# Cementacija geotermalnih bušotina

**Granić, Toni**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*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:169:276177

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-28**



*Repository / Repozitorij:*

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









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

# CEMENTACIJA GEOTERMALNIH BUŠOTINA

Diplomski rad

Toni Granić
N 319

Zagreb, 2021.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Nediljki Gaurini-Međimurec na pomoći, savjetima i strpljenju ukazanom prilikom izrade diplomskog rada.

Veliko hvala mojim roditeljima, sestri i prijateljima koji su bili uz mene bez obzira na sve teškoće i prepreke tijekom studiranja.

Bez njih ovo postignuće ne bi bilo moguće.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet Diplomski rad

# CEMENTACIJA GEOTERMALNIH BUŠOTINA

TONI GRANIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

Opremanje geotermalnih bušotina obavlja se na jednak način kao i opremanje HPHT naftnih i plinskih bušotina. Međutim, proces bušenja i cementacije uvelike se razlikuje jer su uvjeti za dizajn isplake i cementne kaše koje su namijenjene za primjenu u geotermalnim bušotinama zahtjevniji od njihova dizajna za naftne i plinske bušotine. Problemi koji se posebno izraženi u geotermalnim bušotinama su: diferencijalni prihvat uslijed stvaranja debelog isplačnog obloga, gubljenje cirkulacije, $CO_2$ korozija kolone zaštitnih cijevi i cementnog kamena i visoke temperature. Dizajn cementne kaše i njenih svojstava, kao i postupak cementacije mora se planirati i provesti uzimajući u obzir sve prethodno navedene probleme. U ovom radu opisano je cementiranje geotermalnih bušotina i prikazane su specifičnosti dizajna cementne kaše za geotermalne bušotine u odnosu na HPHT naftne i plinske bušotine. Na kraju rada prikazani su primjeri iz prakse cementacije zaštitnih cijevi u geotermalnim bušotinama i problemi koji su se javili prilikom cementacije.

Ključne riječi: geotermalna bušotina, cementna kaša, cementacija zaštitnih cijevi, HPHT bušotine, $CO_2$, cement

Diplomski rad sadrži: 61 stranica, 6 tablica, 19 slika i 47 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Mentor: Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica u trajnom zvanju RGNf-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica u trajnom zvanju RGNf-a
2. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor u trajnom zvanju RGNf-a
3. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNf-a

Datum obrane: 11.06.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty od Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

# GEOTHERMAL WELLS CEMENTING

TONI GRANIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

Geothermal well completion is performed in the same way as the completion of HPHT wells. However, the process of drilling and cementation is very different because the conditions faced by the cement slurry and rocks at geothermal wells are extremely demanding. Geothermal wells are frequently faced with numerous problems, such as mud cake, circulation loss, the threat of corrosion caused by carbon dioxide and high temperature. Cement slurry design and its features, as well as the process of cementation has to be planned in detail, taking into consideration all the problems that might be encountered. This thesis describes the cementation of a geothermal well as well as the specifics of cement slurry design for geothermal wells with regards to HPHT oil and gas wells. The thesis also provides some practical examples of the process of casing cementation in geothermal wells and gives an overview of problems which occurred during cementation.

Keywords: geothermal wells, cement slurry, cementation, well cementing, HPHT wells, $CO_2$, cement
Thesis contains: 61 pages, 6 tables, 19 figures and 47 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Supervisor: Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

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

Date of defense: 11.06.2021., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

**SADRŽAJ**

**POPIS SLIKA……...……I**
**POPIS TABLICA……...II**
**POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA…….III**

**1. UVOD** ..... 1
**2. PROBLEMI U GEOTERMALNIM BUŠOTINAMA** ..... 3
2.1. Visoka temperatura ..... 3
2.2. Gubljenje cirkulacije ..... 3
2.3. Debeo isplačni oblog ..... 4
2.4. $CO_2$ korozija ..... 4
**3. DIZAJN CEMENTNE KAŠE ZA GEOTERMALNE UVJETE** ..... 6
3.1. Svojstva cementne kaše ..... 6
3.2. Bušotinski cement ..... 8
*3.2.1. API klase cementa* ..... 10
3.3. Aditivi ..... 15
*3.3.1. Ubrzivači* ..... 15
*3.3.2. Usporivači* ..... 15
*3.3.3. Dispergatori* ..... 16
*3.3.4. Aditivi za smanjenje filtracije* ..... 16
*3.3.5. Oteživači* ..... 17
*3.3.6. Olakšivači* ..... 18
*3.3.7. Antipjenušavci* ..... 18
**4. CEMENTACIJA GEOTERMALNIH BUŠOTINA** ..... 19
4.1. Metode cementiranja kolona zaštitnih cijevi ..... 21
*4.1.1 Jednostupanjska cementacija* ..... 22
*4.1.2. Cementacija uvodne kolone zaštitnih cijevi kroz bušaće šipke* ..... 23
*4.1.3. Cementacija obrnutom cirkulacijom* ..... 25
*4.1.4. Dvostupanjska cementacija* ..... 27
**5. HPHT BUŠOTINE** ..... 31
5.1. Klasifikacija HPHT bušotina ..... 31
5.2. Dizajn cementne kaše za HPHT uvjete u bušotini ..... 32
**6. HPHT I GEOTERMALNE BUŠOTINE** ..... 34
6.1. Izazovi cementacije HPHT i geotermalnih bušotina ..... 36

**7. PRIMJERI IZ PRAKSE** ..... 39
7.1. Područje Republike Hrvatske ..... 39
*7.1.1. Geotermalno ležište Velika Ciglena* ..... 42
*7.1.2. Eksploatacijsko polje geotermalne vode Draškovec* ..... 46
*7.1.3. Geotermalno polje Zagreb* ..... 48
*7.1.4. Geotermalno polje Bizovac* ..... 49
7.2. Geotermalna polja u svijetu ..... 51
*7.2.1. Geotermalno polje Berlin* ..... 51
*7.2.2. Geotermalno polje Svartseogi na Islandu* ..... 54
**8. ZAKLJUČAK** ..... 57
**9. LITERATURA** ..... 58

**POPIS SLIKA**

Slika 2-1. Cement API klase G……13

Slika 4-1. Shematski prikaz opreme kolone zaštitnih cijevi i procesa jednostupanjske cementacije…….……..20

Slika 4-2. Shematski prikaz jednostupanjske cementacije kolone zaštitnih cijevi…..……22

Slika 4-3. Shematski prikaz cementacije uvodne kolone zaštitnih cijevi kroz bušaće šipke…….24

Slika 4-4. Shematski prikaz cementacije kolone zaštitnih cijevi direktnom i obrnutom cirkulacijom ……..……..26

Slika 4-5. Shematski prikaz dvostupanjske cementacije…….....28

Slika 4-6. Shematski prikaz dvostupanjske cementacije s jednim čepom za protiskivanje kaše prvog stupnja……30

Slika 5-1. Klasifikacija HPHT bušotina……...32

Slika 6-1. Dijagram ležišnog tlaka i temperature za konvencionalne i HPHT naftne i plinske te geotermalne bušotine……35

Slika 6-2. Različite faze u vezivanju cementne kaše……37

Slika 7-1. Poznata geotermalna nalazišta u Republici Hrvatskoj…….40

Slika 7-2. Geotermalno polje Velika Ciglena…….…….43

Slika 7-3. Konstrukcija bušotine Velika Ciglena 1A…….……..44

Slika 7-4. Uzdužni geološki profil……...46

Slika 7-5. Konstrukcija bušotine Draškovec-3…….47

Slika 7-6. Položaj geotermalnog polja Zagreb…….……49

Slika 7-7. Položaj geotermalnog polja Bizovac……...50

Slika 7-8. Konstrukcija bušotine TR-4A ……..……..52

Slika 7-9. Konstrukcija bušotine SJ-19 …….....55

**POPIS TABLICA**

Tablica 7-1. Iskorištavanja termalnih voda u Republici Hrvatskoj……..41

Tablica 7-2. Podjela geotermalnih ležišta……42

Tablica 7-3. Cementacija niza zaštitnih cijevi bušotine Velika Ciglena 1A……..…..45

Tablica 7-4. Cementacija niza zaštitnih cijevi bušotine Draškovec-3……..48

Tablica 7-5. Sastav cementne kaše za cementaciju proizvodne bušotine TR-4A……53

Tablica 7-6. Sastav cementne kaše za cementaciju bušotine SJ-19…….56

**POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA**

| Oznaka | Opis | Jednica |
|---|---|---|
| API | Američki naftni institut (engl. *American Petroleum Institute*) | - |
| BHCT | Temperatura na dnu u optoku (engl. *Bottomhole Circulation Temperature*) | °C |
| BHST | Temperatura na dnu u statičkim uvjetima (engl. *Bottomhole Static Temperature*) | °C |
| BWOC | Udjel aditiva na masu cementa (engl. *By Weight on Cement*) | % |
| Bc | API jedinica konzistencije | Uc |
| CLCF | Vlaknasti materijal za zatvaranje mjesta gubljenja cementne kaše (engl. *Cement lost circulation fibers*) | - |
| ECD | Ekvivalentna gustoća isplake (engl. *Equivalent circulating density*) | $kg/m^3$ |
| MSR | Umjereno sulfatno otporan (engl. *Medium Sulphate Resistant*) | - |
| TVD | Stvarna vertikalna dubina bušotine (engl. *True Vertical Depth*) | m |

# 1. UVOD

Temperatura Zemljine kore raste s povećanjem dubine obično od 5 °C do 70 °C po kilometru. U pojedinim područjima s anomalijama geotermalni gradijent može biti znatno veći od ovih prosječnih brojki. Takva područja povezana su s rubovima kontinentalnih ploča gdje slabija čvrstoća Zemljine kore dopušta magmi da se približi površini. Upravo u takvim uvjetima pronađeni su geotermalni resursi gdje se danas nalaze geotermalne bušotine (Hole, 2008).

S obzirom na iskoristivosti dostupne energije geotermalna ležišta se dijele na ležišta s temperaturom nižom od 120 °C (voda se koristi za zagrijavanje i u zdravstvene svrhe) i s višom od 120 °C (energetski potencijal se koristi za proizvodnju električne energije) (Gaurina-Međimurec et al., 1994).

Cementacija je proces protiskivanja cementne kaše s ciljem ispunjavanja prstenastog prostora. Za razliku od plinskih i naftnih bušotina specifičnost cementacije geotermalnih bušotina jest cementacija svih ugrađenih kolona zaštitnih cijevi od dna do površine. Svrha cementacije je učvršćivanje zaštitnih cijevi, sprječavanje korozije i izoliranje proizvodnih naslaga. Cementacija geotermalnih bušotina obuhvaća ispunjavanje cjelokupne duljine prstenastog prostora cementnom kašom koja može izdržati izloženost u geotermalnim uvjetima posebice u dijelovima bušotine s visokim udjelom ugljikovog dioksida ($CO_2$). Cementna kaša nastaje miješanjem cementa i vode, a kemijski aditivi se dodaju kako bi joj se promijenila svojstva zbog različitih uvjeta koji vladaju u bušotini. Dizajn cementne kaše potrebno je prilagoditi posebnim uvjetima koji vladaju u geotermalnim bušotinama kako bi se kaša uspješno protisnula jednom od metoda cementacije.

Uvjeti temperature koji vladaju na dnu bušotine djeluju na reološka svojstva, vrijeme zgušćivanja, tlačnu čvrstoću i vrijeme vezivanja. Iz tog razloga važno je poznavati temperaturu kojoj će cementna kaša biti izložena za vrijeme procesa cementacije kako bi se dizajn cementne kaše prilagodio specifičnim uvjetima (Gaurina-Međimurec et al., 1994).

Američki naftni institut (engl. *American Petroleum Institute – API*) klasificira cemente u osam skupina ovisno o zahtjevima bušotine. U geotermalnim bušotinama obično se koristi portland cement API klase A i G, ali i klase J (Bett, 2017). Dizajn cementne kaše za geotermalne bušotine razlikuje se od dizajna za konvencionalne naftne i plinske bušotine jer sadrži kvarcno brašno umjesto kvarcnog pijeska.

Svrha diplomskog rada je opisati cementiranje kolona zaštitnih cijevi koje se ugrađuju u geotermalnu bušotinu i objasniti razliku u dizajnu cementne kaše koje će se pri tom koristiti u odnosu na dizajn cementne kaše za HPHT naftne i plinske bušotine. Na kraju diplomskog rada prikazani su primjeri iz prakse u kojima se opisuje ugradnja i cementacija kolona zaštitnih cijevi u geotermalne bušotine.

# 2. PROBLEMI U GEOTERMALNIM BUŠOTINAMA

Geotermalni resursi nalaze se uglavnom u područjima koja predstavljaju probleme i za bušenje rotacijskom metodom uz primjenu niza bušaćih šipki (Salim i Amani, 2013b). U daljnjem tekstu opisani su problemi koji mogu biti prisutni u geotermalnim bušotinama i utjecati na svojstva cementne kaše i cementnog kamena.

U geotermalnim bušotinama velike probleme uzrokuju visoke temperature, prisutnost ugljikovog dioksida u geotermalnoj vodi, debeli isplačni oblog na stijenkama kanala bušotine, kao posljedica prevelike filtracije, i gubljenje cirkulacije tijekom bušenja i cementacije zbog postojanja frakturiranih zona (Salim i Amani, 2013b).

## 2.1. Visoka temperatura

Cilj je dizajnirati cementnu kašu koja će vrlo brzo očvrsnuti u cementni kamen i razviti tlačnu čvrstoću kako bi se smanjilo vrijeme čekanja na stvrdnjavanje i nastavka daljnjeg bušenja. Tlak i temperatura imaju izuzetan utjecaj na tlačnu čvrstoću cementnog kamena. Za geotermalne bušotine potrebno je postići tlačnu čvrstoću veću od 6,90 MPa (1 000 psi) (Salim i Amani, 2013b).

Pri temperaturi većoj od 110 °C cementom kamenu će početi opadati tlačna čvrstoća zbog promjene u strukturi hidratiranog cementa (C-S-H gel prelazi u alfa dikalcij silikat hidrat α-$C_2SH$) i gubitka vode. Pojava smanjivanja čvrstoće cementnog kamena uslijed visoke temperature i proteklog vremena naziva se opadanje čvrstoće (engl. *strength retrogression)* (Salim i Amani, 2013b). Kako bi se ta pojava izbjegla pri cementiranju u visoko temperaturnim geotermalnim bušotinama Portland cementu se dodaje kvarcno brašno u koncentraciji od 30 do 40% na masu cementa (engl. *By Weight on Cement - BWOC*).

