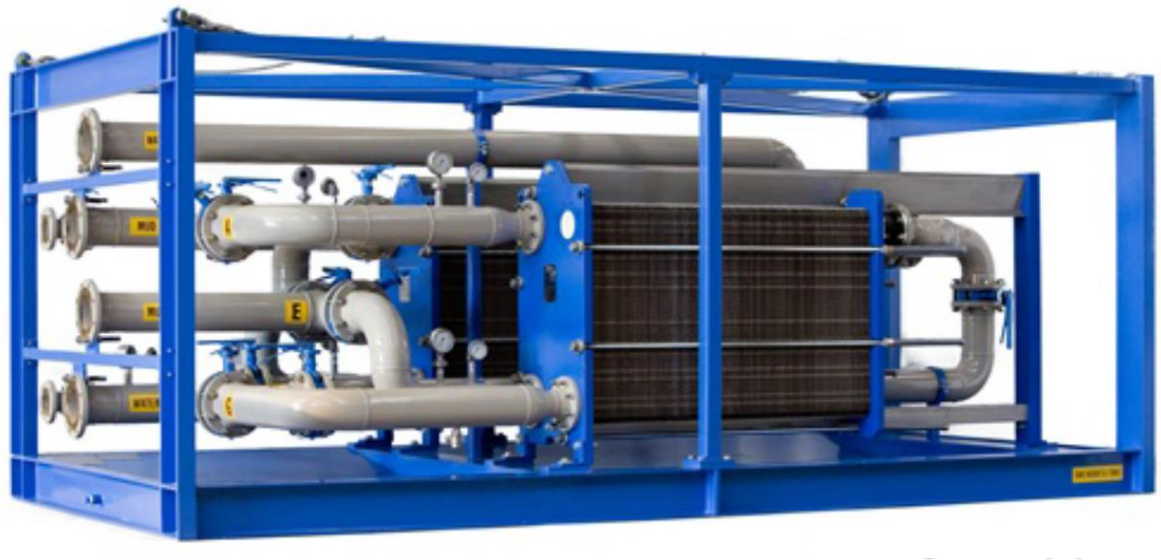
Osim bentonitne suspenzije, za ispiranje kanala bušotine, tijekom bušenja kroz zone gubljenja i bez povratnog toka isplake na površinu, poželjno je koristiti čistu vodu. Bušenje bez povrata isplake zahtijeva značajne količine svježe vode i ne može se primijeniti u svim bušotinama. Postojanje zona gubljena isplake može dovesti i do značajnih problema prilikom cementacije bušotina pa se unaprijed mora o tome voditi računa te odgovarajuće dizajnirati cementnu kašu kao i sam proces cementacije.

Saito i Sakuma su u svom radu iz 2000. godine obradili primjer iz prakse u kojemu je u Japanu izbušena geotermalna bušotina te je tijekom bušenja statička temperatura na dnu bušotine bila preko 500 °C. Shematski prikaz površinskog isplačnog sustava prikazan je slikom 4-9. U sustav pročišćavanja isplake bilo je potrebno postaviti nekoliko hladnjaka isplake kako bi se zadržalo isplaku odgovarajućih svojstava.



Slika 4-9. Shematski prikaz isplačnog sustava korištenog za izradu bušotina s temperaturama preko 500 °C (Saito i Sakuma, 2000)

U površinskom isplačnom sustavu nalazili su se i hidrocikloni, ali oni nisu prikazani na slici 4-9. Korištena su tri hladnjaka za isplaku te je bazen kapaciteta 500 m^3 također služio za hlađenje isplake. Na slici 4-10. prikazan je hladnjak za isplaku. Bušenje u takvim uvjetima bilo je jako zahtjevno jer je bilo potrebno konstantno protiskivati ohlađenu isplaku kroz bušaći niz kako bi ga se ohladilo da ne dođe do prevelikih naprezanja uslijed termičke ekspanzije materijala. Također, konstantno se pratilo i temperaturu isplake na više lokacija, tako je postavljeno 6 termometara u površinskom sustavu za pročišćavanje isplake, a dva dodatna termometra bila su integrirana u niz bušaćeg alata i mjerila su trenutnu temperaturu u bušotini. Jedan od tih termometara nalazio se neposredno iznad dlijeta, dok je drugi dubinski termometar bio između teških i bušaćih šipki.



Slika 4-10. Hladnjak za isplaku (https://ots.as)

4.4. Bušenje u uvjetima podtlaka

Geotermalne bušotine karakterizira visoka temperatura i nizak slojni tlak. Zbog malog slojnog tlaka i značajno raspucanih formacija potrebno je svesti gubitak isplake na minimum. U tu svrhu isplake se olakšavaju što je više moguće ili se pak koristi ispuhivanje zrakom ili pjenom. Moguće je primijeniti bušenje u uvjetima podtlaka (UBD; engl. *Under Balanced Drilling*) i/ili bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (MPD; engl. *Managed Pressure Drilling*).

Tijekom bušenja u uvjetima podtlaka (UBD), hidrostatički tlak stupca fluida isplake je manji od slojnog tlaka. Bušenje u uvjetima podtlaka zahtijeva korištenje aeriziranih isplaka i upotrebu rotirajućeg preventera jer se buši u uvjetima kontroliranog dotoka. Potrebno je

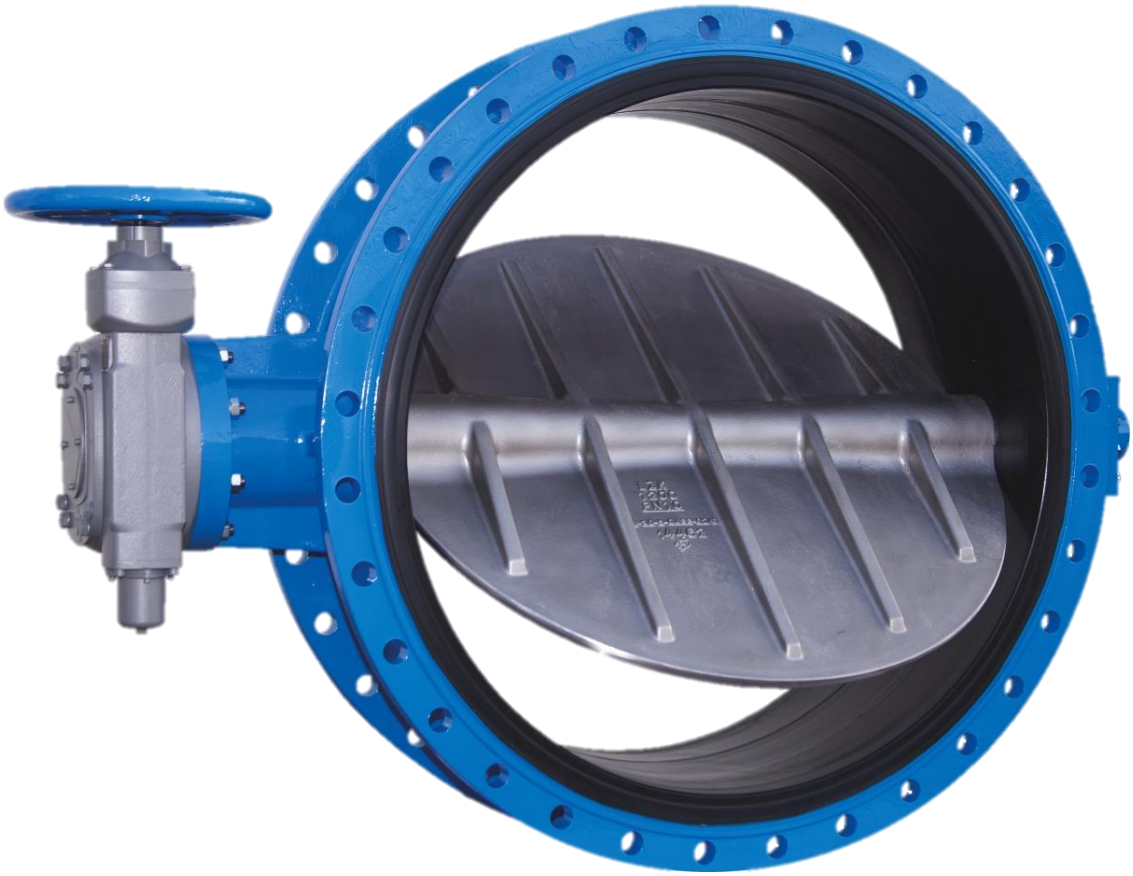
kontrolirati diferencijalni tlak u prstenastom prostoru kako ne bi došlo do prevelike razlike između slojnog i hidrostatičkog tlaka isplake i destabiliziranja stijenki kanala bušotine.

Tijekom bušenja u uvjetima kontroliranog tlaka (MPD), tlak se kontrolira s površine jer se koristi rotirajuća bušaća glava koja brtvi oko bušaćih šipki i omogućava djelovanje željenog tlaka s površine na stupac isplake u prstenastom prostoru.

Za uspješno izvođenje bušenja u uvjetima podtlaka potrebno je imati odgovarajuću dodatnu opremu površinskog isplačnog sustava. Najprije su to kompresori koji komprimiraju zrak kojim će se aerizirati isplaka. Postoje dvije vrste kompresora, ovisno o izlaznom tlaku kojeg su sposobni postići (prvi i drugi stupanj kompresije). U sustavu je potrebno imati i pumpu za aditive koji se kao fina maglica miješaju s komprimiranim zrakom. Koriste se aditivi za pjenjenje, sprječavanje korozije i ostale potrebne kemikalije.

Ne koriste se standardne bušaće glave, već se koriste rotirajuće bušaće glave, prikazane na slici 4-11. koje brtve prstenasti prostor tako da ne bude pod utjecajem atmosferskog tlaka te kako bi se moglo kontrolirati dotok. Na izljevnoj cijevi postavljaju se leptirasti ventili (Slika 4-12.) preko kojih se kontrolira dotok, a time i tlak u prstenastom prostoru, a u bušaći niz protupovratni ventili (Slika 4-13.) koji sprječavaju povratak aerizirane isplake ili vruće vode/pare iz ležišta. U površinskom sustavu pročišćavanja isplake potrebno je postaviti separator u kojeg aerizirana isplaka ulazi najprije nakon izlaska iz bušotine. U separatoru se odvajaju tekuća i plinovita faza (vodena para). Separator je prikazan na slici 4-14. Nakon separatora slijedi klasično površinsko pročišćavanje isplake opisano u dijelu *4.3.2. Površinski isplačni sustav*.

Slika 4-11. Rotirajuća bušaća glava (Putra, 2008)

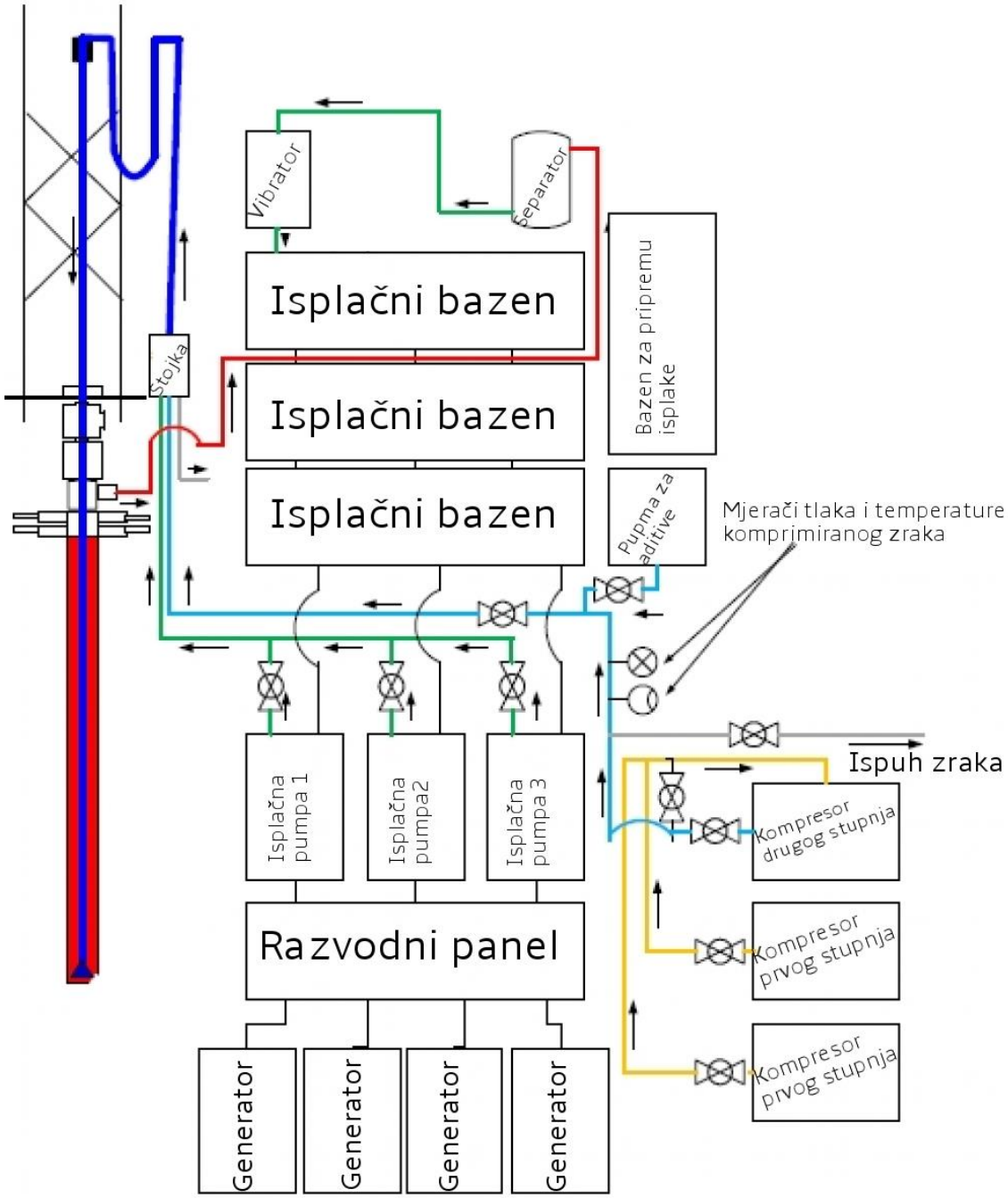


Slika 4-12. Leptirasti ventil (https://miv.hr)

Slika 4-13. Protupovratni ventili (Putra, 2008)

Slika 4-14. Separator (Putra, 2008)

Na slici 4-15. nalazi se shematski prikaz komponenti bušaćeg postrojenja namijenjenog za bušenje u uvjetima podtlaka. Tekuća i plinovita faza isplake miješaju se prije protiskivanja kroz stojku. Na slici 4-15. nisu prikazani svi dijelovi za pročišćavanje isplake nego samo vibrator, ali zapravo su tu još hidrocikloni, centrifuge, otplinjivači i hladnjaci.