## 2.2. Gubljenje cirkulacije

Najčešći problem koji se javlja u geotermalnim bušotinama predstavlja gubljenje isplake tijekom bušenja i/ili gubljenje cementne kaše tijekom procesa cementacije. Kanal geotermalne bušotine izrađuje se kroz formacije sastavljene od stijene koje mogu biti iznimno konsolidirane do jako frakturirane. Osim što je financijski neisplativo, gubljenje cirkulacije uzrokuje i mnoge

druge probleme. Primjerice, bušenje bez povratka toka isplake na površinu može dovesti u najgorem slučaju i do gubitka bušotine. Gubljenje isplake u ležišne stijene uzrokuje smanjenje njihove propusnosti što dovodi do smanjenje proizvodnosti bušotine (Carson, 1982).

U slučaju da se tijekom cementacije cementna kaša ne pojavi na površini, kako je bilo planirano, tada je vjerojatno došlo do njenog gubljenja u okolne stijene (zone malog tlaka). Stoga, uobičajeno rješenje ovog problema je korištenje cementne kaše male gustoće. Prilikom dizajniranja cementnih kaša male gustoće, osim Portland cementa i vode potrebno je dodati i olakšivače čija je primarna funkcija smanjenja gustoće cementne kaše.

## 2.3. Debeo isplačni oblog

Dodavanjem aditiva za smanjenje filtracije u sastav cementne kaše može se smanjiti izdvajanje filtrata iz cementne kaše, a time i njena dehidracija. Poželjno je da filtracija cementne kaše bude što manja kako bi se postigla visokokvalitetna bentonitna suspenzija (Gaurina-Međimurec, 2017). Posljedica izdvajanja filtrata iz cementne kaše u stijenu jest oštećenje stijene zbog njegove izrazito visoke pH vrijednosti, ali i stvaranje isplačnog obloga koji uzrokuje prihvat kolone zaštitnih cijevi.

## 2.4. $CO_2$ korozija

Stabilnost kanala bušotine pod direktnim je utjecajem ugljikovog dioksida. Naime, ugljikov dioksid je korozivan plin, a posljedice njegovog djelovanja nepovoljne su za cementni kamen (Gaurina-Međimurec i Pašić, 2011). Korozija uzrokovana njegovim djelovanjem nastaje u porama cementnog kamena uslijed reakcije između ugljikovog dioksida i vode zaostale u pornom prostoru.

U geotermalnim bušotinama dolazi do karbonizacije cementnog kamena. Izloženost cementnog kamena djelovanju ugljikovog dioksida utječe na povećanje propusnosti cementnog kamena, dok je iznos tlačne čvrstoće i pod utjecajem ugljikovog dioksida prihvatljiv (Salim i Amani, 2013b).

Smanjivanjem količine Portland cementa dodavanjem pucolanskih silikatnih materijala (primjerice dijatomejske zemlje) i dodavanjem reaktivnih materijala postiže se veća otpornost

na djelovanje ugljikovog dioksida. Navedena promjena sastava cementne kaše smanjuje štetni učinak karbonizacije na mehanički integritet bušotine (Gaurina-Međimurec, 2017).

# 3. DIZAJN CEMENTNE KAŠE ZA GEOTERMALNE UVJETE

Vjerojatno najkritičniji dio izrade geotermalnih bušotina jest cementacija zaštitnih kolona. Dizajn cementne kaše geotermalnih bušotina izvodi se s obzirom na specifične uvjete koji su prisutni u pojedinoj bušotini. Naftna industrija proizvela je širok spektar visoko sofisticiranih i iznimno skupih materijala u svrhu cementacije naftnih i plinskih bušotina. Kada je u pitanju cementacija geotermalnih bušotina još uvijek ne postoji veliki broj materijala posebno namijenjenih za primjenu u geotermalnim bušotinama. Nažalost, većina materijala koji se koriste u naftnoj industriji nisu pogodni za geotermalno područje (Ungemach et al., 2005).

Prilikom dizajna cementne kaše potrebno je koristiti točne vrijednosti statičke temperature na dnu bušotine (engl. *Bottomhole Static Temperature - BHST*), temperaturu u optoku na dnu bušotine (engl. *Bottomhole Circulation* Temperature - BHCT) i temperaturu tijekom pridobivanja geotermalne vode koja utječe na cementni kamen (Gaurina-Međimurec, 2017). Posebno je važno poznavanje temperature u optoku na dnu bušotine jer djeluje na svojstva cementne kaše, kao što su vrijeme zgušćivanja, reološka svojstva, razvoj tlačne čvrstoće i vrijeme vezivanja.

## 3.1. Svojstva cementne kaše

Dizajn cementne kaše treba osigurati mogućnost njenog protiskivanja cijelom duljinom zacijevljenog i nezacijevljenog dijela kanala bušotine. Cementna kaša također mora (Gaurina-Međimurec, 2017):

- posjedovati odgovarajuću gustoću bez narušavanja ostalih svojstava,
- biti pumpatibilna i lako mješiva,
- imati svojstva koja će omogućiti istiskivanje isplake,
- posjedovati optimalna reološka svojstva,
- zadržati kemijska i fizička svojstva tijekom protiskivanja,
- biti nepropusna za plin.

U nastavku se ukratko opisuju svojstva cementne kaše.

### *3.1.1. Gustoća*

Ovisno o uvjetima u bušotini odnosno slojnom tlaku potrebno je prilagoditi gustoću cementne kaše. Na promjenu gustoće utječu aditivi koji se dodaju cementu – olakšivači i oteživači. Osim aditivima, gustoća cementne kaše se može podešavati i promjenom vodocementnog faktora (Gaurina-Međimurec, 2017).

### *3.1.2. Vrijeme zgušćivanja*

Vrijeme zgušćivanja je vrijeme proteklo između početka primjene tlaka i temperature i postizanja konzistencije od 100 Bc. Tijekom vremena u kojem je kaša fluidna potrebno je obaviti njeno protiskivanje u prstenasti prostor. Nakon protiskivanja cementna kaša stvrdnjava u cementni kamen. Prema zahtjevima pojedinog projekta, proces zgušćivanja i vezivanja cementne kaše može se ubrzati ili usporiti dodavanjem aditiva. Generalno, dodavanjem ubrzivača cementna kaša može očvrsnuti u cementni kamen tijekom nekoliko sekundi, a dodavanjem usporivača cementna kaša može biti fluidna dulje od 36 sati. Temperatura, tlak, vodocementni faktor, finoća mliva i sastav cementa utječu na vrijeme zgušćivanja cementnih kaša (Gaurina-Međimurec, 2017).

### *3.1.3. Filtracija*

Filtracija predstavlja proces izdvajanja filtrata iz cementne kaše pod utjecajem diferencijalnog tlaka u poroznu stijenu. Vrijednost filtracije cementne kaše prilagođava se tipu cementacije, a poželjno je da vrijednost cementne kaše bude što manja. Brzina filtracije ovisi o tlaku, temperaturi, sastavu cementne kaše, aditivima, vodocementnom faktoru, mineraloškom sastavu cementa i specifičnoj površini cementa. Filtracija cementnih kaša može se smanjiti povećanjem finoće mliva čestica klinkera ili dodavanjem aditiva za smanjenje filtracije (Gaurina-Međimurec, 2017). Vrijednost 30-minutne filtracije cementne kaše za geotermalne bušotine trebala bi biti od 50 do 100 ml (Salim i Amani, 2013b).

### *3.1.4. Reološka svojstva*

Reološki modeli koji se koriste za opisivanje ponašanja cementne kaše su: Binghamov plastični, eksponencijalni i modificirani eksponencijalni model. Navedeni modeli opisuju vezu

između smičnog naprezanja i smične brzine. Reološki parametri Binghamovog modela su plastična viskoznost i naprezanje pri pokretanju, dok su: indeks konzistencije i indeks toka reološki parametri eksponencijalnog i modificiranog eksponencijalnog modela. Vrijednosti reoloških parametara uvrštavaju se u formule za određivanje tipa protjecanja, kritične brzine protjecanja, Reynoldsova broja i smanjenja tlaka uslijed otpora protjecanja cementne kaše. Za uspješnu cementaciju kolone zaštitnih cijevi poželjan je turbulentni režima toka cementne kaše kako bi se postigla potpuna zamjena isplake cementnom kašom u prstenastom prostoru (Gaurina-Međimurec, 2017).

### *3.1.5. Slobodna voda*

Slobodna voda (engl. *Free water content*) predstavlja maksimalnu količinu vode koja je dodana cementu pri kojoj se ne izdvoji više od 3,5 ml vode iz 250 ml cementne kaše nakon dva sata mirovanja u menzuri pri sobnim uvjetima temperature. Slobodna voda jest količina vode pri kojoj ne dolazi do taloženja cementnih čestica jer se održavaju u suspenziji sve dok je kaša fluidna i ne počne očvršćivati u cementni kamen (Gaurina-Međimurec, 2017).
Za pripremu kaše za cementiranje u geotermalnim bušotinama potrebno je odabrati odgovarajući cement i aditive.

## 3.2. Bušotinski cement

Osnovna komponenta bušotinskog cementa je *Portland cement*. Sirovina za njegovu proizvodnju sastoji se od minimalno dvije komponente – vapnenca i gline. Smjesa vapnenca i gline u omjeru 3:1 zagrijava se do temperature sinteriranja (temperatura početnog taljenja) koja iznosi 1400 – 1450 °C. Cilj zagrijavanja je kemijsko vezivanje vapna (CaO) s oksidima silicija, željeza i aluminija stvarajući čvrsti proizvod klinker. Klinker je proizvod kojem se tijekom mljevenja dodaje 3-6% gipsa u svrhu reguliranja vremena vezivanja i povećanja početne čvrstoće te 10-15% mineralnih dodataka. Najvažniji minerali klinkera su trikalcijev silikat ($C_3S$), dikalcijev silikat ($C_2S$), tetrakalcijev aluminatferit ($C_4AF$) i trikalcijev aluminat ($C_3A$), a njihov udio varira u portland cementu (Gaurina-Međimurec, 2017).

Spajanjem vode s portland cementom dolazi do spajanja minerala klinkera s vodom, odnosno hidratacije portland cementa. Minerali klinkera ne sadrže vodu i tijekom hidrolize dolazi do pucanja njihovih kristalnih rešetki te nastajanja hidrata i hidroksida. Kao produkti hidratacije

silikata nastaju hidrosilikati kalcija i kalcijev hidroksid koji utječu na proces očvršćavanja cementne kaše u cementni kamen. Kalcijev hidroksid $Ca(OH)_2$ (mineral portlandit) se, pri visokim temperaturama, izdvaja u znatnijim količinama što dovodi do smanjenja čvrstoće i povećanja propusnosti cementnog kamena u prstenastom prostoru kanala bušotine.
Portland cement je vrsta cementa koja se najviše koristi u naftnoj industriji, međutim u okruženjima s visokom temperaturom ne ponaša se jednako kao u konvencionalnim bušotinama. Problem nastaje pri temperaturama iznad 110 °C jer dolazi do opadanja čvrstoće cementnog kamena (engl. *strenght retrogression*) (Hole, 2008).

Cementi na bazi kalcijeva fosfata ili kalcijeva aluminosilikata koriste se za cementaciju geotermalnih bušotina. Manja veličina čestica u usporedbi s Portland cementom utječe uvelike na fizička i kemijska svojstva, primjerice zbog brže i bolje hidratacije (Saghiri et al., 2016).

Cementacija cementnom kašom manje gustoće (engl. *Light Weight* Cementing) obuhvaća korištenje posebno mljevenog cementa i patentirane mješavine cementa. Obično je gustoća cementne kaše odabrana obzirom na porni tlak i tlak frakturiranja. Cementna kaša veće gustoće pruža veću tlačnu čvrstoću, međutim to će uzrokovati veći tlak u prstenastom prostoru i mogućnost gubitka cirkulacije. Iz tog razloga, cementne kaše manje gustoće koriste se za cementaciju geotermalnih bušotina kako bi se anulirala mogućnost gubitka cirkulacije, ali i sprječavanje dotoka plina (https://www.drillingcontractor.org, 2021).

Konvencionalni cementi ne mogu uvijek izdržati opterećenje koje se javlja unutar cementnog kamena tijekom životnog vijeka geotermalne bušotine. Prednosti primjene pjenocementne kaše za geotermalne bušotine su duktilnost cementnog kamena, izbjegavanje gubitka cirkulacije, kvalitetno istiskivanje isplake i pogodniji utjecaj na okoliš. Pjenocementne kaše imaju malu gustoću pa je i manja vjerojatnost da će se tijekom cementacije premašiti tlak frakturiranja i uzrokovati gubitak cirkulacije (Bour i Rickard, 2000).

U geotermalnim bušotinama ponekad dolazi do širenja i skupljanja cementnog kamena uzrokujući migraciju plina. Cementna kaša s dodatkom lateksa pogodna je za takve uvjete jer lateks formira nepropusni film i sprječava migraciju plina (Salim i Amani, 2013b). Nadalje, geotermalne bušotine često se suočavaju s gubitkom cirkulacije. Tijekom cementacije preporuka je da se u cementnu kašu dodaju vlakna (engl. *cement lost circulation fibers - CLCF*) koja pomažu premostiti zonu gubitka cirkulacije i uspostaviti normalnu cirkulaciju (Salim i Amani, 2013b). Postoji mogućnost da tijekom primarne cementacije nema povratka cementne

kaše na površinu. Takva situacija zahtijeva pročišćavanje prstenastog prostora vodom, a zatim utiskivanje cementne kaše kroz prstenasti prostor sve do pojave na površini. Ova metoda pokazala se učinkovitom kod geotermalnih bušotina (Salim i Amani, 2013b).

Metoda obrnute cirkulacije, cementacija uvodne kolone kroz bušaće šipke i dvostupanjska cementacija koriste se za cementaciju geotermalnih bušotina.