Slika 4-15. Shematski prikaz komponenti bušaćeg postrojenja namijenjenog za bušenje u uvjetima podtlaka (Putra, 2008)

Putra u svom radu iz 2008. daje usporedbu bušenja uz primjenu bentonitne isplake i bušenja uz primjenu aerizirane isplake. Uspoređivalo se nekoliko parametara. Usporedba je prikazana tablicom 4-1.

Tablica 4-1. Usporedba bentonitne i aerizirane isplake (Putra, 2008)

	Aerizirana isplaka	**Bentonitna isplaka**
Oštećenje formacije	Manja vjerojatnost za oštećenje formacije jer je slojni tlak veći od hidrostatičkog tlaka isplake pa ne dolazi do čepljena pora stijena čvrstim česticama isplake.	Veća mogućnost oštećenja formacije zbog formiranja isplačnih obloga koji smanjuju propusnost ležišnih stijena.
Mehanička brzina bušenja	Veća mehanička brzina bušenja jer ne dolazi do gomilanja krhotina razrušenih stijena ispod dlijeta i njihovog usitnjavanja.	Manja mehanička brzina bušenja jer je bentonitna isplaka veće gustoće od aerizirane isplake.
Kontrola tlaka u bušotini	Aerizirana isplaka ima manju gustoću, stoga njezin stupac isplake postiže manji hidrostatički tlak od slojnog tlaka. Tlak u prstenastom prostoru se regulira zasunom i leptirastim ventilom na izlazu isplake iz prstenastog prostora ili udjelom zraka u isplaci.	Bentonitna isplaka ima veću gustoću od aerizirane isplake. Hidrostatički tlak proporcionalan je s gustoćom.
Gubitak cirkulacije	Zbog manje gustoće aerizirane isplake manja je vjerojatnost gubljenja. Mali gradijent tlaka će smanjiti prodiranje fluida i čvrstih čestica u pore stijena.	Kada se dogodi totalni gubitak isplake, pristupa se bušenju bez povrata isplake na površinu. Za to se koristi svježa voda koja kompletno završava u porama stijena. Veća je vjerojatnost diferencijalnog prihvata zbog neiznošenja krhotina izbušenih stijena.
Brzina iznošenja krhotina	Aerizirane isplake zahtijevaju veću brzinu iznošenja krhotina izbušenih stijena.	Manja brzina iznošenja krhotina izbušenih stijena.
Potrebne količine vode	Aerizirane isplake zahtijevaju manje količine vode.	Potrebne veće količine vode.
Sastav isplake	Voda, zrak, aditiv za pjenjenje, aditiv za sprječavanje korozije i ostale potrebne kemikalije.	Voda, bentonit, mnogi aditivi koji održavaju željena svojstva isplake (ovisno o bušotinskim uvjetima).
Dodatna oprema	Zahtijeva dodatnu opremu: kompresore, pumpu za aditive, rotirajuću bušaću glavu, ventile i zasune za regulaciju tlaka i separator.	Oprema koja se koristi kod konvencionalnog bušenja.
Izvođenje	Potrebna stručna osoba za izvođenje operacija s aeriziranom isplakom. Potrebno je održavati hidrostatički tlak isplake u određenim granicama. Protupovratni ventil se postavlja u bušaći niz.	Protupovratni ventil se postavlja na dno bušaćeg niza.
Korozija	Aerizirane isplake uzrokuju intenzivniju koroziju bušaćeg niza od bentonitnih isplaka.	Manji intenzitet korozije bušaćeg niza.

Prednosti korištenja aerizirane isplake pred bentonitnom isplakom mogle bi se svesti u šest točaka (Putra, 2008):

1) Manje oštećenje formacija zbog manjeg hidrostatičkog tlaka aerizirane u odnosu na bentonitnu isplaku. Manji hidrostatički tlak znači i manji gubitak fluida i manje odloženih čvrstih čestica iz isplake u stijenu. Unatoč maloj gustoći, aerizirane isplake mogu podignuti krhotine izbušenih stijena i iznijeti ih na površinu. Oštećenje formacije (isplačni oblog ili smanjenje propusnosti ležišne stijene uslijed začepljenja čvrstim česticama) može biti izbjegnuto uz korištenje aeriziranih isplaka.
2) Bušenje u uvjetima podtlaka koristeći aeriziranu isplaku povećava mehaničku brzinu bušenja. Razlog tomu je manji diferencijalni tlak u bušotini zbog manje gustoće isplake. Manji diferencijalni tlak utjecat će na povećanje mehaničke brzine bušenja jer se postiže bolje hlađenje dlijeta i izbjegava usitnjavanje krhotina izbušenih stijena. Zbog toga se na situ vibratora izdvajaju veće krhotine koje su zanimljivije i korisnije geolozima za analizu od sitnijih krhotina.
3) Dulji životni vijek dlijeta. Aerizirane isplake bolje hlade dlijeto i time mu omogućuju dulji životni vijek.
4) Korištenjem aerizirane isplake smanjuje se vjerojatnost diferencijalnog prihvata.
5) Potrebne su manje količine vode jer se aerizirana isplaka gubi manje od bentonitne isplake.
6) Toplinski oporavak bušotina izbušenih aeriziranom isplakom je puno brži nego kod bentonitnih isplaka. Bušotine kod kojih je bilo puno gubitaka i kod kojih se trebalo bušiti bez povrata isplake na površinu zahtijevale su puno vremena za toplinski oporavak i ujednačavanje temperature u ležištu i bušotini.

4.5. Zacjevljenje bušotine

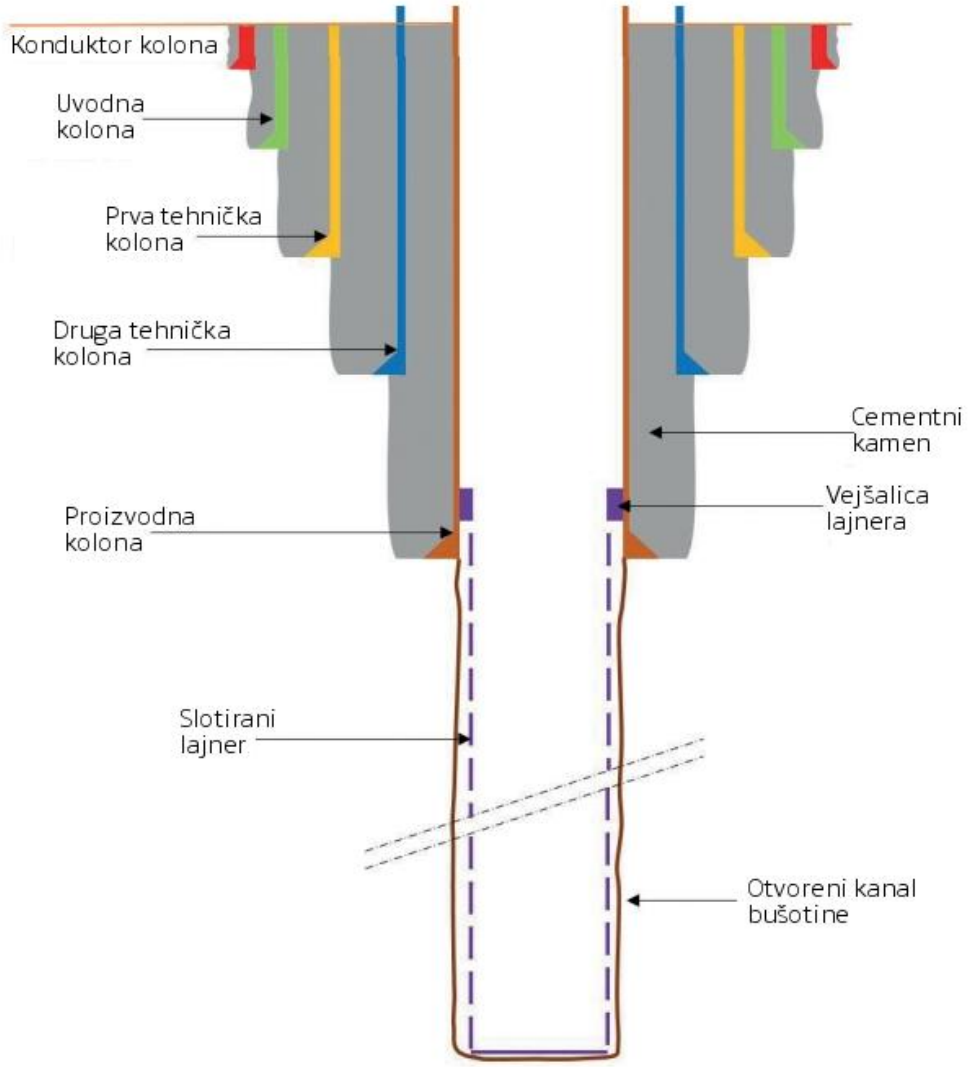
Nakon izrade sekcije kanala bušotine određenog promjera, pristupa se ugradnji i cementaciji kolone zaštitnih cijevi. Pošto je geotermalni fluid koji se pridobiva geotermalnim bušotinama (voda ili vodena para) jeftiniji od nafte, geotermalne bušotine su većih promjera kako bi bile isplative i mogle pridobivati velike količine geotermalne vode. Za razliku od naftno-plinskih bušotina, pridobivanje geotermalnog fluida obavlja se najčešće kroz otvoreni kanal ili kroz slotirani lajner, a ne kroz tubing kao što je to slučaj kod naftno-plinskih bušotina.

4.5.1. Zaštitne cijevi

Uz konačnu dubinu i promjer bušotine, izbor zaštitnih cijevi ovisi o još nekoliko faktora, kao što su: svojstva stijena i slojnih fluida, zahtjevi za kontrolom ušća bušotine i zakonski zahtjevi pojedine države na čijem se teritoriju obavlja bušenje. Nekoliko je razloga za postavljanje zaštitnih cijevi (Finger i Blankenship, 2010):

- Zaštita akvifera – zakoni zahtijevaju zaštitu i izoliranje plitkih vodonosnih slojeva (akvifera) kako bi se spriječilo njihovo zagađenje isplakom prilikom izrade bušotine.
- Kontrola tlaka u slučaju dotoka – dotok treba ukloniti iz bušotine na siguran način, a prethodno ugrađene zaštitne cijevi osiguravaju da neće doći do premašivanja tlaka frakturiranja onih intervala u kojima su one ugrađene. Stoga je prilikom iscirkuliranja dotoka potrebno paziti da se ne premaši tlak frakturiranja otvorenog dijela kanala bušotine.
- Izolacija problematičnih zona – zone tj. intervali mogu biti problematični iz više razloga (rahle, bubreće ili nekonsolidirane stijene), a najčešća posljedica je veliki gubitak isplake u takve zone. Također, gubitak isplake prisutan je i u kompaktnim zonama s malim ležišnim tlakom.
- Kontrola tlaka isplake – iako je to češće kod naftno-plinskih bušotina, isplake sadrže aditive koji im povećavaju gustoću (oteživači) te je gustoća isplake u takvim situacijama veća od gustoće vode kako bi hidrostatički tlak isplake bio dovoljan za kontrolu slojnog tlaka. To često dovodi do premašivanja tlaka frakturiranja otvorenih naslaga što dovodi do gubitka isplake ili čak kontrole nad bušotinom. Mnoga geotermalna ležišta se nalaze u tektonski nestabilnim područjima, koja uglavnom imaju jako male gradijente tlaka frakturiranja te se stoga posebna pozornost mora obratiti na dizajn zaštitnih cijevi.
- Određuju proizvodnu zonu – geotermalna ležišta, kao i ležišta ugljikovodika, mogu imati više od jednog proizvodnog intervala te se u tom slučaju postavljaju zaštitne cijevi kako bi se moglo preferencijalno pridobivati iz određenih intervala.

Na slici 4-16. prikazan je standardni dizajn zacjevljenja kod geotermalnih bušotina.



Slika 4-16. Standardni dizajn zacjevljenja geotermalnih bušotina (Cultrera, 2016)

Jednom kada je određen dizajn zacjevljenja, zaštitne cijevi za svaki interval su određene s tri glavna parametra;

1) vanjski promjer zaštitnih cijevi,
2) jedinična težina i
3) kvaliteta čelika.

Glavni faktor koji utječe na dizajn zaštitnih cijevi kod geotermalnih bušotina jest visoka temperatura. Tlakovi i aksijalna naprezanja su glavne stavke koje se razmatraju prilikom dizajna zacjevljenja kanala bušotine dok se termalna naprezanja kod naftno-plinskih bušotina najčešće zanemaruju zato jer je kod takvih bušotina temperatura nedovoljna da uzrokuje značajna smanjenja granice elastičnosti čelika, osim ako nisu klasificirane kao

HPHT bušotine. Iako ne postoje API podatci koji standardiziraju smanjenje granice elastičnosti čelika uslijed povećanja temperature, poznato je da čelik mijenja svoja svojstva s promjenom temperature.

Uz smanjenje granice elastičnosti, još dva parametra ulaze u razmatranje dizajna zaštitnih cijevi, a to su aksijalna naprezanja uzrokovana povećanjem temperature i plastična deformacija zaštitnih cijevi. Izbor navoja na spojevima zaštitnih cijevi također je potrebno uzeti u razmatranje kod geotermalnih bušotina. Spojevi trebaju biti dovoljne čvrstoće da izdrže tlačna i vlačna naprezanja koja se javljaju tijekom izloženosti visokim temperaturama. Za to se koriste spojevi sa specijalno dizajniranim zazorima koji najčešće smanjuju vlačnu čvrstoću spojeva, ali su povoljni zbog neizbježnog širenja čelika pod utjecajem velikih temperatura.

Dizajn zaštitnih cijevi kod geotermalnih bušotina podložan je API preporukama sigurnosnih faktora za raspucavanje, gnječenje te vlačna i tlačna naprezanja. Preporučeni sigurnosni faktori za termalno-inducirano aksijalno naprezanje i plastičnu deformaciju su sljedeći (Torres, 2014):

- Sigurnosni faktor za termalno-inducirano naprezanje = 1,0
- Sigurnosni faktor za plastičnu deformaciju (maksimalno vlačno naprezanje) = 2,0.

4.5.2. Kvaliteta čelika zaštitnih cijevi

Kvaliteta čelika pojedine sekcije niza zaštitnih cijevi ovisit će o tlaku raspucavanja, tlaku gnječenja, vlačnom naprezanju, termalnom naprezanju i otpornosti na koroziju, a ti faktori ovise o geološkim i operativnim uvjetima. Cementirane zaštitne cijevi trebaju biti takve da su otporne na sva naprezanja i da pruže adekvatnu zaštitu i izolaciju kanala bušotine. Standardne kvalitete čelika prema API standardu su K-55, N-80, L-80, C-90, C-95, T-95. Nadalje, u radu će biti opisane samo kvalitete K-55, L-80 i T-95.

K-55 kvaliteta označava zaštitne cijevi male čvrstoće izrađene od ugljičnog čelika. Otporne su na sulfatnu agresiju pri svim operativnim temperaturama. Preporuka je koristiti zaštitne cijevi K-55 kvalitete čelika za uvodnu kolonu ili za proizvodni lajner.

L-80 kvaliteta predstavlja zaštitne cijevi s ograničenom vlačnom čvrstoćom uz maksimalno zadovoljavanje potrebnih karakteristika čvrstoće i otpornosti na visoke temperature.

Također, kao i zaštitne cijevi K-55 kvalitete čelika, otporne su na sulfatnu agresiju te se mogu koristiti u prisustvu visokih koncentracija H_2S-a pri svim operativnim temperaturama.

T-95 kvaliteta čelika preporuča se za izradu zaštitnih cijevi koje su predviđene kao povezne zaštitne cijevi koje se postavljaju kao povezani lajnera te služe kao zaštita unutarnje stijenke prethodno ugrađene zaštitne cijevi. T-95 kvaliteta se koristi u slučaju kada temperatura na ušću bušotine premašuje 315 °C (600 °F) (Torres, 2014). Kada se zaštitne cijevi ove kvalitete ugrade cijelom svojom predviđenom duljinom u bušotinu, preporuča se imati navojni spoj ili spoj varom napravljen lako-varećom legurom kako bi se postiglo adekvatno brtvljenje bušotinske glave.

4.5.3. Smanjenje vlačne čvrstoće pri višim temperaturama

Svojstva čelika variraju ovisno o temperaturi. Faktori koji se koriste za smanjenje čvrstoće prikazani su tablicom 4-2. Podatci iz tablice dobiveni su eksperimentalnim istraživanjima u tehničkom centru *Grant PrideCo–TCA.* Razni proizvođači zaštitnih cijevi provode vlastita istraživanja smanjenja vlačne čvrstoće te tako dolaze do vlastitih rezultata.

Općenito, otpornost na raspucavanje, otpornost na gnječenje i tlačna čvrstoća zaštitnih cijevi su linearno proporcionalni vlačnoj čvrstoći materijala. To znači da će prilikom 22%-tnog smanjenja vlačne čvrstoće doći i do smanjenja za 22% otpornosti na raspucavanje, otpornosti na gnječenje i tlačne čvrstoće. Potrebno je napomenuti da je u određenim uvjetima, u kojima je visok omjer vanjskog promjera zaštitnih cijevi i debljine stijenke, otpornost na raspucavanje nelinearna s vlačnom čvrstoćom.

Tablica 4-2. Faktori smanjenja vlačne čvrstoće s povećanjem temperature (Torres, 2014)

Temperatura	**Standardna API kvaliteta čelika**					
°C	**K-55**	**N-80**	**L-80**	**C-90**	**C-95**	**T-95**
150	0,875	0,875	0,875	0,925	0,875	0,925
205	0,830	0,830	0,830	0,890	0,830	0,890
260	0,780	0,780	0,780	0,860	0,780	0,860
315	0,725	0,725	0,725	0,825	0,725	0,825

4.5.4. Aksijalna naprezanja zaštitnih cijevi uzrokovana temperaturnom ekspanzijom čelika

Jednom kada su zaštitne cijevi zacementirane i kada se cementna kaša stvrdne u cementni kamen, utjecaj topline vrućih stijena na kolonu zaštitnih cijevi postaje manji zbog izolacije koju zaštitnim cijevima pruža cementni kamen. Ipak s vremenom će se zagrijati cementni kamen i dio topline će se prenositi i na zaštitne cijevi.

Pošto su zaštitne cijevi zacementirane onemogućena im je slobodna ekspanzija uslijed širenja materijala pod djelovanjem temperature. Temperaturna ekspanzija zaštitnih cijevi očitovat će se kao unutarnje aksijalno tlačno naprezanje.

Ako je razrada geotermalnog polja fokusirana na dugoročno i održivo iskorištavanje geotermalne energije, tada se može aproksimirati da je dotok topline iz Zemljinog plašta u geotermalno ležište veći ili jednak od gubitka topline koja se najvećim dijelom troši na zagrijavanje zemljine kore, tj. stijena koje okružuju ležište, a manji dio te topline se iskorištava za grijanje ili proizvodnju električne energije putem izrađene geotermalne bušotine. To znači da će s vremenom bušotina i svi elementi bušotine biti zagrijani na istu temperaturu koja vlada u ležištu. Primjer za to je geotermalna bušotina Mladost-1 kod koje je temperatura na dnu i ušću bušotine jednaka i iznosi 80 °C (Cazin, 2019).

Aksijalna naprezanja uzrokovana temperaturnom ekspanzijom čelika mogu stvoriti velik problem i prilikom pothlađivanja. Kada je u fazi pridobivanja, geotermalna bušotina može biti zagrijana i do temperature od 315 °C (600 °F) (Torres, 2014). A prilikom gušenja bušotine (najčešće zbog izvođenja remontnih radova), temperatura u kanalu bušotine naglo pada zbog protoka puno hladnijeg remontnog fluida. Gušenje geotermalne bušotine uzrokuje najveće temperaturne amplitude. Naprezanje koje se pojavljuje pri takvim uvjetima može dovesti do oštećenja zaštitnih cijevi, a radi se o vlačnom naprezanju. Također, zbog istih razloga se javlja i tlačno naprezanje prilikom puštanja geotermalne bušotine u proizvodnju i naglog zagrijavanja koje proizlazi iz toga.

Tlačno naprezanje uslijed povećanja temperature računa se pomoću jednadžbe 4-1.

$$\sigma_z = -E * \alpha_t * \Delta T \tag{4-1}$$

Gdje su:

σ_z = aksijalno naprezanje (Pa)

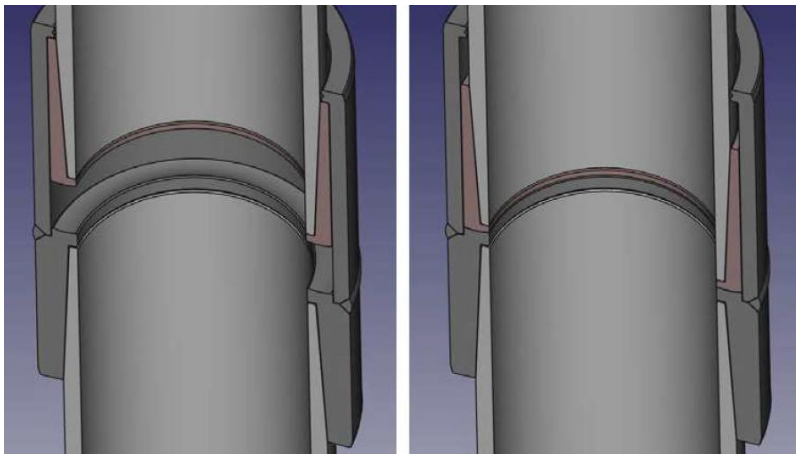
E = Youngov modul elastičnosti (Pa)

α_t = koeficijent linearnog toplinskog rastezanja (K^{-1})

ΔT = promjena temperature (K)

Youngov modul elastičnosti i koeficijent linearnog toplinskog rastezanja ovise o materijalu od kojeg su izrađene zaštitne cijevi.

Kako bi se izbjegli problemi koje uzrokuje toplinska ekspanzija čelika, jedno od rješenja je korištenje fleksibilnih spojnica. Takve spojnice su dizajnirane na način da dozvoljavaju određene pomake te se na taj način anulira aksijalno naprezanje. Na slici 4-17. prikazana je 3D ilustracija na kojoj je vidljiv princip rada fleksibilne spojnice, a na slici 4-18. prikazani su izrađeni prototipovi. Spojnice su izrađene od standardnih kvaliteta koje preporučuje API standard. Kraj zaštitne cijevi prilikom toplinske ekspanzije dolazi do ramena unutar spojnice i ukoliko postoji daljnja ekspanzija mogu se javiti već opisana aksijalna naprezanja. Poznavanje radne temperature u geotermalnoj bušotini jako je bitno za dizajniranje adekvatnog sustava zaštitnih cijevi i spojnica.



Slika 4-17. 3D shematski prikaz otvorene (lijevo) i zatvorene (desno) fleksibilne spojnice (Thorbjornsson et al., 2017)

Slika 4-18. Prototipovi fleksibilnih spojnica (Thorbjornsson et al., 2017)

4.6. Cementacija

Najosjetljiviji dio izrade bušotina jest cementacija. Neadekvatno izvedena cementacija može dovesti i do likvidacije bušotina zato jer bušotina možda neće biti sigurna za nastavak radova, a radovi na eventualnim popravcima loše izvedene cementacije mogu biti skuplji od same likvidacije bušotine i izrade nove bušotine iz početka (Finger i Blankenship, 2010).

Zaštitne cijevi se cementiraju nakon ugradnje u bušotinu protiskivanjem potrebnog volumena cementne kaše određenih svojstava. Cementna kaša protiskuje se kroz unutrašnjost zaštitnih cijevi. Kada kaša dođe do dna niza zaštitnih cijevi, ona počinje popunjavati prstenasti prostor između vanjske stijenke zaštitnih cijevi i stijena ili unutarnje stijenke prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi. Kod naftno-plinskih bušotina, ponekad se cementna kaša protiskuje samo do određene razine unutar prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi, a ostatak prstenastog prostora (do površine) se popunjava nekim od fluida za opremanje bušotina. Kod geotermalnih bušotina cementacija se najčešće vrši od dna kolone zaštitnih cijevi do površine (Finger i Blankenship, 2010). Cementiranje ima dvije važne funkcije:

1) pružanje mehaničkog integriteta zaštitnim cijevima prilikom višegodišnjeg rada geotermalnih bušotina i
2) zaštita vanjske stijenke zaštitnih cijevi od utjecaja slojnih fluida.

4.6.1. Cement

Cement je praškasti materijal koji u kombinaciji s vodom i aditivima tvori cementnu kašu. Glavna komponenta bušotinskog cementa najčešće je portland cement. Sirovina za proizvodnju cementa sastoji se od vapnenca i gline, poželjno je da odnos između te dvije komponente bude 3:1 u korist vapnenca (Gaurina-Međimurec, 2021). Žarenjem sirovinske mješavine, vapno (CaO) iz vapnenca se kemijski veže s oksidima silicija, aluminija i željeza (SiO_2, Al_2O_3 i Fe_2O_3) iz gline te na taj način nastaje cement.

Prema API Spec 10 bušotinski cementi su svrstani u 8 klasa (A, B, C, D, E, F, G i H) koje zadovoljavaju propisane kemijske i fizikalne zahtjeve. Sve klase cemenata imaju svoje područje primjene ovisno o dubini i tipu bušotine. No, klase G i H se najčešće koriste u praksi jer su kompatibilne s raznim aditivima kojima se podešavaju svojstva cementne kaše u skladu s bušotinskim uvjetima. Postoje i specijalno pripremljene mješavine, kao što je

pjenocement (cementacija raspucanih zona gubljenja) ili termalni cement (cementacija u uvjetima visoke temperature). Zbog prisustva slabih, lomljivih naslaga stijena i malih gradijenata tlaka frakturiranja, često se zahtijeva upotreba cementne kaše manje gustoće. Zbog toga su provedena mnoga istraživanja da bi se razvile cementne kaše male gustoće koje će se adekvatno ponašati – neće biti gubitaka kaše u stijene zbog velikog hidrostatičkog tlaka (a time i diferencijalnog) kojeg bi ostvarivale teže cementne kaše. Tipični olakšivači (ekstenderi) korišteni za pripremu cementnih kaša male gustoće, za primjenu u geotermalnim bušotinama, su: bentonit, perlit i dijatomejska zemlja (Gaurina-Međimurec, 2021).

4.6.2. Cementna kaša

Kod dizajna cementne kaše potrebno je koristiti točne vrijednosti (Gaurina-Međimurec, 2021):

- statičke temperature na dnu bušotine (BHST; engl. *Bottom Hole Static Temperature*),
- temperature u optoku na dnu bušotine (BHCT; engl. *Bottom Hole Circulation Temperature*) i
- temperature tijekom pridobivanja geotermalne vode/vodene pare.

Temperatura u optoku na dnu bušotine djeluje na (Gaurina-Međimurec, 2021):

- vrijeme zgušćivanja,
- reološka svojstva,
- vrijeme vezivanja i
- razvoj tlačne čvrstoće.

Svojstva cementne kaše su (Gaurina-Međimurec, 2021):

- vodocementni faktor,
- gustoća,
- vrijeme zgušćivanja,
- filtracija i
- reološka svojstva.

Temperatura i tlak u bušotini su parametri koji najviše utječu na ponašanje cementne kaše. O njima ovisi koliko će dugo cementna kaša biti pumpabilna da se može bez problema protiskivati kroz kolonu i prstenasti prostor i da li će uspješno razvijati čvrstoću potrebnu za učvršćenje niza zaštitnih cijevi. Potrebno je napomenuti da temperatura ima izrazitiji utjecaj na cementnu kašu (i kamen) od tlaka.