### *3.2.1. API klase cementa*

Bušotinski cementi proizvode se prema API propisima povezanim s promjenom dubine i temperature u bušotini. Naime, API Specification 10A klasificira bušotinske cemente u osam klasa ovisno o kemijskim i fizikalnim zahtjevima. API Spec 10A obuhvaća klase A, B, C, D, E, F, G i H. Unutar navedenih klasa proizvode se tri tipa cementa oznake O, MSR i HSR. Tipovi se razlikuju ovisno o udjelu trikalcijevog aluminata ($C_3A$) prisutnog u klinkeru tako da cement tipa O (engl. *Ordinary*) predstavlja cement koji nije otporan na sulfate, cement tipa MSR (engl. *Medium Sulphate Resistant*) je umjereno sulfatno otporan, a cement tipa HSR (engl. *High Sulphate Resistant*) je visoko sulfatno otporan cement (API Spec 10A; Morales et al., 2003). Osim API specifikacije postoji i ASTM specifikacija (ASTM - American Society for Testing Materials, 1898; sada ASTM International) pa se u nastavku za API klase cementa A, B i C u zagradama navodi ekvivalentni tip cementa prema ASTM specifikaciji. Prema ASTM specifikaciji cementi se ne dijele u podtipove s obzirom na otpornost prema sulfatima.

Klasa A

Cement klase A koristi se za cementiranje plitkih bušotina, odnosno područja od površine do maksimalne dubine 1830 m. Proizveden je mljevenjem klinkera uz dodavanje gipsa i drugih dodataka prema specifikaciji ASTM C 465 Američkog društva za testiranje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials – ASTM*). Ovaj cement koristi se u uvjetima koji ne zahtijevaju posebna svojstva i iz toga razloga se proizvodi samo običan tip (ASTM Tip I).

Klasa B

Cement klase B koristi se za cementiranje plitkih bušotina, odnosno područja od površine do maksimalne dubine 1830 m. Proizveden je mljevenjem klinkera uz dodavanje gipsa i drugih

dodataka prema specifikaciji ASTM C 465 Američkog društva za testiranje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials – ASTM*). Ovaj cement koristi se u uvjetima koji zahtijevaju umjerenu do visoku otpornost prema utjecaju sulfata i iz toga razloga se proizvode dva tipa – umjereno i visoko sulfatno otporan tip cementa (ASTM Tip II).

Klasa C

Cement klase C koristi se za cementiranje plitkih bušotina, odnosno područja od površine do maksimalne dubine 1830 m. Proizveden je mljevenjem klinkera uz dodavanje gipsa i drugih dodataka prema specifikaciji ASTM C 465 Američkog društva za testiranje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials – ASTM*). Ovaj cement koristi se u uvjetima koji zahtijevaju brzo stvrdnjavanje i veliku čvrstoću cementnog kamena. Proizvode se tri tipa cementa klase C – običan, umjereno i visoko sulfatno otporan tip cementa (ASTM Tip III).

Klasa D

Cement klase D koristi se za cementiranje dubljih dijelova bušotine od 1830 m do 3050 m dubine. Proizveden je mljevenjem klinkera uz dodavanje gipsa i drugih dodataka prema specifikaciji ASTM C 465 Američkog društva za testiranje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials – ASTM*). Također, dodani su organski spojevi i krupnije su mljeveni zbog postizanja manje finoće kako bi se postiglo dulje vrijeme zgušćivanja koje je potrebno za dublje bušotine. Ovaj cement koristi se u uvjetima umjereno visokih tlakova i temperatura, a proizvode se dva tipa cementa klase D – umjereno i visoko sulfatno otporan tip cementa.

Klasa E

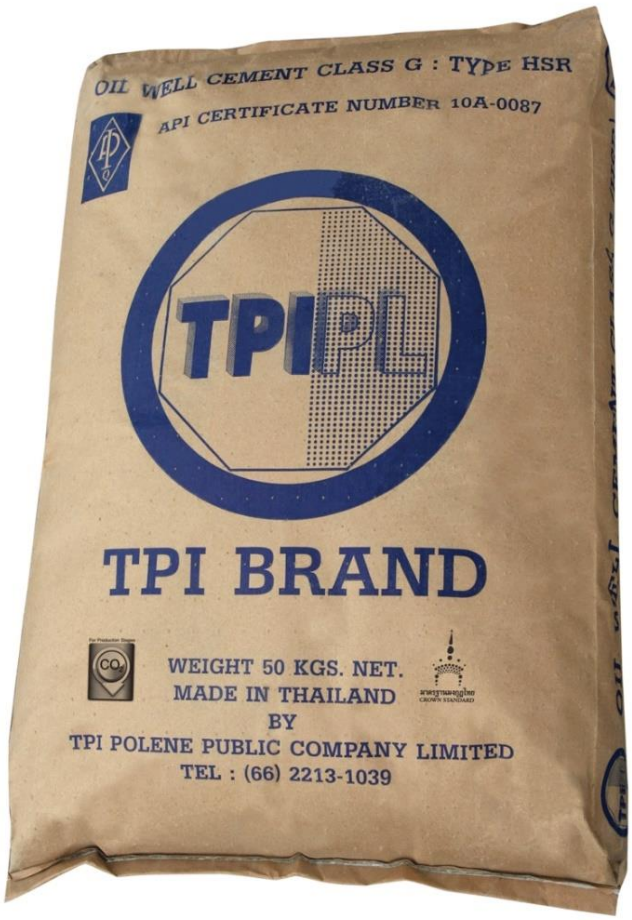
Cement klase E koristi se za cementiranje dijelova bušotine od 3050 m do 4270 m dubine. Proizveden je mljevenjem klinkera uz dodavanje gipsa i drugih dodataka prema specifikaciji ASTM C 465 Američkog društva za testiranje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials – ASTM*). Također, dodani su organski spojevi i krupnije su mljeveni zbog postizanja manje finoće kako bi se postiglo dulje vrijeme zgušćivanja koje je potrebno za dublje bušotine. Ovaj cement koristi se u uvjetima visokih temperatura i tlakova, a proizvode se dva tipa cementa klase E – umjereno i visoko sulfatno otporan tip cementa.

Klasa F

Cement klase F koristi se za cementiranje dijelova bušotine od 3050 m do 4880 m dubine. Proizveden je mljevenjem klinkera uz dodavanje gipsa i drugih dodataka prema specifikaciji ASTM C 465 Američkog društva za testiranje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials – ASTM*). Također, dodani su organski spojevi i krupnije su mljeveni zbog postizanja manje finoće kako bi se postiglo dulje vrijeme zgušćivanja koje je potrebno za dublje bušotine. Ovaj cement koristi se u uvjetima iznimno visokih temperatura i tlakova, a proizvode se dva tipa cementa klase F – umjereno i visoko sulfatno otporan tip cementa.

Klasa G i H

Cement klase G i H koristi se kao osnovni bušotinski cement za cementiranje od površine do 2240 m dubine bez dodatak, slika 2-1. Proizveden je mljevenjem klinkera uz dodavanje gipsa prema specifikaciji ASTM C 465 Američkog društva za testiranje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials – ASTM*). Korištenjem aditiva (ubrzivača ili usporivača) pogodni su za širok raspon dubina i temperatura. Proizvode se dva tipa cementa klase G i H – umjereno i visoko sulfatno otporan tip cementa.




**Slika 2-1.** Cement API klase G (www.tpipolene.co.th, 2021)

Cement klase H, po mineraloškom sastavu, gotovo je identičan cementu klase G osim što se razlikuje po finoći mliva koja je zanemarivo manja, a to mu omogućuje dulje vrijeme očvrćavanja, odnosno prikladniji je za dublje bušotine i veće temperature. Vrijednost finoće mliva za cement klase G iznosi 140-160 $m^2$/kg, a klase H 120-140 $m^2$/kg (Gaurina-Međimurec, 2017).

Dizajniranje cementne kaše i planiranje procesa cementacije pojedine kolone zaštitnih cijevi obavlja se na osnovu specifičnih bušotinskih uvjeta. Iz tog razloga nije moguće stvoriti standardizirane uvjete za dizajn cementne kaše zbog različitih uvjeta koji vladaju u bušotinama.

Za cementiranje geotermalnih bušotina obično se koristi cement API klase A i G (Hole, 2008).

### *3.2.2. Ostale vrste cemenata za geotermalne bušotine*

Korištenje standardnih cemenata ponekad nije dovoljno za savladavanje uvjeta u geotermalnim bušotinama. Iz tog razloga razvijene su ostale vrste cemenata za geotermalne bušotine koje se u nastavku opisuju.

#### Cementne kaše male gustoće

U slučaju da je zona gubitka cirkulacije iznad proizvodne zone proces cementacije bit će kompleksniji. Cementne kaše male gustoće služe za izbjegavanje gubljenja cirkulacije, a jedna od metoda jest dodavanje staklenih kuglica u cementnu kašu. Gustoća cemente kaše s dodatkom staklenih kuglica je manja od gustoće vode. Kako bi se izbjeglo opadanje čvrstoće cementnog kamena u geotermalnim bušotinama potrebno je dodati 26% $SiO_2$ u cementnu kašu (Salim i Amani, 2013b).

#### Polimerno modificirana cementna kaša

Cementne kaše za geotermalne bušotine trebale bi štiti zaštitne cijevi od korozije uzrokovane slanom vodom. Kako bi se spriječila korozija zaštitnih cijevi razvijena je metoda koja se zasniva na dodavanju organskih polimera u pjenocementnu kašu. U polimerno modificiranoj cementnoj kaši pore su zatvorene zbog prisustva stabilnih polimera koji ograničavaju kretanje korozivnog fluida kroz cementni kamen. Ovaj pristup naglašava korisnost vodotopivih polimera kao aditiva za smanjenje propusnosti pjenocementnog kamena i sprječavanje njegove korozije (Sugama, 2006).

## 3.3. Aditivi

Za pripremu cementne kaše, osima cementa i vode, koriste se i aditivi kojima se reguliranju njena svojstva (Michaux et al., 1990).

Cementni aditivi se prema njihovoj glavnoj funkciji dijele u sljedeće skupine:

1) ubrzivači,
2) usporivači,
3) dispergatori,
4) aditivi za smanjenje filtracije,
5) oteživači,
6) olakšivači,
7) antipjenušavci i
8) smanjivači sedimentacije.

### *3.3.1. Ubrzivači*

Ubrzivači su kemijski dodaci koji se dodaju cementnoj kaši namijenjenoj za primjenu u plitkim bušotinama niskog geotermalnog gradijenta kako bi se skratilo vrijeme njenog zgušćivanja i očvršćavanja u cementni kamen. Cementne kaše s dodatkom ubrzivača hidratiraju brže pa zbog toga očvršćavaju u cementni kamen visoke početne čvrstoće i otpornosti na vibracije čime se skraćuje vrijeme čekanja na očvršćavanje cementne kaše (engl. *Waiting on Cement – WOC*) i omogućava nastavak bušenja u kraćem vremenskom roku. Najčešće korišten ubrzivač jest kalcijev klorid ($CaCl_2$) i u normalnim uvjetima dodaje se u koncentraciji 2-4% na masu cementa (engl. *By Weight on Cement - BWOC*). Osim njega koristi se i natrijev klorid (NaCl) u koncentraciji 2,0-2,5% BWOC (Michaux et al.,1990).

### *3.3.2. Usporivači*

Usporivači su kemijski dodaci koji se dodaju cementnoj kaši namijenjenoj za primjenu u većim dubinama gdje se očekuje i viša temperatura na dnu bušotine u optoku (engl. *Bottomhole Circulating Temperature - BHCT*) zbog usporavanja reakcija hidratacije, a time i produljenja

vremena zgušćivanja cementne kaše (vremena pumpabilnosti) za uspješno protiskivanje cementne kaše do željene visine u prstenastom prostoru (Nelson et al., 1990).
Usporivači moraju biti kompatibilni s cementom, ali i s drugim aditivima. Iz toga razloga preporuka je korištenje cementa klase G i H koji se mogu koristiti u kombinaciji s usporivačem i do 9120 m. Sekundarno djelovanje usporivača jest smanjenje viskoznosti, neznatno smanjenje filtracije i smanjenje početne čvrstoće (Gaurina-Međimurec, 2017).

U cementnim kašama se kao usporivači koriste (Gaurina-Međimurec, 2017): lignosulfonati i njihovi derivati, derivati celuloze, derivati šećera, hidroksikarbonske kiseline, organofosfati i neki anorganski spojevi. Izbor tipa i koncentracije usporivača ovisi o bušotinskim uvjetima, prvenstveno o temperaturi.

### *3.3.3. Dispergatori*

Dispergatori se koriste u cementnim kašama u svrhu smanjenja trenja i poboljšanja reoloških svojstava. Također, njihovo dodavanje u cementnu kašu pospješuje turbulentno protjecanje kaše čime se ostvaruje bolja veza između stijenke kanala bušotine i kolone zaštitnih cijevi (Fink, 2015). Najčešće korišteni dispregatori su oni komercijalnog naziva CD32 (CD32L), D604AM, CFR-1, CFR-2 (Gaurina-Međimurec, 2017).

Uspješna cementacija oslanja se na kvalitetnoj raspodjeli cementne kaše unutar prstenastog prostora. Kaša veće gustoće može se protisnuti u prstenasti prostor primjenom dispergatora čime se anulira gubitak tlaka zbog svladavanja otpora i smanjuje ukupan tlak na dno uz protiskivanje kaše manje gustoće (Sedić, 2017).

### *3.3.4. Aditivi za smanjenje filtracije*

Filtracija je proces izdvajanja vode iz radnog fluida (cementne kaše ili isplake) u poroznu stijenu uslijed djelovanja diferencijalnog tlaka. Vodena faza prodire u propusnu stijenu, a u cementnoj kaši se povećava udio čvrstih čestica, tzv. filtrata. Posljedica nekontrolirane filtracije je promjena reoloških svojstava, vremena zgušćivanja i gustoće cementne kaše. Brzina filtracije ovisi o: tlaku, mineraloškom sastavu stijene, specifičnoj površini cementa, temperaturi, aditivima i vodocementnom faktoru (Nelson et al., 1990). Preporuka je postizanje

što manje filtracije, a njena se veličina prilagođava ovisno o tipu cementacije. Filtracija cementne kaše može se reducirati povećanjem finoće mliva čestica cementa (primjerice, korištenjem druge klase cementa) ili dodavanjem aditiva kako bi se povećala viskoznost disperzne sredine ili smanjila količina slobodne vode (Gaurina-Međimurec, 2017). Najčešće korišteni aditivi za smanjenje filtracije su derivati celuloze, celuloza, dispergatori, polivinil alkohol, polinaftalensulfonat, latex aditivi i drugi.