S povećanjem temperature:

- skraćuje se vrijeme zgušćivanja cementne kaše, a time i vrijeme protiskivanja i
- ubrzava se hidratacija cementne kaše te ona brže gubi svojstva fluida i očvršćava u cementni kamen koji brže postiže odgovarajuću čvrstoću.

4.6.3. Dizajn cementnih kaša za geotermalne bušotine

Kao što je već naglašeno u dijelu *3.1.1. Visoke temperature,* portland cementu se prilikom cementacije geotermalne bušotine dodaje minimalno 35% BWOC kvarcnog pijeska kako bi se izbjeglo smanjenje čvrstoće kod viših temperatura. Uz kvarcni pijesak, cementnoj kaši dodaju se i sljedeći aditivi (Bett, 2010):

- Usporivači: koriste se kako bi produljili vrijeme zgušćivanja cementne kaše te kako bi se na taj način izbjegao rizik od preuranjenog zgušćivanja cementne kaše prije nego što je popunila predviđeni prstenasti prostor. Usporivači održavaju cementnu kašu pumpabilnom. Koriste se u dubokim bušotinama gdje se očekuju temperature u optoku na dnu bušotine od preko 38 °C (Bett, 2010). U bušotinama sa slika 2-2. i 3-2. sve bušotine imaju temperaturu veću od 38 °C. Usporivači ne utječu na smanjenje konačne tlačne čvrstoće cementnog kamena, nego samo usporavaju razvoj tlačne čvrstoće. Jako je važno imati precizne podatke o BHCT-u jer o toj temperaturi najviše ovisi koncentracija usporivača kako ne bi došlo do preranog zgušćivanja ili predugog čekanja na očvršćivanje cementne kaše i nastavak radova. Usporivači koji se najčešće koriste su: sintetički polimeri, organske kiseline, mješavina lignina, derivati celuloze, lignosulfonati ili borati. Npr. mješavina lignosulfonata i natrijeva borata može se koristiti do temperature od 315 °C (Gaurina-Međimurec, 2021).
- Ubrzivači: dodaju se u cementnu kašu kako bi skratili vrijeme zgušćivanja cementne kaše. Najčešće se koriste za cementaciju konduktor i uvodnih kolona zato jer na dubinama ugradnje navedenih kolona uglavnom vladaju male temperature.

Također se koriste kada je vrijeme potrebno za zgušćivanje cementne kaše znatno veće od vremena potrebnog za pripremu i protiskivanje cementne kaše, što rezultira manjim vremenom čekanja na očvršćivanje cementne kaše za nastavak radova – WOC (engl. *Wait on Cement*). Kao ubrzivači najčešće se koriste: kalcijev klorid ($CaCl_2$) – 2-4% BWOC, natrijev klorid (NaCl) – 10-15% na masu vode (BWOW; engl. *By Weight Of Water*). Potrebno je napomenuti da se natrijev klorid koristi samo kada na raspolaganju nije kalcijev klorid zato jer NaCl nije toliko uspješan ubrzivač kao $CaCl_2$. Ukoliko ga se koristi više od 20% BWOW, natrijev klorid djeluje kao usporivač (Gaurina-Međimurec, 2021).

- Olakšivači: koriste se za smanjenje gustoće cementne kaše u situacijama u kojim može doći do premašivanja tlaka frakturiranja uslijed djelovanja hidrostatičkog tlaka stupca cementne kaše. Prilikom smanjenja gustoće cementne kaše dolazi i do smanjenja tlačne čvrstoće cementnog kamena i do skraćenja vremena zgušćivanja. Najčešće korišten olakšivač je Wyoming bentonit koji se dodaje od 2 do 16% BWOC. Navedena vrsta bentonita posjeduje sposobnost zadržavanja vode 16 puta veće od svog volumena te, stoga, osigurava da se neće pojaviti slobodna voda prilikom očvršćivanja cementne kaše u cementni kamen. U cementnu kašu mogu se dodati i sljedeći olakšivači: pucolani (dijatomejska zemlja i lebdeći pepeo – mogućnost korištenja do temperature od 230 °C) i mikrokuglice (staklene i keramičke) (Gaurina-Međimurec, 2021).
- Dispergatori: dodaju se u cementnu kašu kako bi joj se poboljšala pumpabilnost. Dodatkom dispergatora cementnoj kaši, smanjuje se trenje tijekom protiskivanja i potreban tlak pumpi za protiskivanje te se može lakše postići željeni turbulentni tok cementne kaše koji pospješuje njezino miješanje tijekom protiskivanja i bolju vezu cementnog kamena između vanjskih stijenki zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotine. Kao dispergatori se najčešće koriste: sulfonati, polifosfati i organske kiseline (Gaurina-Međimurec, 2021).
- Aditivi za smanjenje filtracije: koriste se za sprječavanje dehidracije cementne kaše i preuranjenog stvrdnjavanja u cementni kamen. Prilikom cementacije kroz zone niskog slojnog tlaka može doći do filtracije odnosno izdvajanja vode iz cementne kaše u okolne propusne stijene. Aditivi za smanjenje filtracije omogućavaju zadržavanje potrebnih karakteristika cementne kaše, uključujući: viskoznost, vrijeme zgušćivanja i reološka svojstva te razvoj tlačne čvrstoće cementnog

kamena. Za smanjenje filtracije cementne kaše koriste se: celuloza i derivati celuloze, sintetički polimeri i dispergatori (Gaurina-Međimurec, 2021).

- Materijali za čepljenje: LCM (engl. *Lost Circulation Materials*) sprječavaju gubljenje cementne kaše u prirodne i/ili izazvane frakture na način da čepe (premošćuju) frakture i pore u stijenama. Najčešće se koriste ljuske liskuna (tinjca) koje su potpuno inertne i ne-osjetljive na visoke temperature, što ih čini idealnim LCM-om za geotermalne bušotine. Organski materijali za čepljenje (sirovi pamuk, juta, drvena vlakna, žito, pluto), koji se tradicionalno koriste za sprječavanje gubljenja isplake, ipak se kod cementacije ne bi smjeli koristiti. Iako su oni efikasni za čepljenje zona gubljenja, nakon cementacije kanala bušotine organski materijal bio bi pod utjecajem procesa karbonizacije te bi se, s vremenom, raspao. Na taj način frakture bi ponovno postale otvorene i ostvario bi se direktan kontakt cementnog kamena s potencijalno korozivnim slojnim fluidima.
- Antipjenušavci: koriste se za sprječavanje ili smanjenje pjenjenja cementne kaše te za minimiziranje ulaska zraka u cementnu kašu. Pretjerano pjenjenje može rezultirati smanjenjem gustoće cementne kaše zbog fenomena kavitacije. Antipjenušavci djeluju na površinsku napetost cementne kaše te se na taj način smanjuje pjenjenje i razbijaju mjehurići pjene. Potrebna koncentracija aditiva je jako mala (0,1% BWOW), a kao antipjenušavac najčešće se koristi polipropilen glikol.
- Bojila ili radioaktivni obilježivači: bojila se koriste kod višestupanjske cementacije kako bi se sa sigurnošću moglo odrediti je li ispravna cementna kaša dospjela na ušće bušotine. Radioaktivni obilježivači se koriste zbog lakše identifikacije zona gubljenja jer se radioaktivnom karotažom može odrediti područje povećane radioaktivnosti odnosno točno mjesto gubljenja.

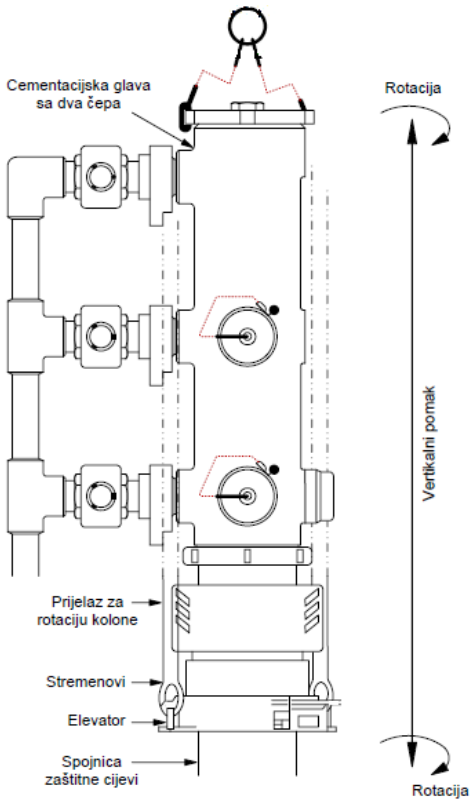
4.6.4. Metode cementiranja kolona zaštitnih cijevi

Prilikom cementacije kolona zaštitnih cijevi, potrebno je pripremiti adekvatnu cementnu kašu. Kaše se ispituju u laboratoriju uz simuliranje bušotinskih uvjeta (tlak, temperatura, vrijeme) te se na taj način određuje receptura za izradu cementne kaše. Cementna kaša se priprema na lokaciji bušotine. Za miješanje (pripremu) i utiskivanje cementne kaše u bušotinu koristi se cementacijski agregat (engl. *cement pumping skid*) koji se može montirati na prikolicu kamiona (Slika 4-19.). Cementacijski agregat ima dvije sisaljke. Prva sisaljka crpi vodu iz spremnika i potiskuje je u mlaznu miješalicu s lijevkom u koju se dodaje suhi

bušotinski cement te miješanjem stvara cementnu kašu. Druga sisaljka služi za utiskivanje cementne kaše u bušotinu.

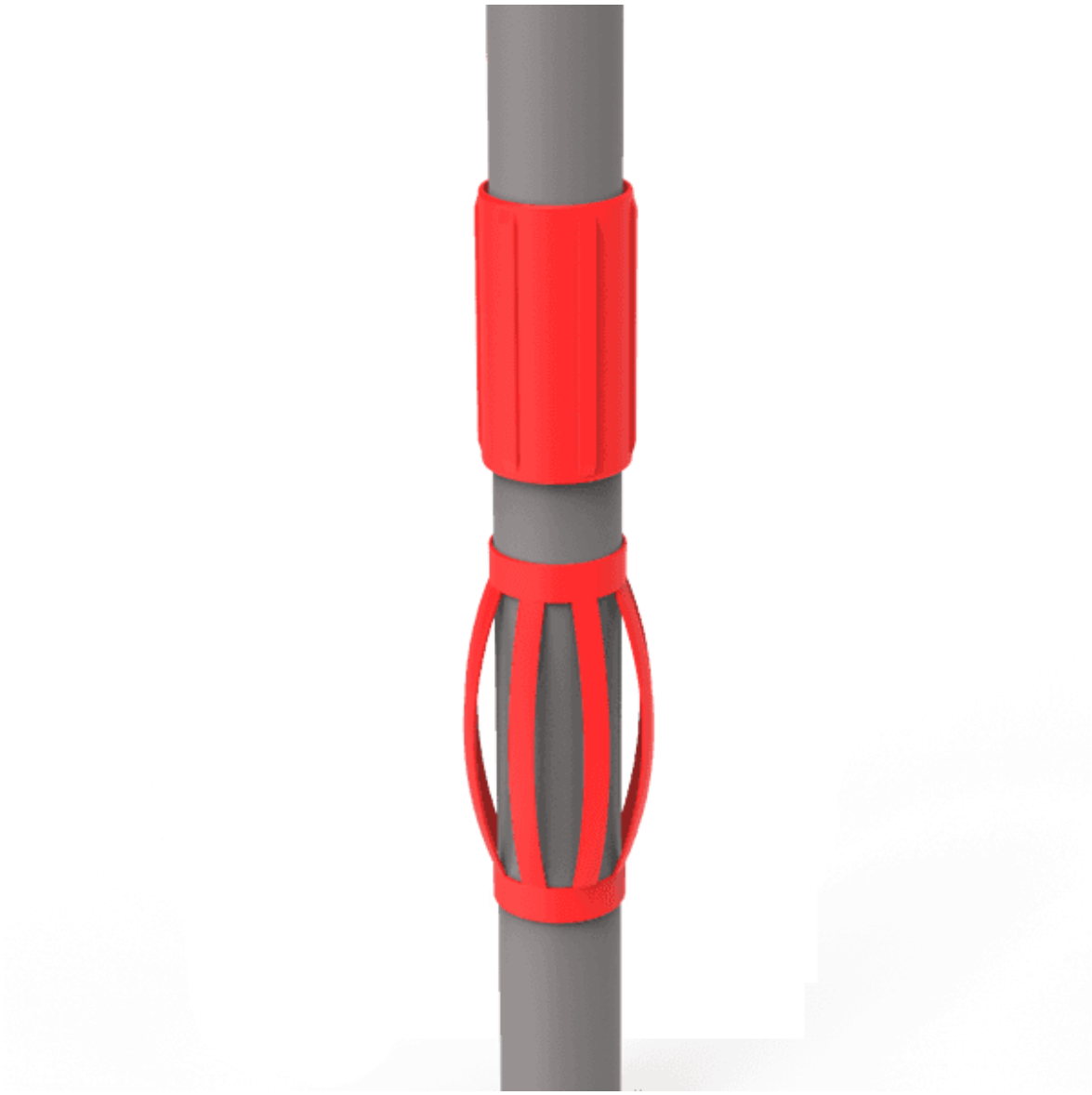
Slika 4-19. Cementacijski agregat (Gaurina-Međimurec, 2020)

Prilikom cementacije potrebno je demontirati bušaće prirubnice na ušću bušotine te instalirati cementacijsku glavu koja se navrće na vrh zaštitnih cijevi. Shematski prikaz cementacijske glave nalazi se na slici 4-20.

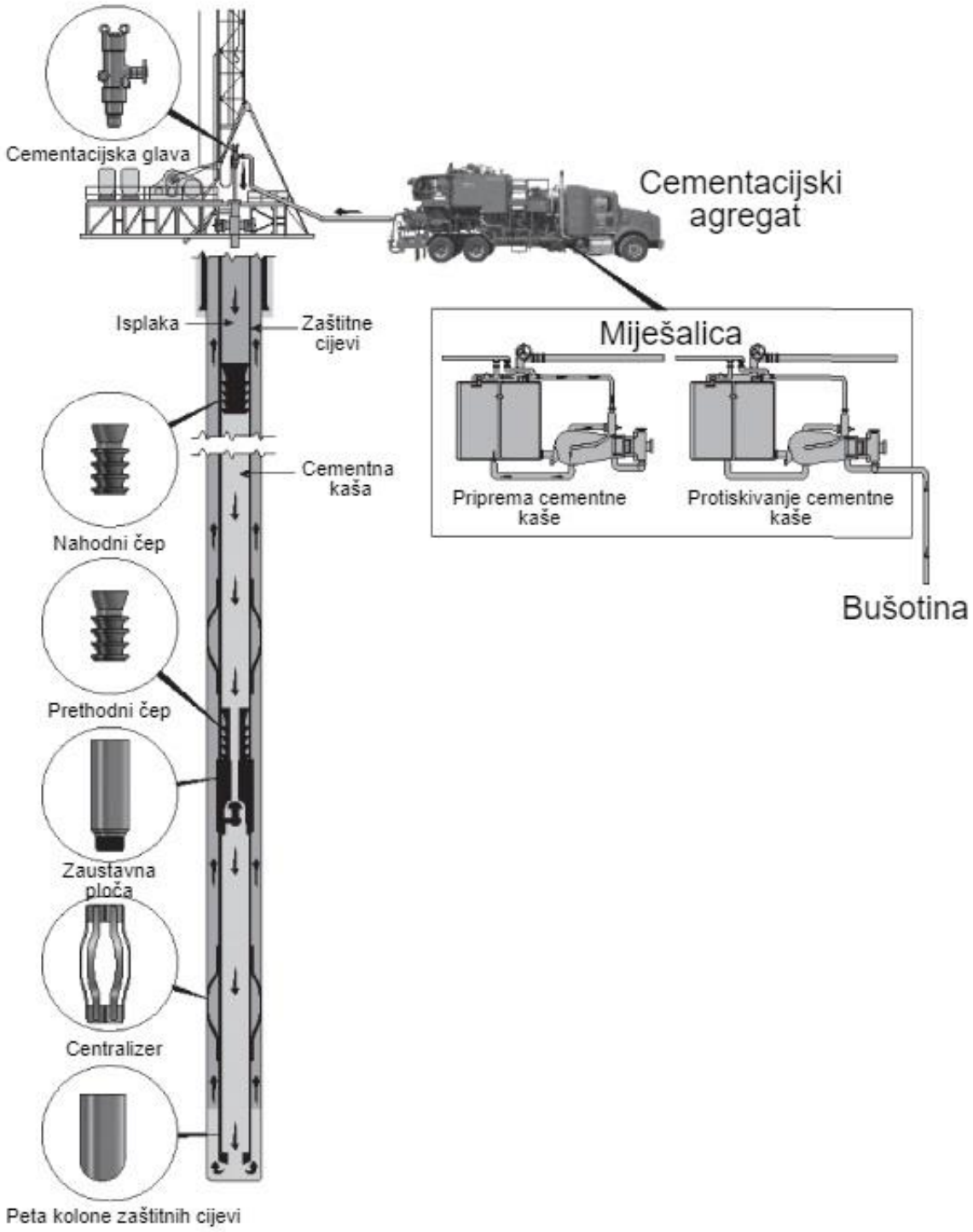


Slika 4-20. Shematski prikaz cementacijske glave (Gaurina-Međimurec, 2020)

Na cementacijsku glavu se priključuju tlačni vodovi sisaljki cementacijskog agregata i sisaljki bušaće garniture. Glava ujedno služi i kao držač cementacijskih čepova. Cementacijski čepovi (prethodni-donji i nahodni-gornji) služe za razdjeljivanje cementne kaše i isplake te za protiskivanje cementne kaše isplakom. Pri dnu kolone zaštitnih cijevi, u zaustavnoj ploči i u cementacijskoj peti, ugrađeni su protupovratni kuglasti ventili koji sprječavaju povrat cementne kaše. Na zaštitne cijevi stavljaju se strugači opisani u dijelu *3.1.3. Debeli isplačni oblog* i centralizeri (Slika 4-21.) kojima se zaštitne cijevi centriraju unutar kanala bušotine te se postiže ravnomjerna raspodjela cementne kaše u prstenastom prostoru. Shematski prikaz opreme za cementaciju nalazi se na slici 4-22.

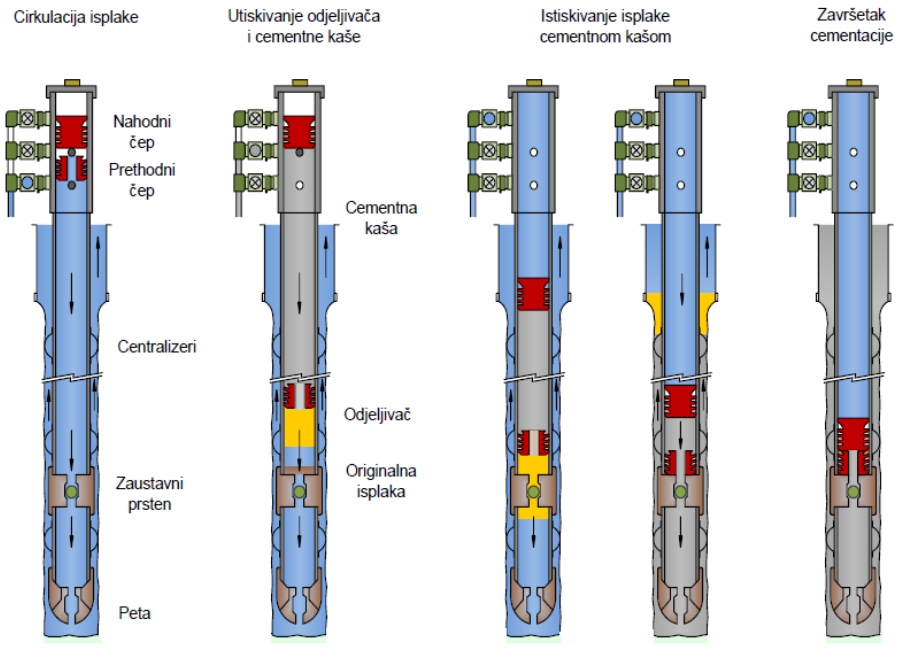


Slika 4-21. Centralizeri na zaštitnim cijevima (https://www.drinol.com)



Slika 4-22. Shematski prikaz opreme za cementaciju (American Petroleum Institute, 2009)

Protiskivanje cementne kaše može se odvijati kroz zaštitne cijevi ili kroz bušaće šipke (cementacija lajnera ili uvodne kolone) u izacijevni prostor, u jednom ili više stupnjeva. U ovom radu prikazana je cementacija zaštitnih cijevi protiskivanjem cementne kaše u jednom stupnju, kroz kolonu zaštitnih cijevi (Slika 4-23.).

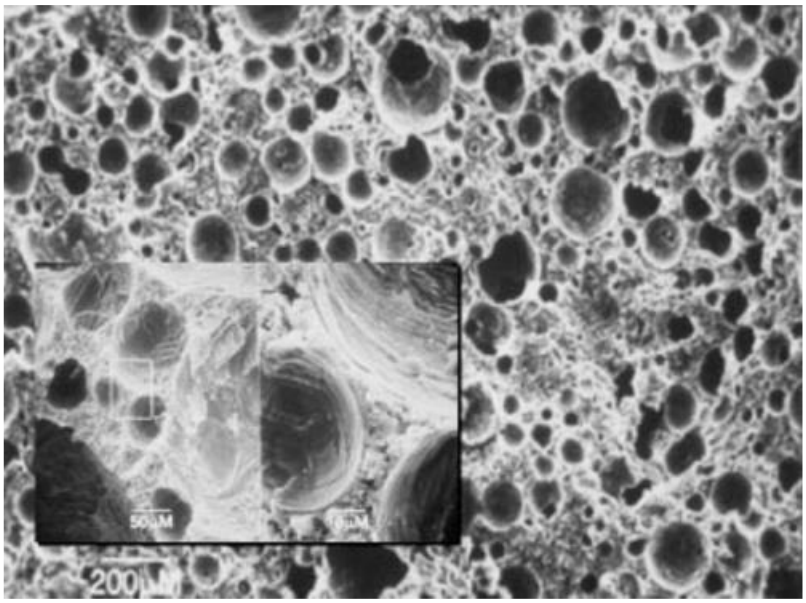


Slika 4-23. Jednostupanjska cementacija (Gaurina-Međimurec, 2020)

Kod jednostupanjske cementacije u cementacijsku glavu postavljaju se dva čepa. Prvi, prethodni čep, služi za odjeljivanje cementne kaše od isplake. Prije same cementacije u bušotini se nalazi isplaka koju je potrebno istisnuti i zamijeniti cementnom kašom. Prije protiskivanja cementne kaše protiskuje se fluid koji služi kao odjeljivač isplake i cementne kaše te sprječava njihovo miješanje. Dodatno, prethodni čep predstavlja barijeru između odjeljivača i cementne kaše. Kada prethodni čep bude protisnut do zaustavnog prstena, na sisaljki cementne kaše doći će do povećanja tlaka. Potrebno je postići odgovarajući tlak koji će dovesti do pucanja membrane na prethodnom čepu te će kroz njega i kroz otvor u cementacijskoj peti prolaziti cementna kaša u izacijevni prstenasti prostor. Kada se u kolonu zaštitnih cijevi utisne potreban volumen cementne kaše, otpušta se nahodni-gornji čep i protiskuje isplakom tako da ispred sebe gura cementnu kašu iz zaštitnih cijevi sve dok ne nasjedne na prethodni čep. Nasjedanje nahodnog čepa na prethodni čep se na površini manifestira kao naglo povećanje tlaka. U tom trenutku (ili malo prije) cementna kaša trebala bi se pojaviti na ušću bušotine, što je znak da je cijeli prstenasti prostor popunjen cementnom kašom. Tada je potrebno zaustaviti rad isplačnih sisaljki i pričekati određeno vrijeme na stvrdnjavanje cementne kaše u cementni kamen (WOC). Nakon što prođe WOC potrebno je provesti procjenu uspješnosti cementacije. Nekoliko je metoda za to: akustična karotaža, mjerenje temperature, ispitivanje dotoka ili tlačna proba.

4.6.5. Pjenocement

Geotermalna ležišta često su izrađena od propusnih i prirodno frakturiranih stijena. Da bi se pravilno izvela cementacija u takvim uvjetima potrebno je olakšati cementnu kašu kako bi bilo što manje gubljenja cementa. Injektiranjem plina (npr. dušika) u klasičnu cementnu kašu nastaje pjenocementna kaša gustoće od 720 do 1800 kg/m^3 (Gaurina-Međimurec, 2021). Pjenocement je mješavina cementne kaše, aditiva za pjenjenje i plina. Plin koji se najčešće koristi za izradu pjenocemenata je dušik zbog njegove dostupnosti i inertnosti. Kada su pjenocementi adekvatno pripremljeni oni sadrže mikroskopski sitne mjehuriće koji neće migrirati ni koalescirati. Mjehurići nisu povezani što uzrokuje smanjenje gustoće cementne kaše. Cementni kamen kojeg tvori pjenocement ima malu propusnost i relativno veliku tlačnu čvrstoću. Izgled pjenocementa pod mikroskopom prikazan je na slici 4-24.



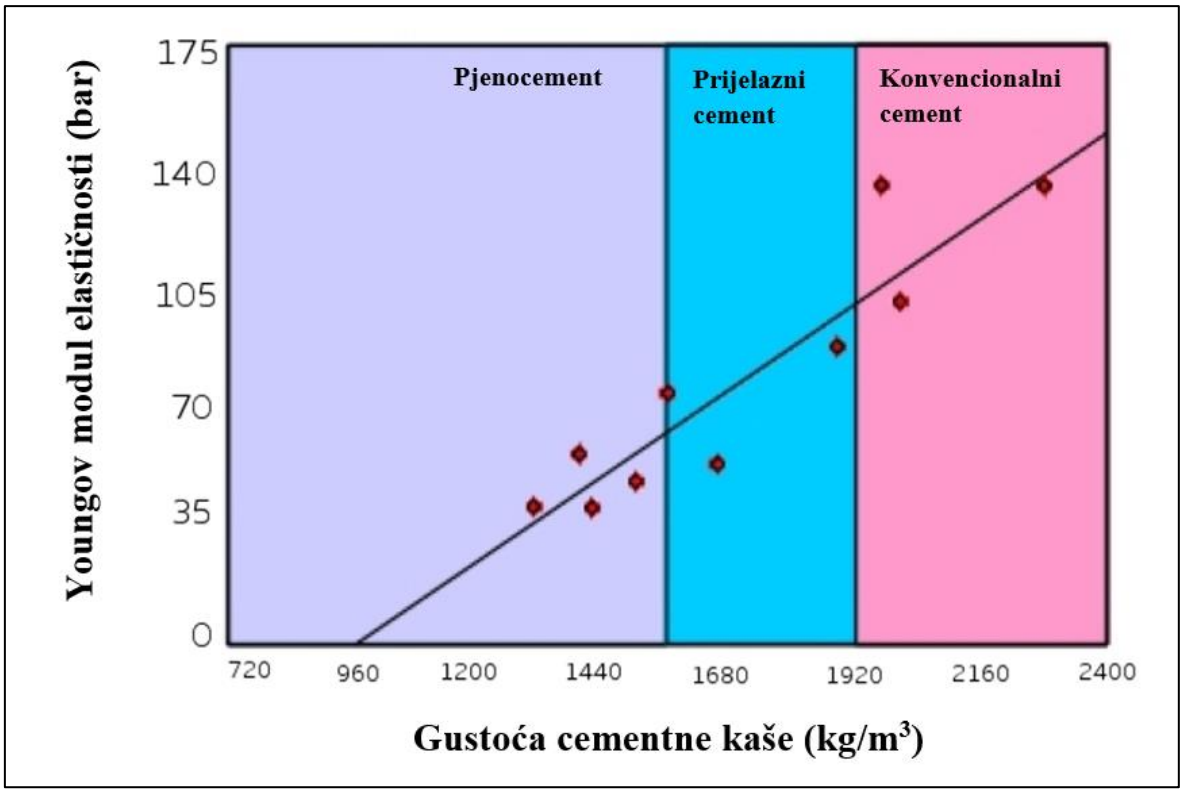
Slika 4-24. Mikroskopska fotografija pjenocementa (Niggemann et al., 2010)