### *3.3.5. Oteživači*

Primarna zadaća oteživača je povećanje gustoće cementne kaše u dubokim bušotinama radi ostvarenja tlaka u bušotini koji je protuteža visokim slojnim tlakovima čime se sprječava dotok slojnog fliuda, nestabilnost stijenki kanala bušotine i plastična deformacija stijena. Drugim rječima, kako bi se održala kontrola nad bušotinom potrebno je postići gustoću cementne kaše čiji stupac ostvaruje jednak ili veći tlak od slojnog tlaka (Nelson, 1990). Općenito, gustoća cementne kaše treba biti najmanje 120 kg/m$^3$ (1,0 ppg) veća od gustoće isplake u kanalu bušotine u vrijeme cementacije. Najčešće korišteni oteživači su Hematit ($Fe_2O_3$), Ilmenit ($FeTiO_3$), Barit ($BaSO_4$) i Manganov tetraoksid ($Mn_3O_4$).

Oteživači moraju zadovoljiti sljedeće kriterije (Nelson, 1990):

1) posjedovati raspodjelu veličine čestica koja je kompatibilna s finoćom mliva cementa,
2) zahtijevati iznimno male količine vode,
3) biti inertni u suspenziji i
4) biti kompatibilni s drugim aditivima.

Kao sekundarno djelovanje oteživača, karakteristično je smanjenje propusnosti cementnog kamena i neznatno smanjenje konačne čvrstoće kamena, povećanje viskoznosti kaše te sprječavanje smanjenja postignute čvrstoće kamena pomoću kvarcnog brašna (Nelson, 1990).

### *3.3.6. Olakšivači*

Kako bi se primarna i popravna cementacija izvele s minimalnom mogućnosti frakturiranja formacija sklonih frakturiranju (engl. *weak zone*) potrebno je koristiti cementne kaše smanjene gustoće. Iz tog razloga, ovisno o uvjetima koji vladaju u bušotini, koriste se olakšivači za postizanje željene gustoće cementne kaše. Kaše smanjene gustoće ostvaruju manji tlak u bušotini te se preporučuju za cementaciju kroz zona malog tlaka u geotermalnim bušotinama kako bi se izbjeglo gubljenje cementne kaše u frakturirane stijene. Kao aditivi za smanjenje gustoće cementne kaše koristi se bentonit, lebdeći pepeo (umjetni porculan), dijatomejska zemlja, gilsonit, ekspandirani perlit i drugi (Nelson, 1990).

U geotermalnim bušotinama preporuka je korištenje bentonita ili ekspandiranog perlita i izbjegavanje korištenja lebdećeg pepela zbog nepovoljnog utjecaja na tlačnu čvrstoću cementnog kamena pri temperaturama većim od 230 °C (Salim i Amani, 2013a).

### *3.3.7. Antipjenušavci*

Pjenjenje cemente kaše uzrokuje probleme prilikom očitavanja vrijednosti gustoće cementne kaše. Gustoća zapjenjene cementne kaše izmjerena na površini bit će manja od njene stvarne gustoće u bušotini jer će uslijed djelovanja tlaka doći do komprimiranja mjehurića zraka prisutnih u stupcu cementne kaše. Posljedice pogrešnog očitavanja gustoće cementne kaše na površini dovodi do frakturiranja stijena te gubitka cementne kaše u stvorene frakture.

Antipjenušavci se koriste s ciljem reduciranja udjela zraka u cementnoj kaši i sprječavanja loma ležišnih stijena. Najčešće korišteni antipjenušavci su D-Air 3000L, NF-6, SAFE-DFOAM$^{TM}$, D-047 i CA-AFL (Sedić, 2017).

# 4. CEMENTACIJA GEOTERMALNIH BUŠOTINA

Tehnologija i oprema korištena prilikom bušenja geotermalnih bušotina u većini slučajeva jednaka je kao i za naftne bušotine. Međutim, bušenje geotermalnih bušotina s trenutnom tehnologijom uzrokuje probleme koji značajno povećavaju vrijeme i cijenu izrade kanala bušotine (Radwan i Karimi, 2011).

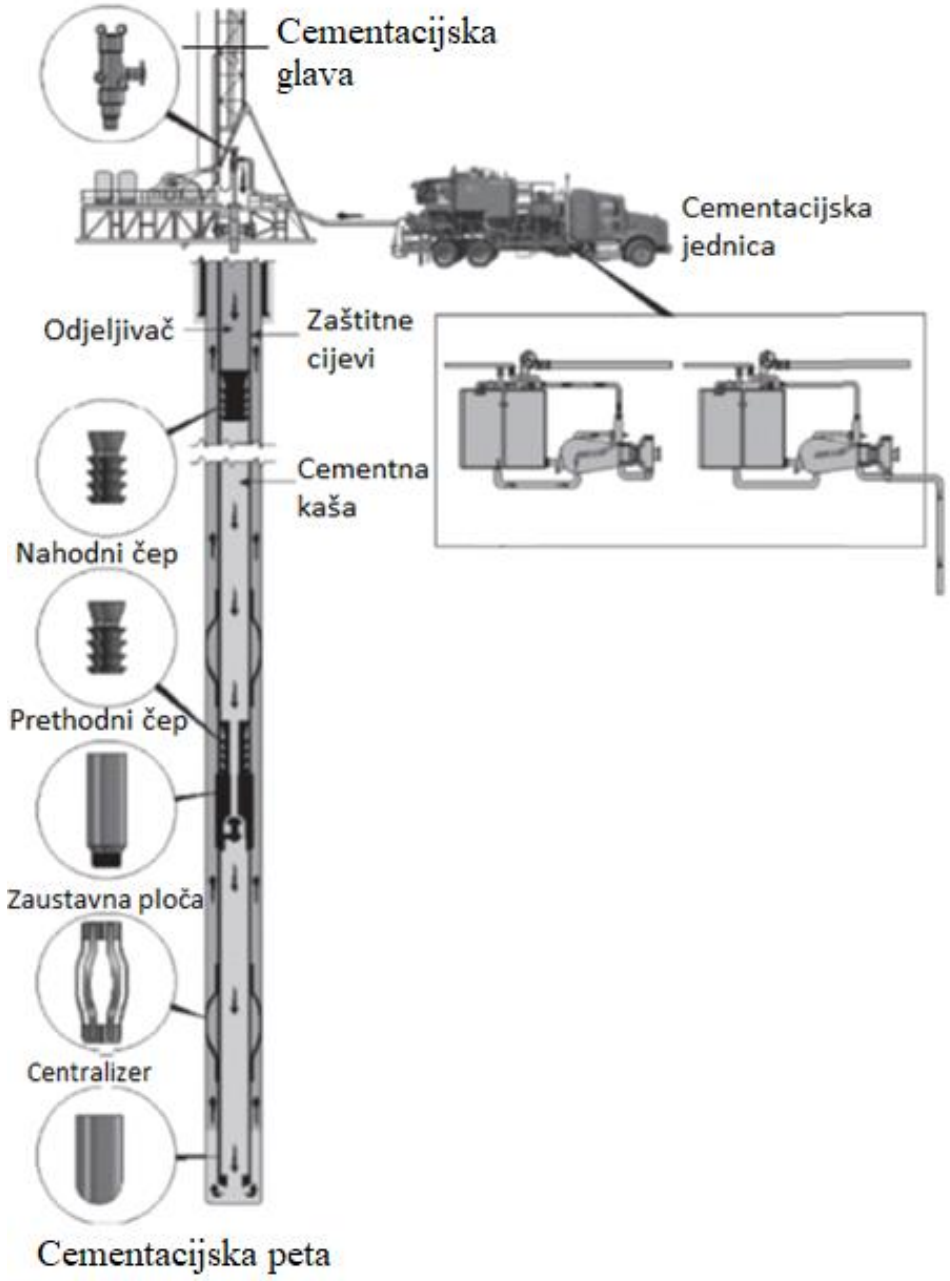
Bušenjem geotermalnih bušotina nailazi se na područja visokih temperatura, koje dosežu i preko 200 °C na dnu bušotine, ali i visokih tlakova. Bušenje se uglavnom odvija kroz stijene veće tvrdoće od mekših sedimentnih stijena u slučaju izrade naftnih bušotina. Također, slojna (geotermalna) voda je korozivna i povećanog saliniteta što zahtijeva prilagođavanje dizajna cementne kaše korozivnim uvjetima.

S obzirom na to da sve navedene karakteristike geotermalnih bušotina uzrokuju poteškoće prilikom bušenja potrebno je obratiti pozornost kako bi se one svele na prihvatljivu razinu ili u potpunosti izbjegle (Carson, 1982).

Prema Bett (2017) proces uspješne cementacije uključuje pet ključnih koraka:

1. Analiza uvjeta u bušotini s obzirom na namjenu prije dizajniranja metode cementiranja i cementne kaše kako bi se održala cjelovitost bušotine kroz cijeli radni vijek.
2. Određivanje sastava cementne kaše i provođenje laboratorijskih ispitivanja.
3. Određivanje volumena cementne kaše, miješanje i utiskivanje kaše u prstenasti prostor te uspostavljanje sigurnosnih postupaka u slučaju nepredviđenih okolnosti (engl. *backup and contingency procedures*).
4. Praćenje postupka cementacije u realnom vremenu; od prvog koraka usporedba projektiranih i stvarnih parametara i prema potrebi njihovo podešavanje.
5. Analiza uspješnosti izvedene cementacije.

Cilj cementacije zaštitnih cijevi je osigurati ispunjavanje cijele duljine prstenastog prostora cementnom kašom koja će očvrsnuti u cementni kamen koji može izdržati dugotrajnu izloženost geotermalnim fluidima i temperaturama (Hole, 2008). Oprema kolone zaštitnih cijevi i proces jednostupanjske cementacije shematski su prikazani na slici 4-1 (Bett, 2017).




**Slika 4-1.** Shematski prikaz opreme kolone zaštitnih cijevi i procesa jednostupanjske cementacije (Bett, 2017)

Osnovne zadaće cementnog obloga (engl. *cement sheath*) odnosno cementnog kamena u prstenastom prostoru, između kolone zaštitnih cijevi i formacije su (Bett, 2010):

1. Osigurati međuzonalnu izolaciju i spriječiti kretanje fluida kroz prstenasti prostor iz jedne formacije u drugu ili iz formacije do površine.
2. Učvrstiti zaštitne cijevi u kanalu bušotine.
3. Zaštititi zaštitne cijevi od djelovanja korozivnih fluida i od izvijanja (engl. *buckling*).
4. Poduprijeti stijenke kanala bušotine (zajedno s kolonom zaštitnih cijevi) radi sprječavanja kolapsa kanala (suženja kanala izazvanog deformiranjem stijena).
5. Zaštititi zaštitne cijevi od dodatnih opterećenja uslijed vibracija (engl. *shock loads*) tijekom bušenja stijena koje zaliježu dublje od ugrađene kolone.
6. Spriječiti erupciju brtvljenjem prstenastog prostora.

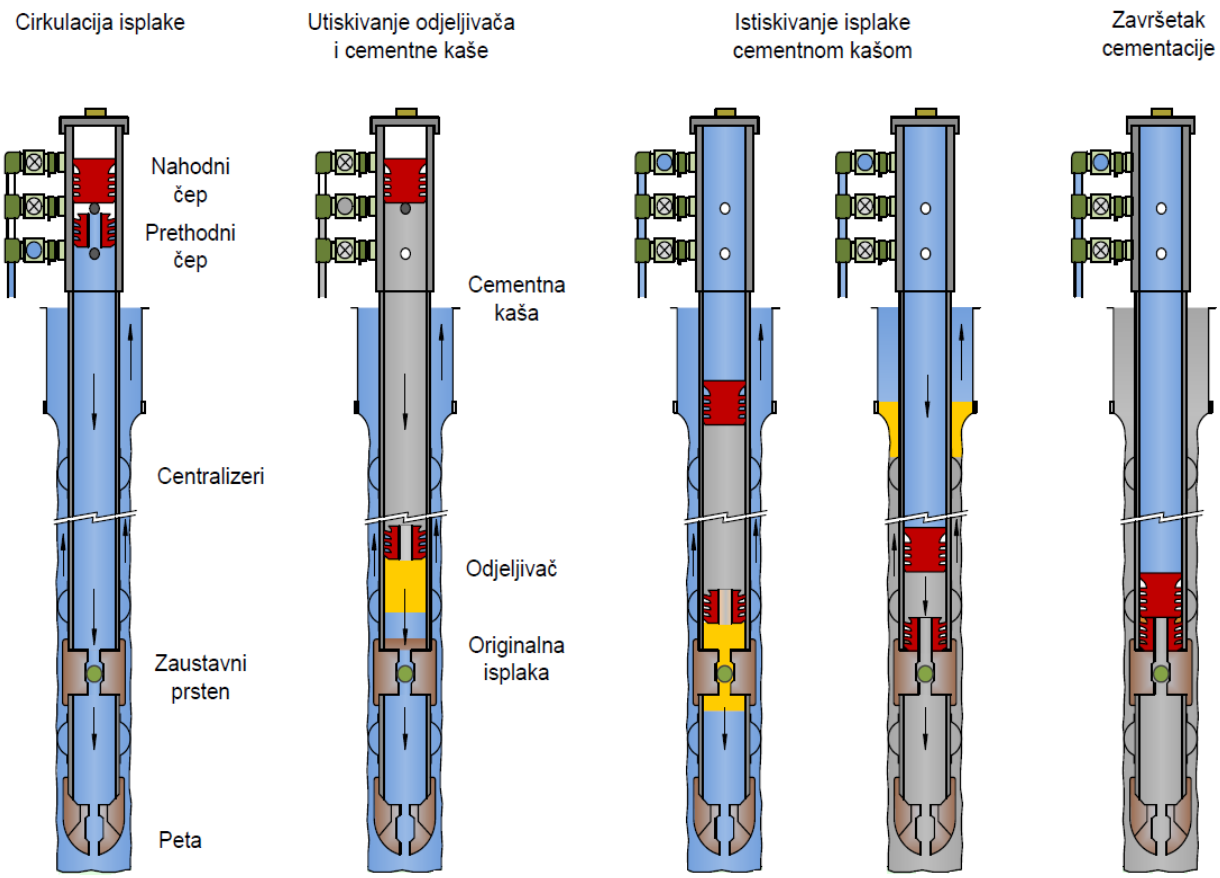
## 4.1. Metode cementiranja kolona zaštitnih cijevi

Uspješna primarna cementacija ključna je za omogućavanje daljnjeg bušenja. Većina primarnih cementacija obavlja se utiskivanjem cementne kaše kroz zaštitne cijevi prema dnu bušotine i nakon toga njenim protiskivanjem kroz prstenasti prostor prema površini. Međutim, postoje i druge metode koje se koriste za specifične slučajeve.