Niggemann i suradnici u svom radu iz 2010. godine navode nekoliko prednosti pjenocementa pred konvencionalnim cementima:

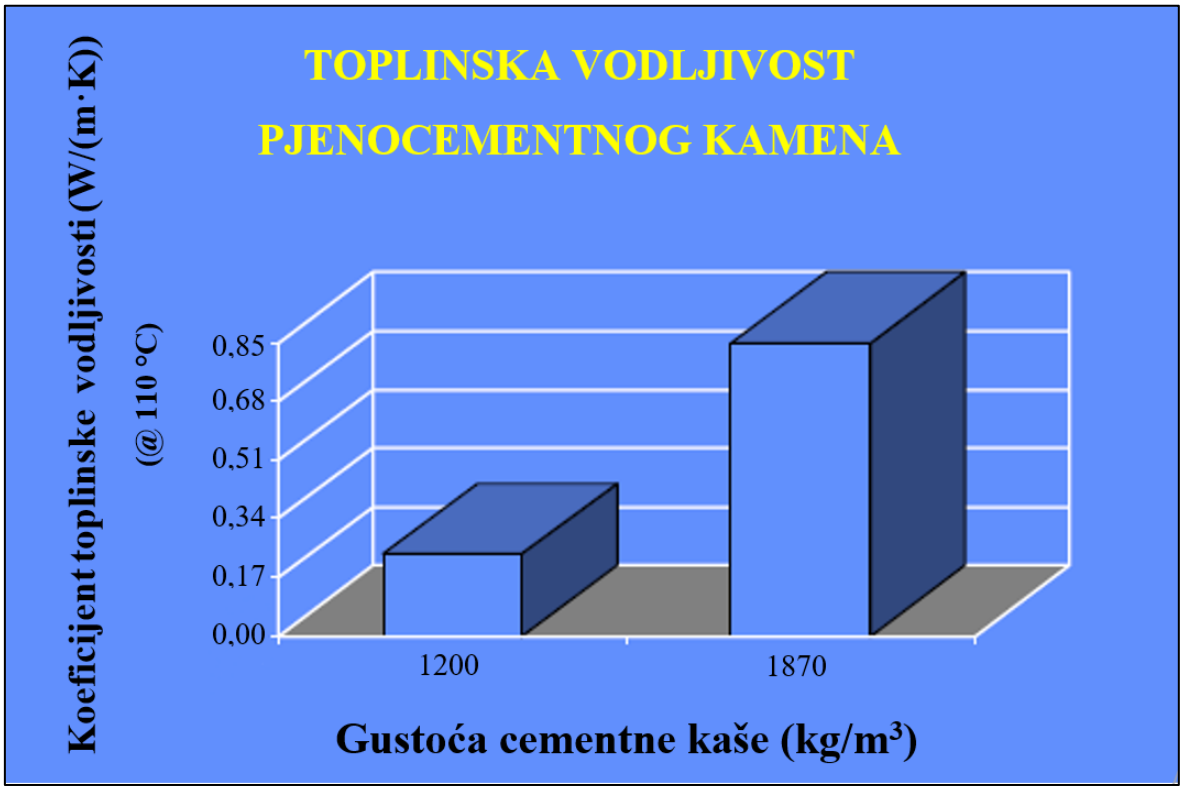
1) Lagane cementne kaše: pjenocementne kaše imaju malu gustoću zahvaljujući formiraju sitnih nepovezanih mjehurića. Pjenocementna kaša očvršćava u cementni kamen koji nema značajno manju tlačnu čvrstoću od cementnog kamena nastalog očvršćivanjem olakšane cementne kaše približne gustoće. Također, pjenocementne kaše nemaju restrikcije u primjeni što se tiče dubine ili temperature bušotine, dok neki olakšivači gube svoja svojstva na većim temperaturama. Mjehurići pjenocementa će se samo komprimirati, dok će neki olakšivači pri većim tlakovima

pucati, kao npr. mikrokuglice koje će se pri određenom tlaku raspasti i tako izgubiti svoju funkciju. Pjenocementne kaše zahtijevaju manje sirovog cementa i mogu se pripremiti sa svim miješalicama cementacijskih agregata.

2) Sprječavanje migracije fluida: migracija slojnih fluida kroz cementni kamen u prstenastom prostoru je česta pojava i predstavlja problem. Najčešće se to događa zbog nezadovoljavajućih reoloških svojstava cementne kaše koja ne popunjava sav prstenasti prostor između zaštitnih cijevi i stijenke kanala bušotine. Pjenocementna kaša ima povoljna reološka svojstva te kvalitetno popunjava prstenasti prostor i istiskuje isplaku. Razlozi povoljnih reoloških svojstava su: visoka prividna viskoznost, vodomočivost, širenje mjehurića i popunjavanje sitnih pora. Zbog kvalitetnog popunjavanja prstenastog prostora pjenocementna kaša očvršćava u cementni kamen koji sprječava migraciju fluida.
3) Cementni kamen poboljšanih svojstava: poželjno je da cementni kamen zadrži željena svojstva kroz cijeli radni vijek bušotine. Glavna zadaća mu je zaštita kolone zaštitnih cijevi od djelovanja slojnih fluida, tlaka, temperature i korozije. U usporedbi s konvencionalnim cementnim kamenom, cementni kamen koji nastaje očvršćivanjem iz pjenocementne kaše ima veću elastičnost i otpornost na slojni tlak. Laboratorijski testovi pokazuju da cementni kamen nastao očvršćivanjem iz pjenocementne kaše ima manji Youngov modul elastičnosti od konvencionalnog cementnog kamena, što ga čini manje krutim. Slika 4-25. prikazuje rezultate laboratorijskih testiranja elastičnosti cementnih kamena. Za dugotrajnost cementnog kamena važnija je njegova elastičnost od tlačne čvrstoće. Smanjenje gustoće konvencionalnih cementnih kaša uzrokovat će smanjenje tlačne čvrstoće bez utjecaja na vlačnu čvrstoću cementnog kamena. Kod pjenocementnih kaša, smanjenje gustoće utječe na povećanje vlačne čvrstoće cementnog kamena. Pjenocementni kamen je također bolji izolatori topline od konvencionalnog cementnog kamena. Toplinska vodljivost pjenocementnog kamena je 2 do 10 puta manja nego kod konvencionalnog cementnog kamena. To će imati blagotvorni učinak na termalno rastezanje zaštitnih cijevi. Usporedni dijagram termalne vodljivosti pjenocementnog kamena i konvencionalnog cementnog kamena nalazi se na slici 4-26.



Slika 4-25. Youngov modul elastičnosti cementnog kamena (Niggemann et al., 2010)



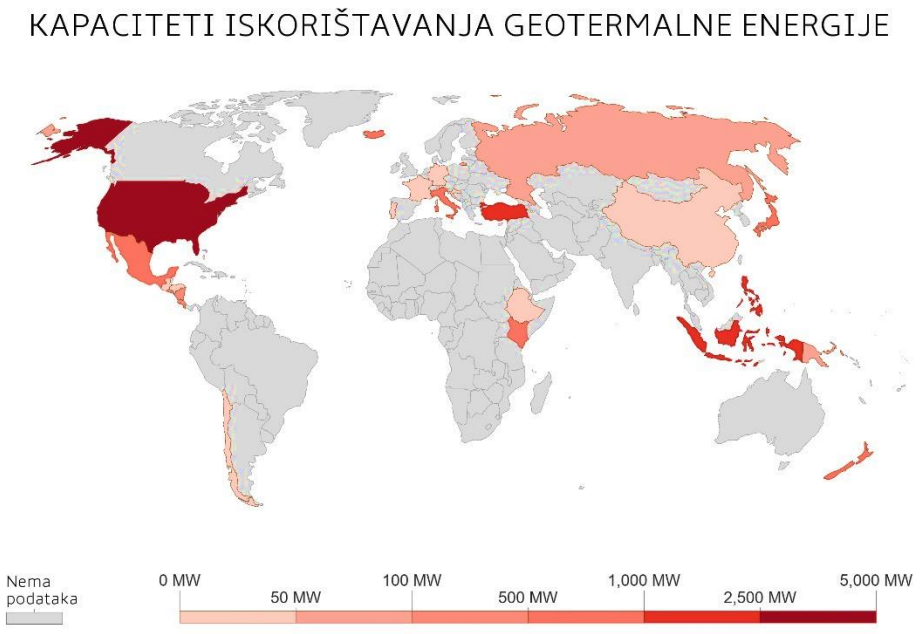
Slika 4-26. Toplinska vodljivost cementnog kamena (Niggemann et al., 2010)

5. PRIMJERI IZ PRAKSE

Geotermalna energija se iskorištava širom svijeta. Najveći instalirani kapaciteti iskorištavanja geotermalne energije su:

1. SAD (2 587 MW)
2. Indonezija (2 131 MW)
3. Filipini (1 928 MW)
4. Turska (1 613 MW)
5. Novi Zeland (985 MW)
6. Meksiko (906 MW)
7. Kenija (824 MW)
8. Italija (797 MW)
9. Island (765 MW)
10. Japan (525 MW)

Na slici 5-1. nalazi se karta svijeta s označenim instaliranim kapacitetima za iskorištavanje geotermalne energije.



Slika 5-1. Instalirani kapaciteti za iskorištavanje geotermalne energije (https://ourworldindata.org)

U nastavku ovog poglavlja bit će prikazani primjeri geotermalnih bušotina iz Republike Hrvatske i svijeta.

5.1. Geotermalne bušotine u Republici Hrvatskoj

5.1.1. Najznačajniji geotermalni projekti u RH

Geotermalna elektrana Velika Ciglena je jedina geotermalna elektrana u Republici Hrvatskoj. Instalirani kapacitet je 16,5 MW, a nalazi se u mjestu Ciglena kraj Bjelovara. To je najveća elektrana u kontinentalnoj Europi koja koristi binarnu tehnologiju (organski Rankineov ciklus ili ORC). Velika Ciglena koristi dvije proizvodne (VC-1 i VC-1A) i dvije utisne bušotine (VC-2 i Ptk-1). Ležište Velika Ciglena predstavljeno je debelim karbonatnim pukotinskim kompleksom na dubini od 2 585 do 3 835 m. Ležište je otkriveno 1990. godine bušotinom VC-1, čiji je cilj bio istraživanje ugljikovodika. Izmjerena ležišna temperatura u bušotini VC-1 na dubini 3 400 m iznosi 177,6 °C. Utisne bušotine (VC-2 i Ptk-1) nalaze se na dovoljnoj udaljenosti od proizvodnih (2-3 km) te je utiskivanje ohlađene vode održivo što se tiče pothlađivanja ležišta i održavanja slojnog tlaka. Kumulativna proizvodnja iz obje bušotine je 227,1 L/s pri tlaku na ušću od 26 bar i temperaturi od 166 °C (Elezović et al., 2018), a geotermalna voda se pridobiva eruptivno.

Eksploatacijsko polje geotermalne vode Draškovec nalazi se nedaleko od grada Preloga. Na lokaciji su izbušene dvije bušotine (Dr-1 i Dr-2). Ležište je otkriveno 1977. godine bušotinom Dr-1. Temperatura vode iznosi od 105 do 110 °C ovisno o dubini, a ležište je na dubini od 1 958 do 2 130 m. U vodi je otopljeno dosta plina, a plin se sastoji od 87% metana (CH_4) i 10% CO_2. Na polju ne postoji geotermalna elektrana, ali je predviđena elektrana koja bi iskorištavala toplinsku energiju vode i izgaranje plina kako bi se postigla što veća iskoristivost. Ohlađena voda i CO_2 bi se utiskivali u ležište zbog podržavanja slojnog tlaka. U planu je korištenje bušotine Dr-2 kao proizvodne, a privremeno bi se bušotina Dr-1 koristila kao utisna dok se ne izradi bušotina Dr-3 koja bi trajno služila kao utisna. Predviđena proizvodnja iz bušotine Dr-2 je 50,4 L/s uz tlak na ušću od 4 bar, pridobivalo bi se uz korištenje električne potopne crpke. U planu je izrada još tri proizvodne i četiri utisne bušotine, nakon toga će bušotina Dr-1 postati kontrolna za sve promjene koje će se događati u ležištima tijekom pridobivanja (Elezović et al., 2018).

Geotermalno polje Zagreb nalazi se većim dijelom na području grada Zagreba, na njegovom jugozapadnom dijelu, a manjim dijelom u Zagrebačkoj županiji (općina Stupnik). Polje je otkriveno zahvaljujući negativnoj naftnoj bušotini Stupnik-1 izrađenoj 1964. godine, ali je potencijal iskorištavanja geotermalne energije utvrđen ispitivanjem bušotine 1977. godine. Topla voda nalazi se na dubini od 730 do 1 406 m. Temperatura vode u ležištu i na ušću

iznosi 80 °C. Polje je razrađeno s 14 bušotina. Od toga su 3 proizvodne (Mla-3, KBNZ-1B i KBNZ-1A), 3 utisne (Mla-1, KBNZ-3α i KBNZ-2A) te jedna proizvodno-utisna (Mla-2). Ostale bušotine su likvidirane. Tlak na ušću bušotina je 6,5 bar, a pridobivanje geotermalne vode je eruptivno. Iz svih bušotina ukupno se pridobiva 6,9 L/s što predstavlja iskorištenje od samo 8,9% rezervi geotermalne vode. Geotermalna energija koristi se za grijanje objekata, a postoje planovi iskorištavanja toplinske energije za razvoj hortikulture (Elezović et al., 2018; Cazin, 2019; Getliher i Horvat, 2008).

Geotermalno polje Bizovac nalazi se u istočnoj Slavoniji. Ušća geotermalnih bušotina nalaze se u mjestu Bizovac. Naftno polje Bizovac otkriveno je 1967. godine istražnom bušotinom Biz-1 na osnovu opsežnih geološko-geofizičkih radova. Iste godine izrađene su još dvije bušotine od kojih su bušotinom Biz-2 otkrivene veće zalihe geotermalne vode. Trenutno se koriste tri bušotine od kojih su dvije proizvodne (Biz-4 i Slk-1), a jedna utisna (Biz-2). Temperatura u ležištu iznosi 113 °C, a na ušću bušotina od 85 do 90 °C. Proizvodnja iznosi od 6 do 9 L/s. Geotermalna energija koristi se u zdravstveno-rekreativne svrhe – toplice (Elezović et al., 2018).