Cementacija kolona zaštitnih cijevi u geotermalnim bušotinama može se odvijati kroz zaštitne cijevi u jednom ili dva stupnja, kroz bušaće šipke kao i obrnutom cirkulacijom odnosno utiskivanjem cementne kaše kroz prstenasti prostor.

*4.1.1 Jednostupanjska cementacija*

Jednostupanjska cementacija je najčešća metoda cementacije, a proces izvođenja cementacije prikazan je na slici 4-2.




**Slika 4-2.** Shematski prikaz jednostupanjske cementacije kolone zaštitnih cijevi (Gaurina-Međimurec, 2017)

Postupak ugradnje i cementacije zaštitnih cijevi u jednom stupnju obuhvaća sljedeće korake (Gaurina-Međimurec, 2017):

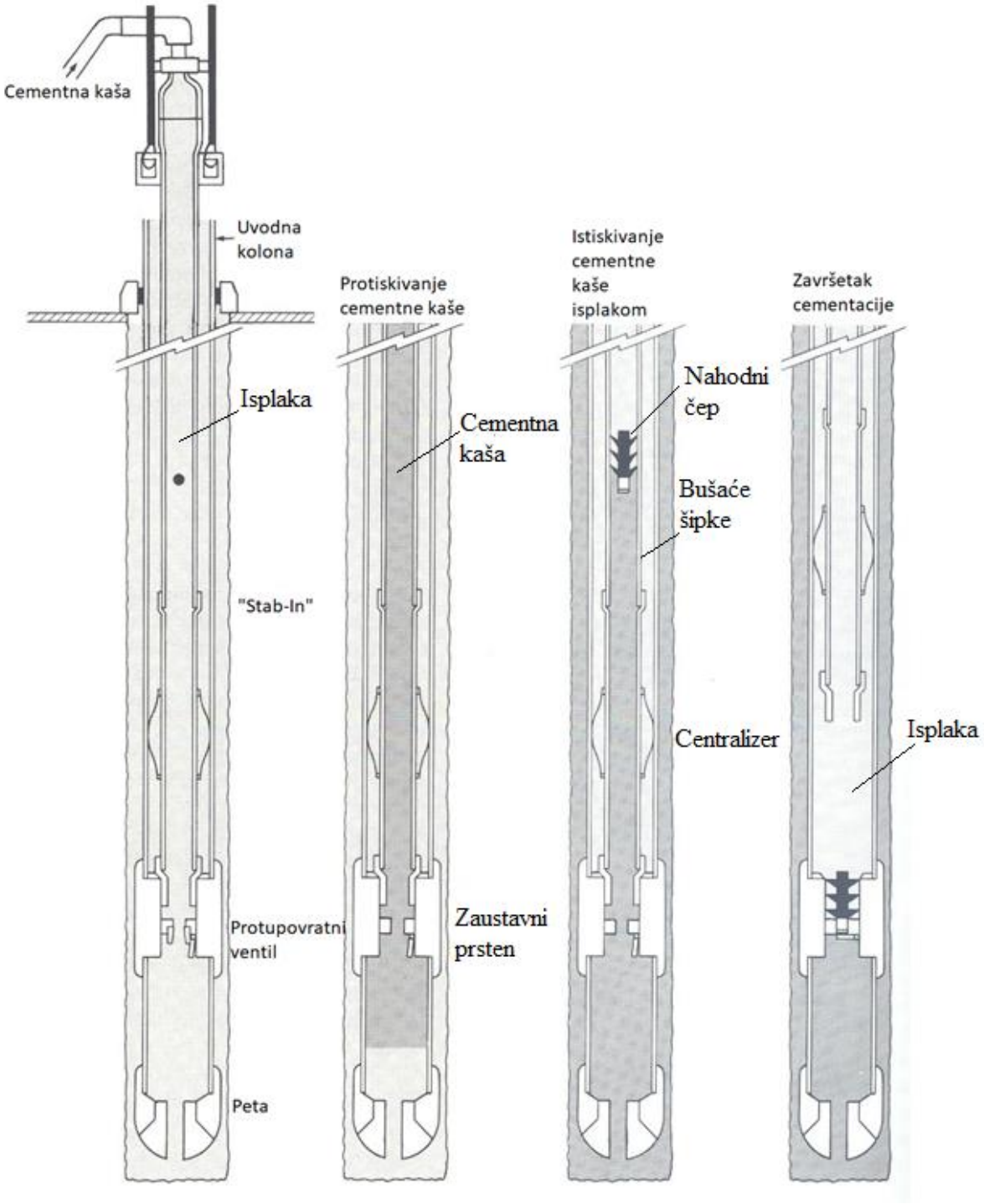
a) Zaštitne cijevi spuštaju se u bušotinu opremljene cementacijskom petom s protupovratnim ventilom, zaustavnim prstenom i centralizerima sve dok cementacijska peta nije nekoliko metara udaljena od dna bušotine.

b) Cementacijska glava zajedno s nahodnim (engl. *shut-off plug*) i prethodnim čepom (engl. *wiper plug*) nalazi se na vrhu zaštitnih cijevi kao što je prikazano na slici 4-2.
c) U bušotini i koloni nalazi se isplaka koja je prije cementacije kondicionirana kako bi bila što mobilnija i lakše zamijenjena cementnom kašom.
d) Prethodni čep otpušta se iz cementacijske glave, potiskuje isplaku i čisti od unutarnje stijenke zaštitnih cijevi. Zatim, slijedi protiskivanje odjeljivača (engl. *spacer*) i cementne kaše. Svrha odjeljivača je sprječavanje miješanja cementne kaše i isplake. Nakon što prethodni čep dosegne protupovratni ventil puca njegova gumena membrana čime se omogućuje protok cementne kaše i odjeljivača kroz prethodni čep i petu zaštitnih cijevi u prstenasti prostor.
e) Nakon što se u kolonu utisne planirani volumen cementne kaše, nahodni čep, koji je punog profila, oslobađa se iz cementacijske glave, potiskuje cementnu kašu i u trenutku kada nasjedne na prethodni čep što se na površini manifestira kao porast tlaka utiskivanja, proces cementacije je završen.

Nakon završetka procesa cementacije i nasjedanja nahodnog na prethodni čep, peta kolone zaštitnih cijevi i zaustavna ploča s protupovratnim ventilom sprječavaju povrat cementne kaše uslijed razlike tlakova u prstenastom prostoru (veći tlak) i koloni (manji tlak). Ventili na glavi zaštitnih cijevi ostaju otvoreni tijekom vremena čekanja na stvrdnjavanje cementne kaše (engl. *waiting-on-cement – WOC*) zbog oslobađanja topline hidratacijom. Kroz zaštitne cijevi dolazi do zagrijavanja isplake i povećanja tlaka, odnosno proširivanja tijela zaštitnih cijevi.

### *4.1.2. Cementacija uvodne kolone zaštitnih cijevi kroz bušaće šipke*

U geotermalnim bušotinama, pri cementaciji kolone zaštitnih cijevi, cementna kaša se protiskuje kroz bušaće šipke ili tubing (engl. *Inner string cementing method*) umjesto kroz kolonu (slika 4-3).




**Slika 4-3.** Shematski prikaz cementacije uvodne kolone zaštitnih cijevi kroz bušaće šipke (Bett, 2017)

Metoda cementacije uvodne kolone kroz bušaće šipke ima sljedeće prednosti (Bett, 2010):

1. Cementna kaša se brže protiskuje u prstenasti prostor nego kod konvencionalnih metoda cementacije čime se smanjuje mogućnost stvrdnjavanja cementne kaše unutar zaštitnih cijevi.
2. Smanjuje se volumen cementnog kamena koji treba izbušiti unutar zaštitnih cijevi velikog promjera.
3. Omogućeno je protiskivanje cementne kaše sve dok se ne dobije povrat cementne kaše na površini.
4. Nisu potrebni cementacijski čepovi velikog promjera.
5. Kraće je vrijeme istiskivanja cementne kaše.
6. Smanjeno je zagađenje cementne kaše isplakom.

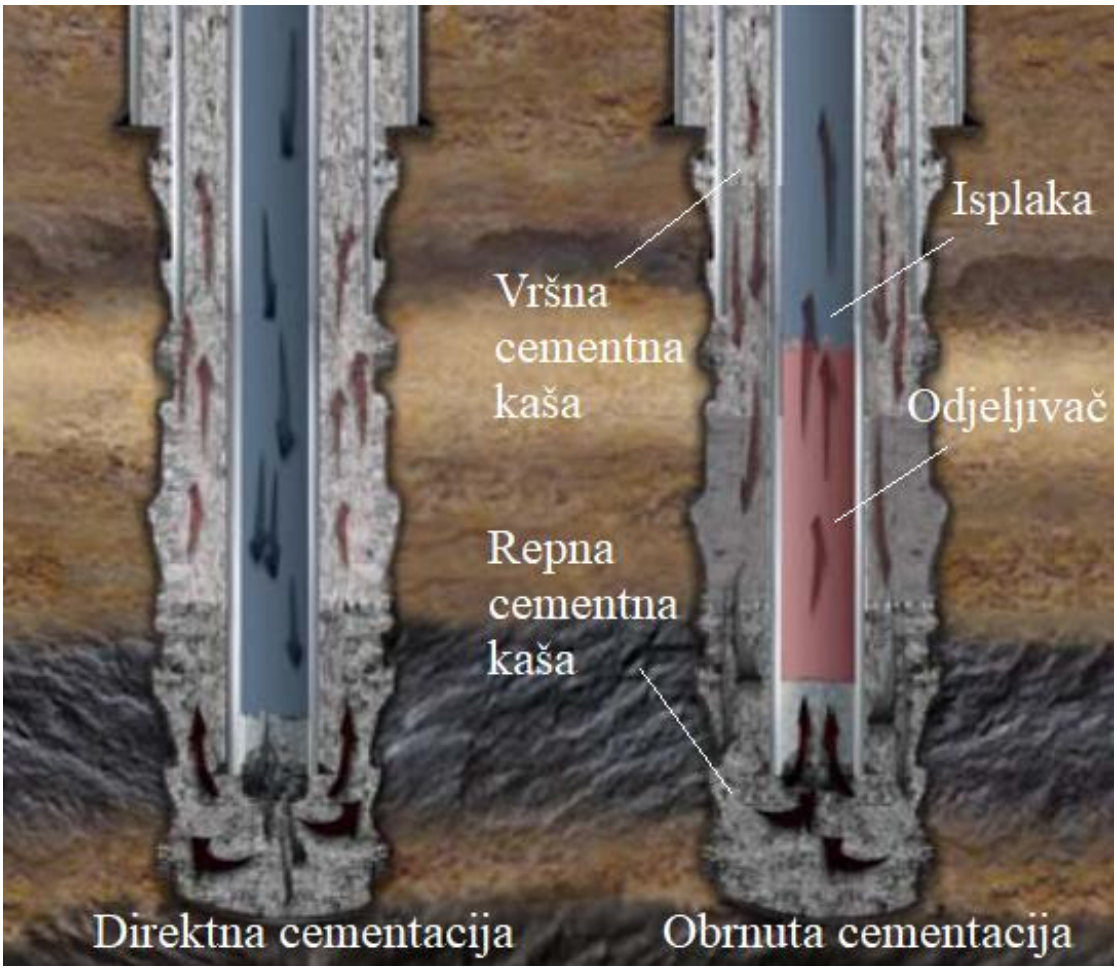
Glavni nedostatak ove metode jest to što se, u slučaju cementacije dugog niza zaštitnih cijevi, troši vrijeme na ugradnju i izvlačenje bušaćih šipki (unutarnjeg niza; engl. *inner string*), a time se povećavaju troškovi izrade kanala bušotine (Bett, 2010).

Cementacija kroz bušaće šipke zahtijeva ugradnju brtvenog rukavca u peti ili zaustavnoj ploči kolone zaštitnih cijevi kako bi se u njega učvrstile (usadile; engl. *stab-in*) bušaće šipke. Nakon što su bušaće šipke učvršćene unutar zaštitnih cijevi potrebno je protisnuti vodu kako bi se uklonile eventualne krhotine prije cementacije. Sljedeći korak je utiskivanje cementne kaše kroz bušaće šipke.

Nakon završetka cementiranja protupovratni ventil sprječava povrat cementne kaše u zaštitne cijevi i zadržava je u prstenastom prostoru tijekom vremena potrebnog za vezivanje.

### *4.1.3. Cementacija obrnutom cirkulacijom*

Metoda obrnute cementacije (engl. *reverse circulation cementing*) koristi se za cementiranje kolone zaštitnih cijevi ugrađenih u bušotinu u kojoj postoje zone u koje se gubi cirkulacija. Ova metoda uključuje utiskivanje cementne kaše kroz prstenasti prostor i istiskivanje isplake kroz zaštitne cijevi, odnosno smjer toka cementne kaše i isplake je suprotan od onog kod klasične primarne cementacije (slika 4-4).




**Slika 4-4.** Shematski prikaz cementacije kolone zaštitnih cijevi direktnom i obrnutom cirkulacijom (Bett, 2017)

Cementacija kolone zaštitnih cijevi obrnutom cirkulacijom koristi se i u slučaju kada se cementna kaša ne može protiskivati turbulentnim tokom bez loma stijena iznad pete zaštitnih cijevi. Prednost ove metode je širi raspon sastava cementne kaše, s obzirom na korištenje oteživača i usporivača. Za popunjavanje gornjeg dijela prstenastog prostora može se koristiti cementna kaša manje gustoće i kraćeg vremena zgušćivanja (vršna cementna kaša), a za donji dio zaštitnih cijevi cementna kaša veće gustoće i duljeg vremena zgušćivanja (repna cementna kaša) (Bett, 2017).

Prednosti cementacije obrnutom cirkulacijom su (Hernandez i Nguyen, 2010):

1. Proces izvođenja cementacije je brži od konvencionalne metode.
2. Kraće vrijeme zgušćivanja cementne kaše.
3. Smanjenje ekvivalentne gustoće u cirkulaciji (engl. *Equivalent Circulating Density - ECD*).
4. Smanjenje potrebnog tlaka za protiskivanje cementne kaše zbog djelovanja gravitacije.
5. Brže povećanje tlačne čvrstoće cementnog kamena.