U tablici 5-1. naveden je sažet prikaz opisanih geotermalnih projekata u Republici Hrvatskoj.

Tablica 5-1. Najznačajniji geotermalni projekti u RH

Geotermalno polje	Otkriveno	Broj proizvodnih bušotina	Broj utisnih bušotina	Dubina ležišta (m)	Temperatura u ležištu (°C)	Proizvodnja (L/s)	Tlak na ušću (bar)	Temperatura na ušću (°C)	Namjena
Velika Ciglena	1990.	2	2	2585-3835	177,6	227,1	26-eruptivna	166	proizvodnja električne energije
Draškovec	1977.	1+3*	1+1+4*	1958-2130	105-110	50,4	4-ESP	n/a	proizvodnja električne energije**
Zagreb	1977.	3+1***	3+1***	730-1406	80	6,9	6,5-eruptivna	80	zagrijavanje objekata****
Bizovac	1967.	2	1	n/a	113	6-9	n/a	85-90	zdravstveno-rekreativne svrhe

*U početku projekta kao utisna bušotina bi se koristila Dr-1, a nakon toga bi se izgradila utisna bušotina Dr-3 te još 4 utisne i 3 proizvodne bušotine, a bušotina Dr-1 bi tada postala mjerna.

**Projekt nije realiziran nego je samo u fazi planiranja.

***Postoji jedna proizvodno-utisna bušotina; Mla-2.

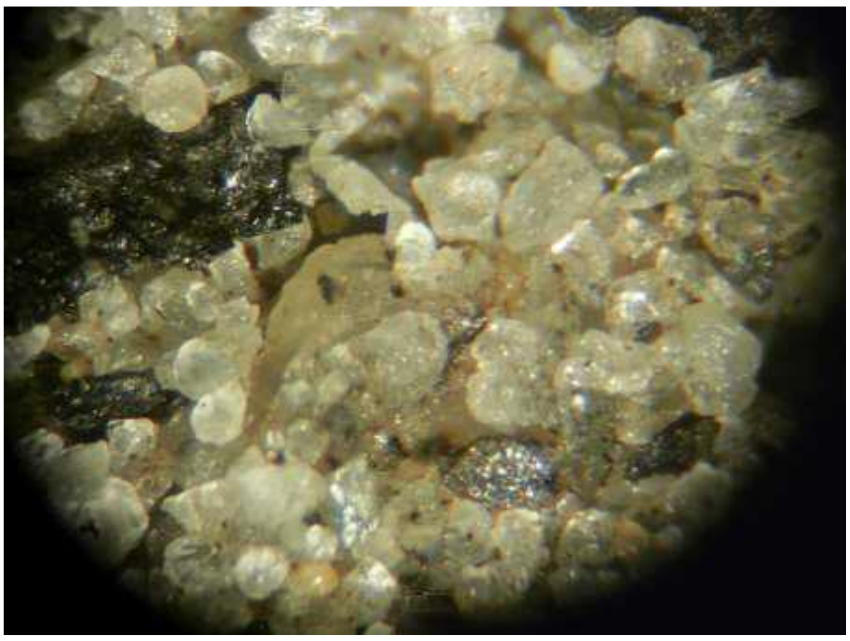
****Trenutno se bušotine koriste za zagrijavanje objekata, ali postoje planovi iskorištavanja toplinske energije za razvoj hortikulture.

5.1.2. Izrada bušotine Bošnjaci-1

Bušotina Bošnjaci-1 (Boš-1) je geotermalna bušotina izrađena nedaleko od grada Županje. Bušotina je izgrađena zbog potreba za toplinskom energijom tvrtke Ruris d.o.o. Tvrtka koristi geotermalnu energiju za zagrijavanje staklenika za hidroponski uzgoj rajčica. Do tada je za zagrijavanje korišten prirodni plin. Izradom bušotine otkriveno je geotermalno polje Bošnjaci – sjever (Bilić, 2016).

Izrađena je bušotina dubine 1165 m. Pošto je područje bušenja u blizini naftno-plinskog polja Đeletovci, tijekom izrade bušotine pratilo se ima li u isplaci otopljenog plina ili nafte. Potvrđena je nafta u tragovima, što znači da je geotermalno ležište bilo na dijelu migracijskog puta ugljikovodika. Bušotina pridobiva kroz perforirani lajner ugrađen na intervalu od 777 do 1 033 m. Zaštitne cijevi cementirala je poznata tvrtka specijalizirana za cementaciju; *Schlumberger*. Bušotina je puštena u proizvodnju olakšavanjem stupca isplake, utiskivanjem dušika u isplaku, što je uzrokovalo eruptivno pridobivanje geotermalne vode. Temperatura vode na ušću bušotine iznosila je 64 °C (Bilić, 2016).

Tijekom eksploatacije primijećene su određene količine kvarcnog pijeska (slika 5-2.) pridobivenog s geotermalnom vodom. Predloženo rješenje bilo je postavljanje pješčanog zasipa, što je i odrađeno i nakon analize vode ustanovljeno je da je postavljen kvalitetno jer više nije bilo pojavljivanja kvarcnog pijeska. Ugradnja pješčanog zasipa uzrokovala je dvostruko smanjenje proizvodnje s 20 L/s na 10 L/s (Bilić, 2016).



Slika 5-2. Mikroskopski prikaz kvarcnog pijeska iz bušotine Boš-1 (Bilić, 2016)

5.2. Geotermalne bušotine u svijetu

5.2.1. Geotermalna bušotina Reykjanes 19 (RN-19)

Geotermalna bušotina Reykjanes 19 (RN-19) nalazi se u istočnom dijelu istoimenog visokotemperaturnog ležišta na Islandu. Bušotina je izbušena zbog pridobivanja vodene pare za pokretanje generatora električne energije, tj. proizvodnju struje u elektrani *HS Orka* instalirane snage od 100 MW_e. Za izradu bušotina korišteno je bušaće postrojenje Saga Soilmec G-55 koje je prikazano na slici 4-1. Bušenje je izvela tvrtka *Iceland Drilling Company Ltd.*, a karotažna mjerenja tvrtka *Iceland GeoSurvey (ÍSOR)*.

Kanal bušotine za ugradnju uvodne kolone promjera 0,5715 m (22 1/2") izbušen je dlijetom promjera 0,6604 m (26") i uz korištenje bušaćeg postrojenja Saga Soilmec G-55. Nakon ugradnje uvodne kolone uklonjeno je bušaće postrojenje Saga Soilmec G-55 te je postavljeno bušaće postrojenje Drillmec H-200 (Slika 5-3.).

Slika 5-3. Bušaće postrojenje Drillmec H-200 (https://www.jardboranir.is)

Bušotina je izbušena uz ispiranje korištenjem isplake i čiste vode u različitim sekcijama. Za bolje iznošenje krhotina razrušenih stijena, prilikom korištenja čiste vode, korišteni su polimerni čepovi. U tablici 5-2. prikazani su podatci o konstrukciji bušotine i isplaci za geotermalnu bušotinu Reykjanes 19. Ovaj primjer pokazuje da se geotermalne bušotine izrađuju s većim promjerima od naftno-plinskih bušotina. Također kao isplaka se koristila čista voda ili bentonitna isplaka koje su obje ekološki prihvatljive. Vidljivi su i veliki gubitci isplake jer se geotermalna ležišta nalaze u raspucanim stijenama.

Tablica 5-2. Podatci o konstrukciji i isplaci za geotermalnu bušotinu Reykjanes 19 (Chemwotei, 2011)

Promjer dlijeta (m)	Promjer Z.C. (m)	Dubina (m)	Dubina ugradnje Z.C. (m)	Isplaka	Gubitci
0,6604 (26")	0,5715 (21 1/2")		84	pjena	
0,5334 (21")	0,4731 (18 5/8")	349	347	1) voda (70-85 m): za ispiranje krhotina izbušenog cementnog kamena 2) bentonitna isplaka (85-349 m)	-prosječni gubitak od 2 L/s
0,4445 (17 1/2")	0,3397 (13 3/8")	746	742	1) voda (321-349 m): za ispiranje krhotina izbušenog cementnog kamena 2) bentonitna isplaka (349-746 m) dobavom 60-65 L/s	-prosječni gubitak od 25-30 L/s, -velika zona gubljenja (50 L/s @ 746 m) zatvorena je cementnim čepom
0,3112 (12 1/4")	/	1302	/	voda i čepovi polimera	-gubitak od 50 L/s @ 790 m, -konačni prosječni gubitak sekcije smanjen na 25 L/s
0,3112 (12 1/4")	0,2445 (9 5/8") lajner	2235	2208	voda (65 L/s) i čepovi polimera	-prosječni gubitak manji od 30 L/s

5.2.2. Geotermalna bušotina Olkaria 38 (OW-38)

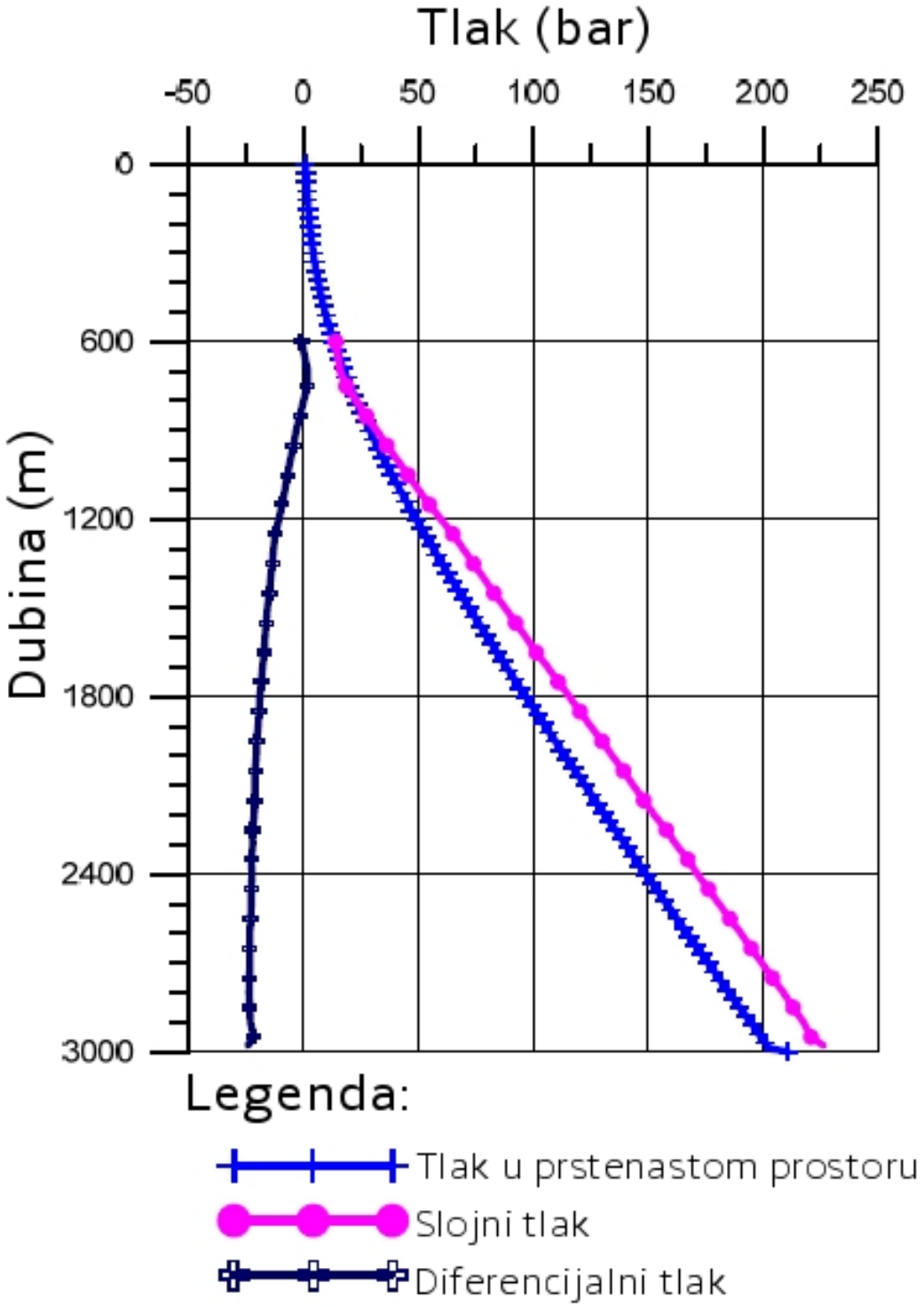
Geotermalna bušotina Olkaria 38 (OW-38) nalazi se na istoimenom geotermalnom polju u Keniji. Proizvodna bušotina OW-38 namijenjena je za eksploataciju vodene pare za proizvodnju električne energije. Bušotina je izbušena do dubine od 3 000 m. Kao isplaka, koristila se bentonitna isplaka, svježa voda te aerizirana isplaka i pjena u različitim sekcijama kanala bušotine. U tablici 5-3. prikazani su podatci o konstrukciji i isplaci za geotermalnu bušotinu Olkaria 38. Na slici 5-4. nalazi se dijagram tlaka kod bušenja u uvjetima podtlaka.

Na temelju tablice 5-3. vidljivo je da se zbog frakturiranih stijena u geotermalnom ležištu trebalo koristiti ekološki prihvatljivu isplaku jer su na nekim dijelovima bušotine čak bili i

totalni gubitci. Također, na primjeru bušotine OW-38 vidljivo je korištenje aerizirane isplake u praksi. Na slici 5-4. vidljivo je da se s bušenjem u uvjetima podtlaka krenulo oko 600 m dubine. Sve do konačne dubine bušotine od 3 000 m koristila se UBD tehnologija. Diferencijalni tlak je, naravno, bio negativan (podtlak) te je od 1 200 m dubine do konačne dubine bušotine praktički održavan konstantan na cca -25 bar.