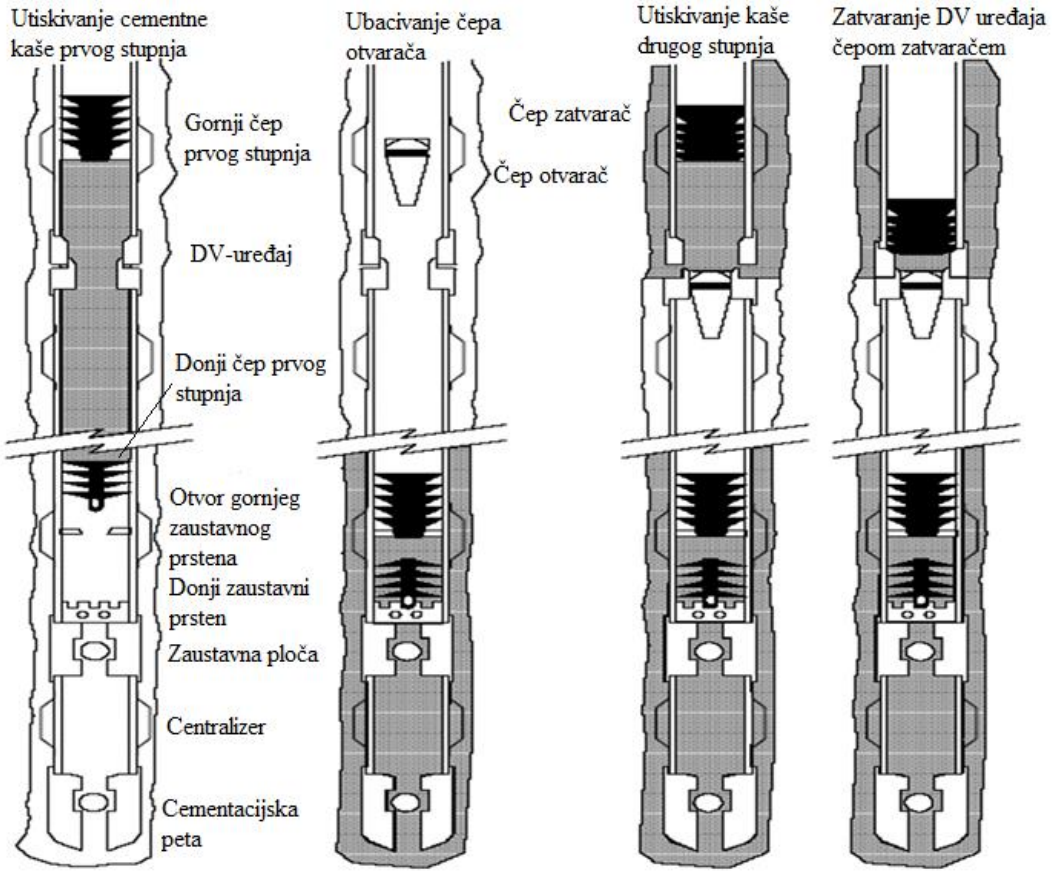
### *4.1.4. Dvostupanjska cementacija*

Cementacija zaštitnih cijevi u dva stupnja ponekad se koristi za cementiranje kolona zaštitnih cijevi u geotermalnim bušotinama, ali se uglavnom izbjegava zbog mogućnosti stvaranja vodenih džepova (engl. *water pockets*) unutar cementnog obloga (Bett, 2010). U geotermalnim bušotinama, ona se uglavnom koristi u kombinaciji s kolonom koja se sastoji od lajnera (donji dio) koji se naknadno, dodavanjem zaštitni cijevi, poveže s površinom (engl. *tieback casing*) kako bi se smanjio rizik od pojave kolapsa kolone zaštitnih cijevi uzrokovanih džepovima vode (Bett, 2010). Dvostupanjska cementacija može se koristi za cementaciju dugog niza zaštitnih cijevi posebno ako duž kanala bušotine postoje formacije smanjene čvrstoće koje ne mogu izdržati hidrostatski tlak dugog stupca cementne kaše. Dvostupanjska cementacija koristi se kako bi se smanjio hidrostatski tlak zbog velike gustoće cementne kaše i granica pucanja zaštitnih cijevi te zbog potrebe za cementiranjem udaljenih intervala bušotine uz ostavljanje necementiranog međuprostora.

Proces cementiranja zaštitnih cijevi u dva stupnja dijeli se na (Gaurina-Međimurec, 2017):

1. kontinuirano dvostupanjsko cementiranje (oba stupnja izvode se jednom neprekinutom operacijom) i
2. normalno dvostupanjsko cementiranje (cementiranje svakog stupnja je posebna operacija).

Proces cementacije u dva stupnja prikazan je na slici 4-5.



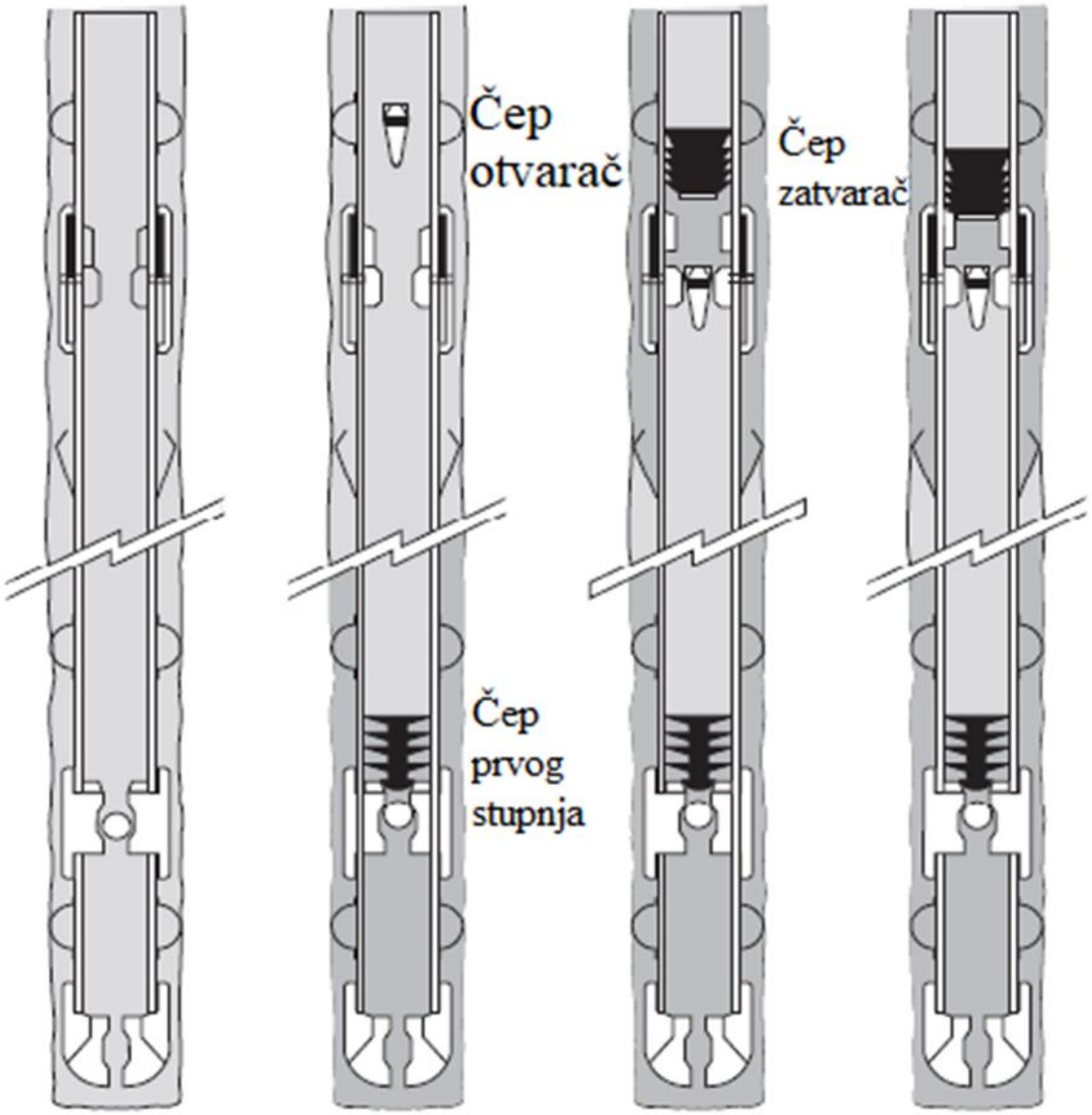

**Slika 4-5.** Shematski prikaz dvostupanjske cementacije (Gaurina-Međimurec, 2017)

Prvi stupanj sastoji se od puštanja donjeg čepa (engl. *First stage By-pass Plug*) prvog stupnja niz zaštitne cijevi koji prolazi kroz DV-uređaj (engl. *Stage Collar*) i otvor gornjeg zaustavnog prstena (engl. *Shut-off Baffle*). Donji čep zaustavlja se na donjem zaustavnom prstenu (engl. *By-pass Baffle*) koji se nalazi iznad zastavne ploče (engl. *Float Collar*) i uzrokuje povećanje tlaka. Nakon što se protisne cjelokupan volumen cementne kaše prvog stupnja u kolonu zaštitnih cijevi pušta se gornji čep prvog stupnja (engl. *Shut-off plug*) i protiskuje isplakom. Završetak cementacije prvog stupnja vidljiv je prema porastu tlaka nakon nasjedanja gornjeg čepa na gornji zaustavni prsten.

Drugi stupanj započinje otvaranjem cementacijske glave i postavljanjem čepa otvarača (engl. *Opening bomb*) i čepa zatvarača (engl. *Closing plug*) DV-uređaja. Čep otvarač slobodnim padom prolazi kroz zaštitne cijevi i zatvarajući rukavac DV-uređaja te nasjeda na sjedište na

otvarajućem rukavcu. Povećanjem tlaka lome se vijci, a čep otvarač potiskuje otvarajući rukavac u donji položaj čime se oslobađaju otvori u stijenkama DV-uređaja i omogućuje cirkulacija fluida. Cilj protiskivanja isplake je pročišćavanje zaštitnih cijevi za cementnu kašu. Nakon isplake utiskuje se odjeljivač, a zatim cementna kaša i čep zatvarač koji je potisnut isplakom do zatvarajućeg rukavca. Zbog povećanja tlaka lome se vijci držači, a zatvarajući rukavac pada u donji položaj i zatvara otvore na DV-uređaju čime je dvostupanjska cementacija završena.

Dvostupanjsku cementaciju moguće je izvesti i korištenjem samo jednog čepa za protiskivanje cementne kaše prvog stupnja kao što je prikazano na slici 4-6. Za sprječavanje miješanja cementne kaše s isplakom obvezno je korištenje odjeljivača.




**Slika 4-6.** Shematski prikaz dvostupanjske cementacije s jednim čepom za protiskivanje kaše prvog stupnja (Bett, 2017)

# 5. HPHT BUŠOTINE

Naftna i plinska industrija godinama se suočava s izvođenjem radova u uvjetima visokih temperatura i tlakova koji vladaju u bušotini. Međutim, ne postoje univerzalni standardi za cijelu industriju koji definiraju uvjete visokog tlaka i temperature, kao ni njihov međusoban odnos.

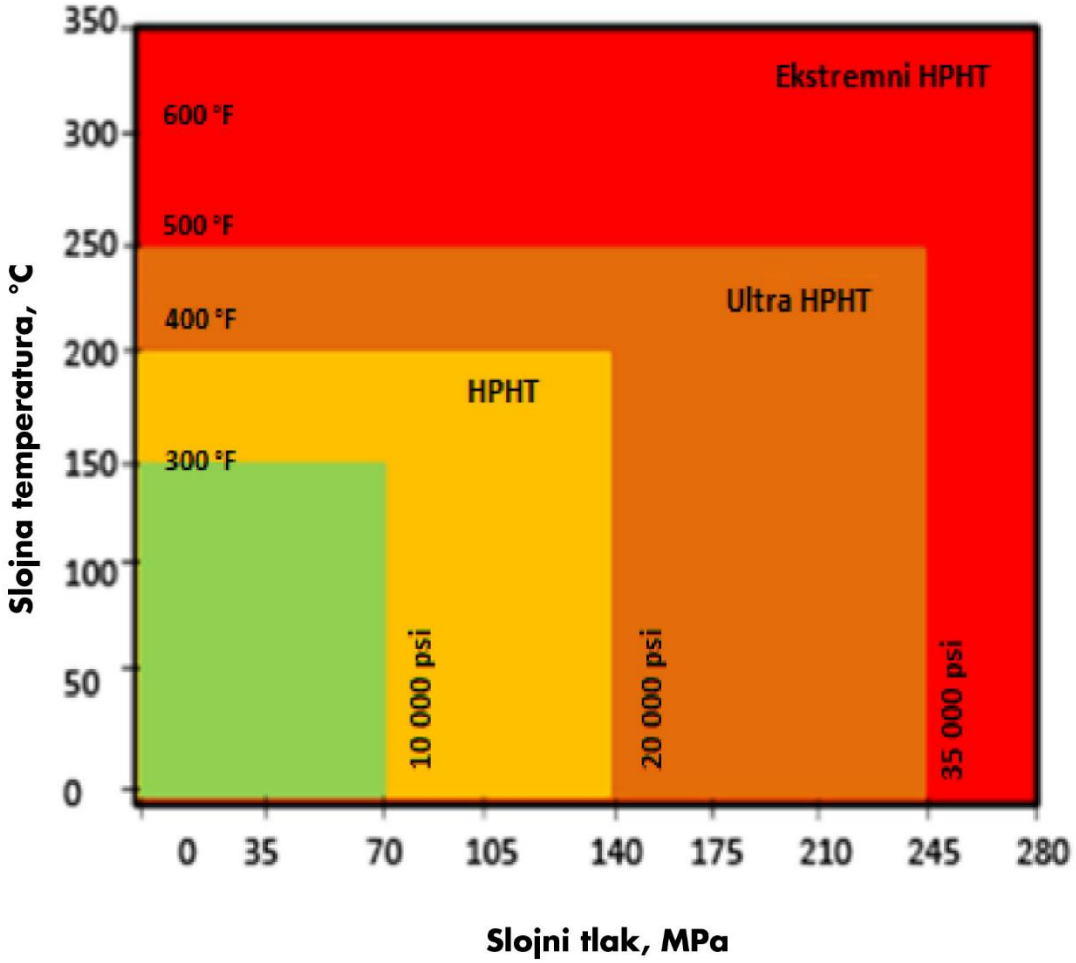
Bušotine visokog tlaka i temperature, HPHT bušotine (*engl. High Pressure, High Temperature)*, obično su pozicionirane u odobalnim područjima što je direktno povezano s povećanjem troškova (Radwan i Karimi, 2011). Prema Radwan i Karimi (2011) najam postrojenja iznosi 70% ukupnih troškova izrade bušotine na moru. Korištenje odgovarajućeg cementa i aditiva za pripremu cementne kaše koja je namijenjena za cementiranje kolone zaštitnih cijevi u uvjetima visoke temperature i visokog tlaka osigurava uspješnu primarnu cementaciju i postojanost cementnog kamena kroz radni vijek bušotine.

Nastojeći pojasniti različite tipove bušotina visokog tlaka i temperature kompanija Schlumberger je podijelila HPHT bušotine u tri skupine (Belani i Orr, 2008).

## 5.1. Klasifikacija HPHT bušotina

1. *HPHT bušotine* karakteriziraju ležišni tlakovi u rasponu od 690 bar do 1379 bar i/ili temperature u ležištu između 149 °C i 205 °C.
2. *Ultra HPHT bušotine* karakteriziraju ležišni tlakovi u rasponu od 1 379 bar do 2 068 bar i/ili temperature u ležištu između 205 °C i 260 °C.
3. *Ekstremne HPHT bušotine* karakteriziraju ležišni tlakovi između 2 068 bar i 2 758 bar i/ili temperature u ležištu između 260 °C i 316 °C.

Na slici 5-1. prikazana je Schlumberger-ova klasifikacija HPHT bušotina prema tlaku i temperaturi (Shadravan i Amani, 2012).




**Slika 5-1.** Klasifikacija HPHT bušotina (Shadravan i Amani, 2012)

## 5.2. Dizajn cementne kaše za HPHT uvjete u bušotini

HPHT bušotine zahtijevaju posebnu pozornost prilikom dizajna cementne kaše, modificirane postupke ispitivanja i posebne aditive. Kako bi se dizajnirala cementna kaša odgovarajućih svojstava potrebno je prikupiti osnovne parametre bušotine, kao što su dubina, otklon kanala bušotine, promjer bušotine i problemi tijekom bušenja (Frittella i dr., 2009).

Prilikom dizajna cementne kaše potrebno je (Haidher et al., 2006):

1. predvidjeti temperaturu na dnu bušotine tijekom cirkulacije – BHCT (engl. *Bottomhole Circulating Temperature*),
2. predvidjeti vrijeme potrebno za izvođenje cementacije,
3. ispitati osjetljivost usporivača na temperaturu iznad 177 °C (ako usporivač slabo reagira, cement se ne može koristiti),
4. ispitati tendenciju taloženja pri visokim temperaturama.

Cement korišten u naftnoj i plinskoj industriji definiran je Specifikacijom za materijale i ispitivanje bušotinskih cementa (API Specifikacija 10A). API specifikacija koristi se u naftnoj industriji, ali ne sadrži u potpunosti standarde za HPHT bušotine. Kvaliteta bušotinskog cementa ovisi o sirovinama i njihovom procesu proizvodnje. Cementna kaša za cementaciju pri visokoj temperaturi uglavnom se bazira na API cementima klase G ili H. Obični cementi, koji nisu posebno dizajnirani i proizvedeni za primjenu na visokim temperaturama ponašaju se vrlo nestabilno pri temperaturi 177 °C i više (Haidher et al, 2006). Zbog toga se za pripremu HPHT cementne kaše koristi cement API klase G kojem se dodaje 40% kvarcnog pijeska jer se time sprječava opadanje tlačne čvrstoće cementnog kamena (Frittella et al., 2009).

Ako je temperatura tijekom ispitivanja viša od 177 °C cementna kaša na bazi običnog cementa se vrlo brzo stvrdne bez obzira na količinu usporivača. Osim navedenog, korištenje običnog cementa pri višim temperaturama utječe na reološka svojstva i filtraciju cementne kaše.

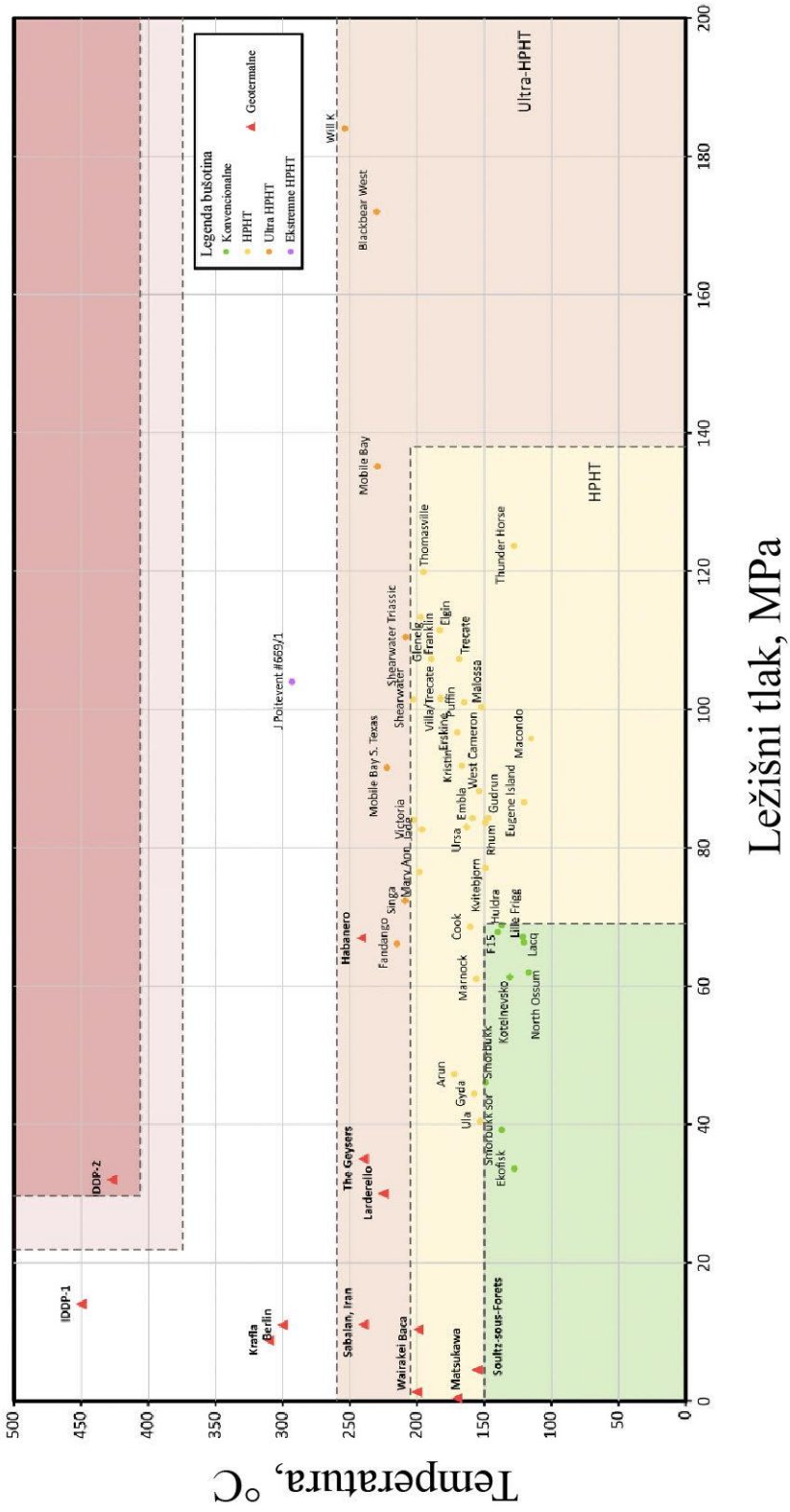
Za primjenu Portland cementa pri ultra visokim temperaturama od izrazite je važnosti izbor veličine čestica. Veličina čestica cementa trebala bi biti jednolika uz varijaciju od ±10%. Jednolika raspodjela veličine čestica cementa utječe na stabilnost cementne kaše pri ultra visokim temperaturama.

Primjenom dostupnih modificiranih konvencionalnih cemenata poboljšava se dugoročni integritet cementnog kamena u HPHT bušotinama. Primjeri modificiranih konvencionalnih cemenata su: neskupljajući cementi, pjenocementi, tiksotropni cementi, ekspanzivni cementi te mješavina Pucolana i Portland cementa, tzv. POZMIX cement (Haidher et al., 2006). Karakteristika takvih sustava je u tome što nisu bazirani na Portland cementu i njihova upotreba ovisi o uvjetima koji vladaju u bušotini. Specifičnost cementnog kamena, nastalog očvršćivanjem cementne kaše na bazi modificiranih konvencionalnih cemenata, je razvijanje tlačne čvrstoće za suprotstavljanje vlačnim naprezanjima.

# 6. HPHT I GEOTERMALNE BUŠOTINE

Brojni problemi povezani s integritetom kanala bušotine susreću se u HPHT naftnim i plinskim bušotinama i u geotermalnim bušotinama. Međutim, neki od njih su karakteristični samo za geotermalne bušotine. Iako postoji značajan napredak u rješavanju problema integriteta kanala, značajan tehnološki jaz i dalje postoji u konstrukciji i eksploataciji HPHT i geotermalnih bušotina.

Postoje razlike između geotermalnih i HPHT bušotina. Geotermalne bušotine imaju vrlo širok raspon temperatura u ležištu, između 120 °C i 150 °C. Međutim, karakteristika suhih stijena (engl. *hot dry rocks – HDR*) je raspon temperature između 200 °C i 350 °C, dok stijene magmatskog podrijetla mogu imati vrijednosti temperature od 600 °C do 1400 °C (Finger i Blankenship, 2010). Za razliku od naftnih i plinskih bušotina, u geotermalnim bušotinama nije visoki tlak ležišta, ali su visoke temperature. Na slici 6-1, a s obzirom na tlak i temperaturu na njihovu dnu, prikazane su neke izbušene naftne i/ili plinske bušotine i to klasične, HPHT, Ultra HPHT i Ekstremne HPHT bušotine te, radi usporedbe, geotermalne bušotine. Geotermalne bušotine nalaze se u temperaturnom rasponu između 150 °C i 450 °C. Prema Castilla (2017) geotermalne bušotine dosežu maksimalan ležišni tlak od 70 bar.



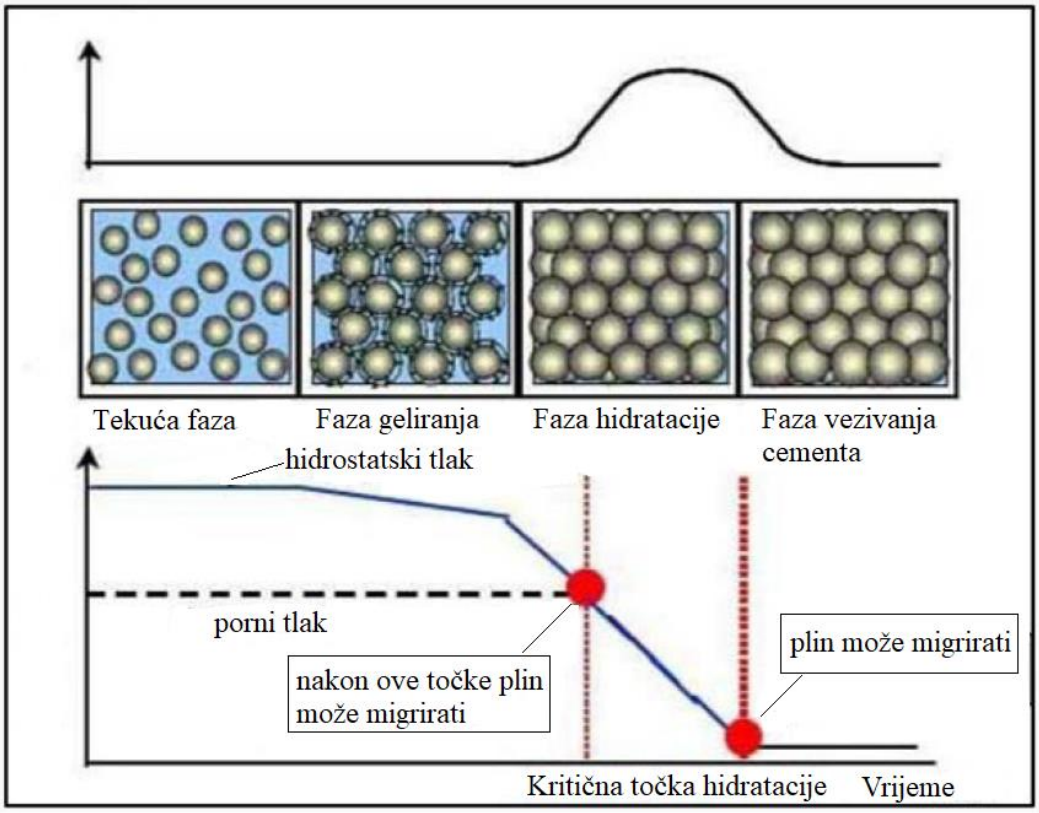

**Slika 6-1.** Dijagram ležišnog tlaka i temperature za konvencionalne i HPHT naftne i plinske te geotermalne bušotine (Castilla, 2017)

Konvencionalne metode bušenja, opremanja i cementacije bušotina neće pružiti sigurnost i dugovječnost geotermalnih i HPHT bušotina. Američki naftni institut (engl. *American Petroleum Institute - API*) objavio je 2015. godine Tehničko izvješće (API17TR8) s detaljnim smjernicama za projektiranje HPHT bušotina. Međutim, navedeno izvješće obuhvaća samo bušotine s temperaturom do 288 °C, ali ne i više temperature (Castilla, 2017).

## 6.1. Izazovi cementacije HPHT i geotermalnih bušotina

Proces cementacije geotermalnih i HPHT bušotina predstavlja brojne izazove. Nakon cementacije naftnih bušotina javlja se plastična deformacija cementnog kamena (engl. *plastic deformation*), radijalno pucanje (engl. *radial cracking*) i odvajanje (engl. *debonding*) (Ugwu, 2009). Odvajanje se odvija između formacije i cementnog kamena ili cementnog kamena i zaštitnih cijevi.

Tijekom cementiranja klasičnih, HPHT i geotermalnih bušotina može doći do migracija plina (primarne i/ili sekundarne). Pojava migracije plina je izraženija u HPHT i geotermalnim bušotinama. Primarna migracija plina odvija se kroz stupac cementne kaše u prstenastom prostoru tijekom prijelaznog perioda kada uslijed reakcija hidratacije cementna kaša prelazi u cementni kamen prije nego on postigne dovoljnu čvrstoću što je praćeno smanjenjem hidrostatičkog tlaka (Al Ramadan, 2019). Plin iz sloja ne može migrirati u stupac cementne kaše sve dok on ostvaruje tlak u prstenastom prostoru veći od slojnog (pornog) tlaka (slika 6-2). Nakon smanjenja tlaka u prstenastom prostoru ispod vrijednosti slojnog tlaka stvaraju se uvjeti za dotok plina iz sloja i njegovu migraciju kroz stupac cementne kaše prema površini.