Tablica 5-3. Podatci o konstrukciji i isplaci za geotermalnu bušotinu Olkaria 38 (Chemwotei, 2011)

Promjer dlijeta (m)	**Promjer Z.C. (m)**	**Dubina (m)**	**Dubina ugradnje Z.C. (m)**	**Isplaka**	**Gubitci**
0,6604 (26")	0,5080 (20")	63	62	1) bentonitna isplaka (10,7-42 m) @ 50 L/s 2) voda (42-63 m) @ 70 L/s	-totalni gubitci na 42 m, -bušenje "na slijepo" sa svježom vodom
0,4445 (17 1/2")	0,3397 (13 3/8")	306,45	305,5	voda @ 65 L/s	-gubitak nije izračunat (povrat oko 80% isplake)
0,3112 (12 1/4")	0,2445 (9 5/8")	753	751,7	1) voda (292,3-334 m) @ 60 L/s 2) aerizirana voda i pjena (334-753 m) @ 60 L/s	-gubitak cirkulacije na 334 m i promjena na aeriziranu vodu i pjenu, -tijekom bušenja aeriziranom vodom i pjenom nije mjeren gubitak
0,2159 (8 1/2")	0,1778 (7") lajner	3000	3000	1) voda (686-787 m): za ispiranje krhotina cementnog kamena @ 60 L/s 2) aerizirana voda i pjena (787-3000 m) @ 55 L/s	-totalni gubitci na 1403 i 2562 m



Slika 5-4. Dijagram tlaka kod bušenja u uvjetima podtlaka (Chemwotei, 2011)

6. ZAKLJUČAK

Geotermalna energija predstavlja obnovljiv, održiv i čist izvor energije. Geotermalni gradijent je pokazatelj potencijala određenog područja za iskorištenje geotermalne energije i glavni je parametar za otkrivanje geotermalnih ležišta. Toplina geotermalne vode ili pare može se koristiti bilo za grijanje, bilo za proizvodnju električne energije. Kako bi se iskoristilo geotermalno ležište, potrebno je izraditi i adekvatno opremiti geotermalnu bušotinu.

Izrada geotermalnih bušotina je u domeni naftnog rudarstva. Za izradu se koriste sva znanja i tehnologije koje su poznate iz izrade naftno-plinskih bušotina. Međutim, mogu se javiti određeni problemi specifični za geotermalne bušotine. Problemi koji se javljaju su: visoke temperature, gubljenje cirkulacije i filtracija, debeli isplačni oblog i utjecaj kiselih plinova. Geotermalna ležišta su visoko-temperaturna što zahtijeva izbor temperaturno otpornih isplačnih i cementnih aditiva. Za sprječavanje preranog zgušćivanja cementne kaše koriste se usporivači. Geotermalna ležišta uz visoku temperaturu imaju još jednu karakteristiku, a to su frakturirane i propusne zone kao područja potencijalnog gubljenja isplake i cementne kaše. Sprječavanje gubljenja isplake postiže se njezinim olakšavanjem ili korištenjem aditiva za zatvaranje mjesta gubljenja isplake (LCM), a moguće je korištenje isplaka male gustoće kao npr. aerizirane isplake. Kako bi se spriječilo gubljenje cementne kaše, također je potrebno smanjiti njezinu gustoću. To se postiže olakšivačima i materijalima za čepljenje. Također, postoje i specijalno pripremljene cementne kaše namijenjene za cementiranje geotermalnih bušotina, to su npr. pjenocementne kaše koje su se pokazale kao odlična alternativa korištenju olakšivača.

Korištenje geotermalne energije najviše je koncentrirano u nekoliko zemalja na svijetu koje imaju velika i visoko-temperaturna geotermalna ležišta koje je ekonomski isplativo eksploatirati. Republika Hrvatska za sada ima samo jednu aktivnu geotermalnu elektranu, ali puno je potencijala u hrvatskom dijelu Panonskog bazena gdje je geotermalni gradijent veći od EU prosjeka. Nekoliko projekata je u fazi planiranja i velika je vjerojatnost njihove realizacije, najviše zbog zelenih politika Europske unije. Ipak, najveća prepreka bržem razvoju ovakvih projekata su visoki kapitalni troškovi, osobito bušotina koje treba izraditi i opremiti.

7. LITERATURA

1. ALESCIO, S., RICCIARDULLI, R., VALLINI, A., CAPONI, N., 1999. *Coiled Tubing Injection String for Geothermal Wells*. Konferencija: 1999 SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, Texas, svibanj 25-26.
2. American Petroleum Institute, 2009. *Hydraulic Fracturing Operations – Well Construction and Integrity Guidelines*. Washington: API Publishing Services.
3. BETT, E.K., 2010. *Geothermal well cementing, materials and placement techniques.* Geothermal training programme, Orkustofnun, Grensásvegur 9, IS-108 Reykjavík, Iceland.
4. BILIĆ, T. 2016. *Izvedba bušotine Boš-1 na geotermalnom polju "Bošnjaci – sjever"*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, diplomski rad.
5. BLAND, R., MULLEN, G., GONZALES, Y., HARVEY, F., PLESS, M., 2006. *HP/HT Drilling Fluids Challanges*. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Bangkok, Thailand.
6. CAZIN, V., 2019. *Eksploatacijsko polje geotermalne vode Zagreb i mogućnosti njezinog korištenja.* Nafta i plin, Vol.38, br.156, str. 62-73.
7. CHEMWOTEI, S.C., 2011. *Geothermal drilling fluids*. Geothermal training programme. Orkustofnun, Grensásvegur 9, IS-108 Reykjavík, Iceland.
8. CHERAGHIAN, G., 2020. *Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art.* Technische Universitat Braunschweig, Braunschweig, Germany.
9. CULTRERA, M., 2016. *Design of deep geothermal wells.* Department of Geosciences, University of Padua, Italy.
10. ELEZOVIĆ, I., ŠKRLEC, M., KOLBAH, S., 2018. *Konstrukcije proizvodnih geotermalnih bušotina u Hrvatskoj.* Nafta i Plin, Vol. 38. br. 155. str. 60-78.
11. FINGER, J., BLANKENSHIP, D., 2010. *Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550.
12. GAURINA-MEĐIMUREC, N., MATANOVIĆ, D., KRKLEC, G., 1994. *Cement slurries for geothermal wells cementing*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol. 6, str. 127-134.
13. GAURINA-MEĐIMUREC, N., PAŠIĆ, B., 2011. *Konstrukcija i mehanička cjelovitost bušotina za utiskivanje CO_2*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol.23, str. 1-8.

14. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2018. *Predavanja iz kolegija Bušotinski fluidi 1, ak.god. 2018./19.* Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
15. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2020. *Predavanja iz kolegija Bušenje 2, ak.god. 2020./21.* Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
16. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2021. *Predavanja iz kolegija Bušotinski fluidi 2, ak.god. 2020./21.* Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
17. GETLIHER, A. i HORVAT, S., 2008. *Uporaba geotermalnih resursa na području grada Zagreba u cilju gospodarskoga razvitka*. U: Radić, J. (ur.) Razvitak Zagreba.
18. GREENE, K., SECURITY, D., GOODMAN, L., 1982. *Geothermal Well Drilling and Completion*.
19. MACENIĆ, M., 2020. *Konceptualni model eksploatacije geotermalne energije revitalizacijom napuštenih naftnih i plinskih bušotina u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske.* Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, doktorska disertacija.
20. MATANOVIĆ, D., 2013. *Tehnika izrade bušotina: priručnik s primjerima.* Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
21. MOHAMED, A., SALEHI, S., AHMED, R., 2021. *Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: A review.* University of Oklahoma, Norman, OK, United States.
22. NIGGEMANN, K., SAMUEL, A., MORRIS, A.V., HERNÁNDEZ, R., 2010. *Foamed Cementing Geothermal 13 3/8-in. Intermediate Casing: NGP #61-22.* Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.
23. PUTRA, I.M.B.K.A., 2008. *Drilling practice with aerated drilling fluid: Indonesian and Icelandic geothermal fields*. Geothermal training programme. Orkustofnun, Grensásvegur 9, IS-108 Reykjavík, Iceland.
24. SAITO, S., SAKUMA, S., 2000. *Frontier Geothermal Drilling Operations Succeed at 500 °C BHST.* SPE Drill. & Completion, Vol. 15, br. 3, str. 152-161.
25. SALIM, S., AMANI, M., 2013. *Principal Points in Cementing Geothermal Wells*. Advances in Petroleum Exploration and Development, Vol. 5, No. 1, str. 77-91.
26. SHADRAVAN, A., GHASEMI, M., ALFI, M., 2015. *Zonal Isolation in Geothermal Wells.* Stanford University, Stanford, California.
27. SIMON, K., GAURINA-MEĐIMUREC, N., PAŠIĆ, B., 2005. *Drilling fluids differential sticking tendency determination.* Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol.17, str. 31-35.

28. THORBJORNSSON, I., KALDAL, G.S., GUNNARSSON, B.S., RAGNRARSSON, A., 2017. *A New Approach to Mitigate Casing failures in High-Temperature Geothermal Wells.* GRC Transactions, Vol.41, str. 585-591.
29. TORRES, A., 2014. *Challenges of Casing Design in Geothermal Wells.* IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, Bangkok, Thailand.
30. TUTTLE, J.D., 2005. *Drilling Fluids for the Geothermal Industry – Recent Innovations.* GRC Transactions, Vol.29, str. 535-540.
31. ŽIVKOVIĆ, S., KOLBAH, S., ŠKRLEC, M., TUMARA, D., 2019. *Geothermal Energy Use, Country Update for Croatia.* European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands.

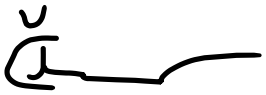
Web izvori:

32. AGENCIJA ZA UGLJIKOVODIKE. *Geoterme.*
URL: https://www.azu.hr/geoterme/ (6. 6. 2022.)
33. DINGUNO. *Spring Bow and Solid Rigid Casing Centralizers.*
URL: https://www.drinol.com/products/casing-centralizers.html (8. 6. 2022.)
34. DRILLING CONTRACTOR. *Bit of best fit.*
URL: https://www.drillingcontractor.org/23877-23877 (6. 6. 2022.)
35. DRILLING MANUAL. *Casing Scratchers Overview In Wells Cementing.*
URL: https://www.drillingmanual.com/casing-scratchers-pros-cons/ (6. 6. 2022.)
36. FANN. *Filter Press HPHT 500ml and 175ml.*
URL: https://www.fann.com/en/products/filter-press-hpht-500-175 (6. 6. 2022.)
37. HIMIPEX OIL GROUP. *Corrosive gases CO2 and H2S in the stream of produced oil and gas condensate.*
URL: http://himipex.com/corrosive-gases-so2-and-h2s-in-the-stream-of-produced-oil-and-gas-condensate (6. 6. 2022.)
38. ICELAND DRILLING. *Óðinn Drillmec HH-220.*
URL: https://www.jardboranir.is/equipment-rigs/odinn/ (6. 6. 2022.)
39. ICELAND DRILLING. *Saga Soilmec G-55.*
URL: https://www.jardboranir.is/equipment-rigs/saga/ (6. 6. 2022.)
40. ICELAND DRILLING. *Tyr Drillmec HH-300.*
URL: https://www.jardboranir.is/equipment-rigs/tyr/ (6. 6. 2022.)

41. LINKEDIN. *Geothermal wells vs. HPHT in Oil & Gas.* URL: https://www.linkedin.com/pulse/geothermal-wells-vs-hpht-oil-gas-raymi-castilla/ (6. 6. 2022.)
42. MANNVIT. *IDDP-2 (Icelandic Deep Drilling Project).* URL: https://www.mannvit.com/projects/iddp-2-icelandic-deep-drilling-project/ (18. 6. 2022.)
43. MIV. *Leptirasti zatvarač.* URL: https://miv.hr/proizvodi/leptirasti-zatvaraci/centricni-leptirasti-zatvaraci/leptirasti-zatvarac-6/ (7. 6. 2022.)
44. ONSITE TREATMENT SERVICES AS. *Mud Cooler*. URL: https://ots.as/products/mud-cooler/ (7. 6. 2022.)
45. OUR WORLD IN DATA. *Installed geothermal energy capacity, 2020*. URL: https://ourworldindata.org/grapher/installed-geothermal-capacity (9. 6. 2022.)
46. PINTEREST. *Drilling fluid circulation system.* URL: https://www.pinterest.com/pin/514465957408186844/ (6. 6. 2022.)
47. RESEARCHGATE. *Average geothermal gradient of the Croatian territory.* URL: https://www.researchgate.net/figure/Average-geothermal-gradient-of-the-Croatian-territory-URL-1_fig2_315580383 (6. 6. 2022.)
48. RESEARCHGATE. *Three-cone roller/tricone bit types.* URL: https://www.researchgate.net/figure/Three-cone-roller-tricone-bit-types_fig1_354618091 (6. 6. 2022.)
49. SCHLUMBERGER. *The Defining Series: HPHT Wells.* URL: https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-hpht (6. 6. 2022.)
50. SCHLUMBERGER OILFIELD GLOSSARY. *Differential sticking.* URL: https://glossary.oilfield.slb.com/en/terms/d/differential_sticking (6. 6. 2022.)
51. TRENCHLESSPEDIA. *Bentonite and the Use of Drilling Mud in Trenchless Projects.* URL: https://www.trenchlesspedia.com/bentonite-and-the-use-of-drilling-fluid-in-trenchless-projects/2/3607 (6. 6. 2022.)
52. WIKIPEDIA. *Bizovačke toplice.* URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Bizovačke_toplice (6. 6. 2022.)
53. WIKIPEDIA. *Geotermalna energija u Hrvatskoj*. URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Geotermalna_energija_u_Hrvatskoj (6. 6. 2022.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom „Specifičnosti izrade geotermalnih bušotina“ izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



Jakov Čičmir

KLASA: 602-01/22-01/136
URBROJ: 251-70-12-22-2
U Zagrebu, 30.06.2022.

Jakov Čičmir, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/136, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 19.05.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

SPECIFIČNOSTI IZRADE GEOTERMALNIH BUŠOTINA

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Nediljka Gaurina-Međimurec nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentora Dr.sc. Petar Mijić.

Mentorica:

(potpis)

Prof.dr.sc. Nediljka Gaurina-Međimurec
(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković
(titula, ime i prezime)

Komentor:

(potpis)

Dr.sc. Petar Mijić
(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje Pašić
(titula, ime i prezime)