**Slika 6-2.** Različite faze u vezivanju cementne kaše (Pour i Monghadasi, 2007)

Razlog tome jest hidratacija cementa koja uzrokuje značajno smanjenje volumena zbog prisutnosti vode u formaciji i ekstremno visokih tlakova. Povećanje tangencijalnog vlačnog naprezanja dovodi do pucanja ili odvajanja cementnog kamena (Pour i Monghadasi, 2007).

Za razliku od geotermalnih bušotina u HPHT bušotinama velika je vjerojatnost za migraciju plina kroz cementnu kašu. Ekstremne temperature uzrokuju preranu hidrataciju i potiču brže geliranje cementne kaše. Kao posljedica javlja se smanjenje hidrostatičkog tlaka u prstenastom prostoru jer cementna kaša u stanju gela ne može u potpunosti prenijeti tlak. Stoga, visoka temperatura HPHT bušotina povećava udio migriranog plina u cementnoj kaši (Pour and Monghadasi, 2007).

Sekundarna migracija plina javlja se nakon očvršćavanja cementne kaše u cementni kamen. Do migracije plina u HPHT i geotermalnim bušotinama dolazi zbog problema s integritetom kanala bušotine. Statistički gledano, veća je vjerojatnost pucanja cementnog kamena u geotermalnim bušotinama, nego u HPHT bušotinama. Ključna razlika je u tome što se temperatura ležišta HPHT bušotine ne narušava kao temperatura geotermalne bušotine. Razlog

tomu jest drastično mijenjanje temperature, primjerice od 316 °C do 27 °C uslijed utiskivanja cementne kaše (Maldonado et al, 2006).

Uslijed djelovanja visoke temperature dolazi do širenja zaštitnih cijevi. Nakon utiskivanja vode zaštitne cijevi mijenjaju svoj oblik i formiraju prvobitno stanje (Bello, 2014). Takve naizmjenične faze hlađenja i zagrijavanja, odnosno širenja i skupljanja, omogućuju migraciju plina zbog nastanka mikro kanalića (engl. *micro annulus*) između zaštitnih cijevi i cementnog kamena.

Ekscentričnost zaštitnih cijevi pripisuje se kao uzrok loše cementacije. Razlog ekscentričnosti zaštitnih cijevi jest otklon kanala bušotine. Međutim, i u HPHT bušotinama s malom ekscentričnosti zaštitnih cijevi naprezanja cementnog kamena su povećana zbog otklona kanala bušotine. Kako bi se spriječila velika ekscentričnost, omjer odstupanja treba održavati iznad 67% postavljanjem centralizatora duž kolone zaštitnih cijev (ISO 10427-2 2004). Preporuka je da se sve kolone zaštitnih cijevi koje se ugrađuju u geotermalnu bušotinu cementiraju od dna do površine kako bi se spriječilo povećanje tlaka u prstenastom prostoru (Calvert i Smith, 1990).

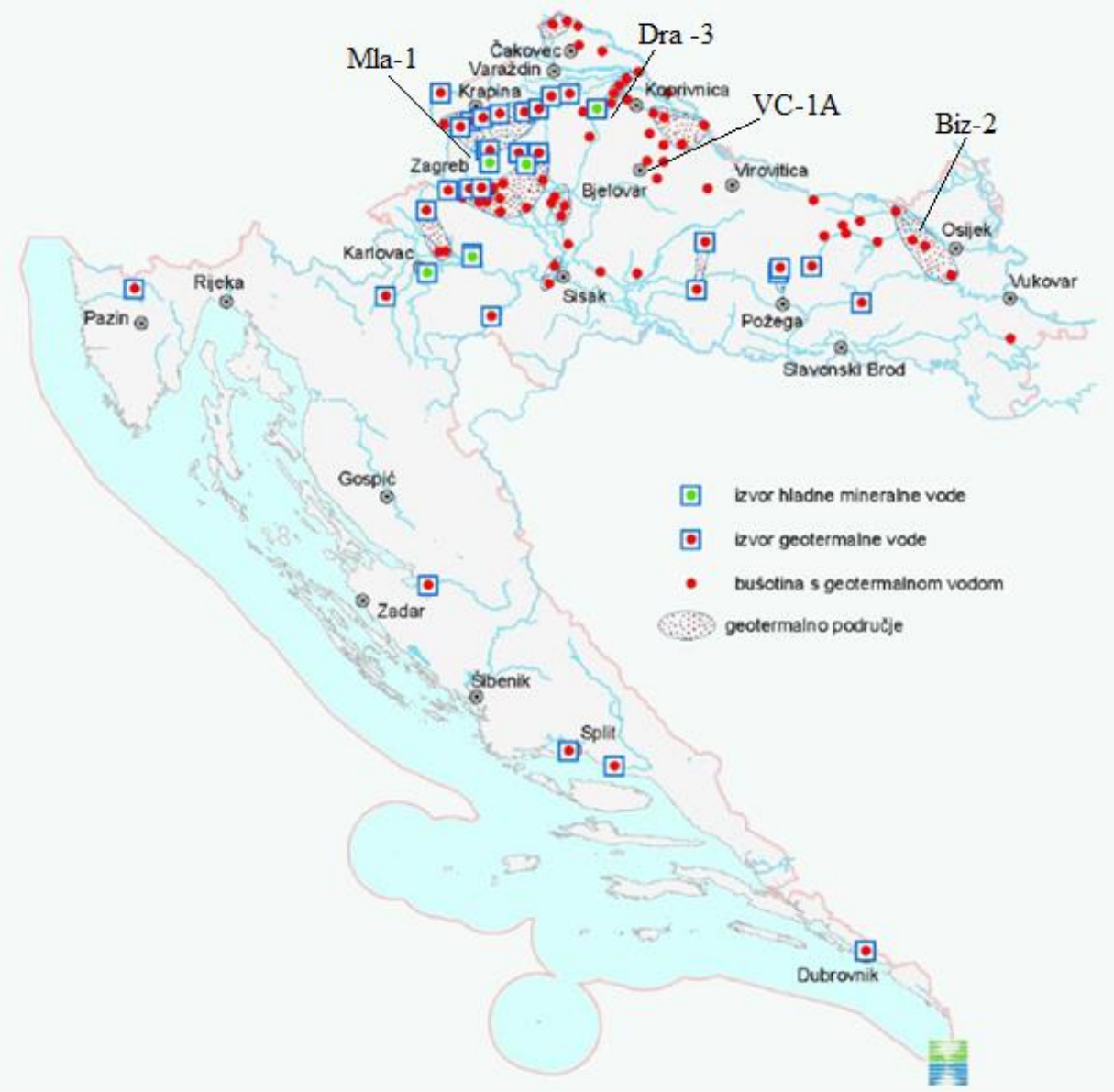
Yuan (2012) istraživao je naprezanja u bušotinama koje imaju 0% ekscentričnosti zaštitnih cijevi s različitim otklonima kanala bušotine i gustoćom isplake. Prema provedenom istraživanju posmično, radijalno i vlačno naprezanje cementne kaše postiže maksimalne vrijednosti kada je kut otklona kanala bušotine između 40 ° i 50 °.

Geotermalne i HPHT bušotine obično se nalaze u kiselom okruženju s visokom koncentracijom sumporovodika ($H_2S$) i/ili ugljičnog dioksida ($CO_2$). Ugljikovodici reagiraju s kiselinama koje nastaju otapanjem $H_2S$ i/ili $CO_2$, oslobađa se $Ca_2^+$, a razina pH vrijednosti opada. Kao posljedica reakcije s kiselinama struktura cementnog kamena postaje porozna i opada mu čvrstoća. Osim toga, sumporovodik ($H_2S$) reagira s $Fe(OH)_3$ stvarajući pirit koji uzrokuje nastanak mikropukotina. Stvaranjem mikropukotina unutar cementnog kamena dolazi do smanjenja njegove mehaničke čvrstoće.

# 7. PRIMJERI IZ PRAKSE

## 7.1. Područje Republike Hrvatske

U Republici Hrvatskoj postoji višegodišnja tradicija iskorištavanja geotermalne vode. Počeci razvoja energetskih geotermalnih projekata u Hrvatskoj datiraju još iz prošlog stoljeća, a bili su vezani uz aktivnosti INA d.d. na istraživanju korištenja geotermalnih ležišta. Geotermalna nalazišta koncentrirana su u sjeverozapadnom i središnjem dijelu Republike Hrvatske, a nekoliko ih se nalazi i uz obalu Jadranskog mora (slika 7-1).




**Slika 7-1.** Poznata geotermalna nalazišta u Republici Hrvatskoj (http://zakon.poslovna.hr/public/strategija-upravljanja-vodama/456570/zakoni.aspx)

Geotermalna energija koristi se u osamnaest toplica i rekreacijskih centara za kupanje te za različite vrste medicinskih terapija. Uz upotrebu vode u tamošnjim bazenima nekoliko je lokacija na kojima se termalna voda također koristi za individualno grijanje prostora i staklenika (tablica 7-1) (Hrgalek et al., 2017).

**Tablica 7-1.** Iskorištavanje termalnih voda u Republici Hrvatskoj (http://www.eihp.hr/)

| ISKORIŠT-AVANJE | LOKACIJA | ISKORIŠT-AVANJE | LOKACIJA |
|---|---|---|---|
| Balneološke svrhe | Bizovac<br>Daruvar<br>Naftalan<br>Terme Jezerčica<br>Krapinske Toplice<br>Lešće<br>Lipik<br>Istarske Toplice<br>Stubičke Toplice<br>Sv. Martin<br>Topusko<br>Tuhelj<br>Varaždinske Toplice<br>Velika<br>Sutinske Toplice<br>Sveta Jana<br>Samobor – Šmidhen<br>Zelina | Staklenici | Sv. Nedjelja<br>Bošnjaci<br>Krapinske Toplice |
| | | Individualno grijanje prostora | Zagreb – Mladost<br>Zagreb – Lučko<br>Bizovac<br>Krapinske Toplice Lipik<br>Stubičke Toplice<br>Topusko<br>Varaždinske Toplice |

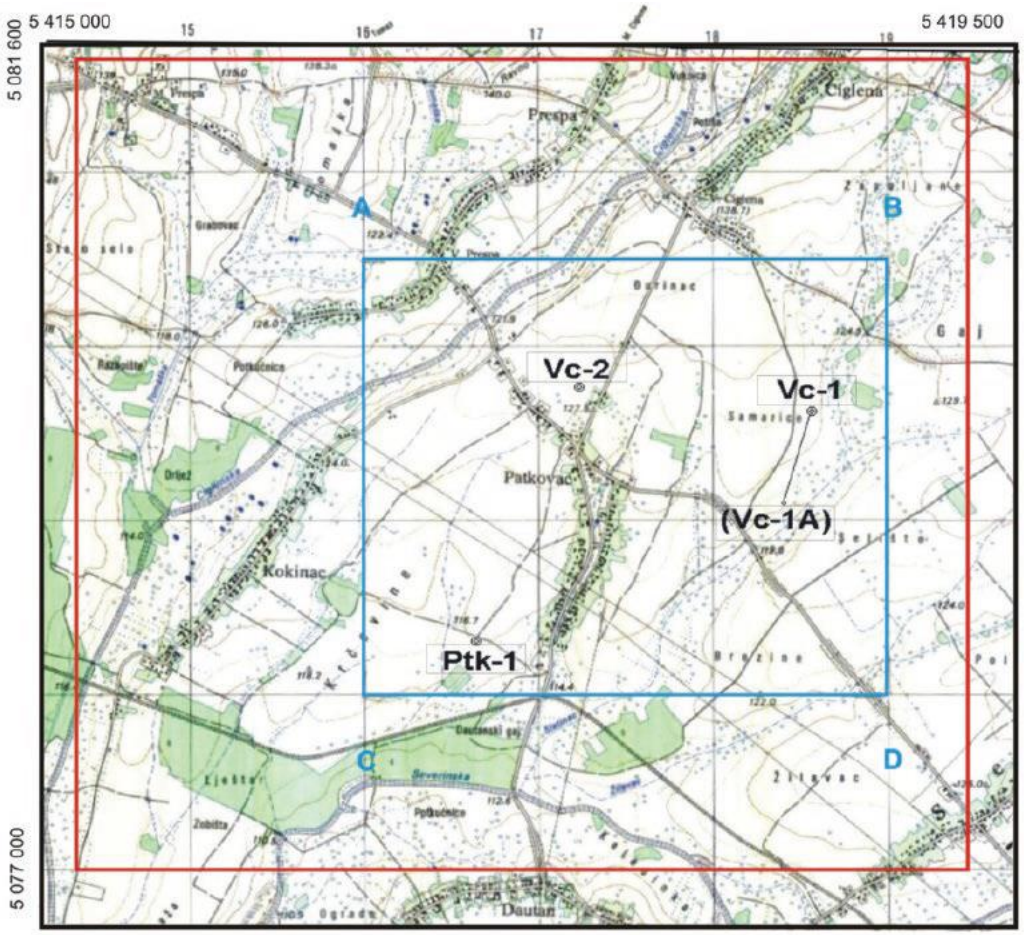
Od navedenih lokacija samo četiri imaju Rješenje o utvrđivanju ekspolatacijskog polja geotermalne vode - Zagreb, Bizovac, Velika Ciglena i Draškovec (Elezović et al, 2018). Tablica 7-2 prikazuje podjelu geotermalnih ležišta s obzirom na temperaturu i fluid u ležištu.

**Tablica 7-2.** Podjela geotermalnih ležišta (http://www.eihp.hr/)

| TEMPERATURA LEŽIŠTA | FLUID U LEŽIŠTU | PRIMJENA | PRIMJER |
|---|---|---|---|
| > 180 °C<br>visoko temperaturna ležišta | para ili voda | proizvodnja električne energije | Berlin<br>Svartseogi |
| 100-180 °C<br>srednje temperaturna ležišta | voda | proizvodnja električne energije - izravno korištenje | Velika Ciglena<br>Draškovec |
| < 100 °C<br>nisko temperaturna lžišta | voda | izravno korištenje | Zagreb<br>Bizovac |

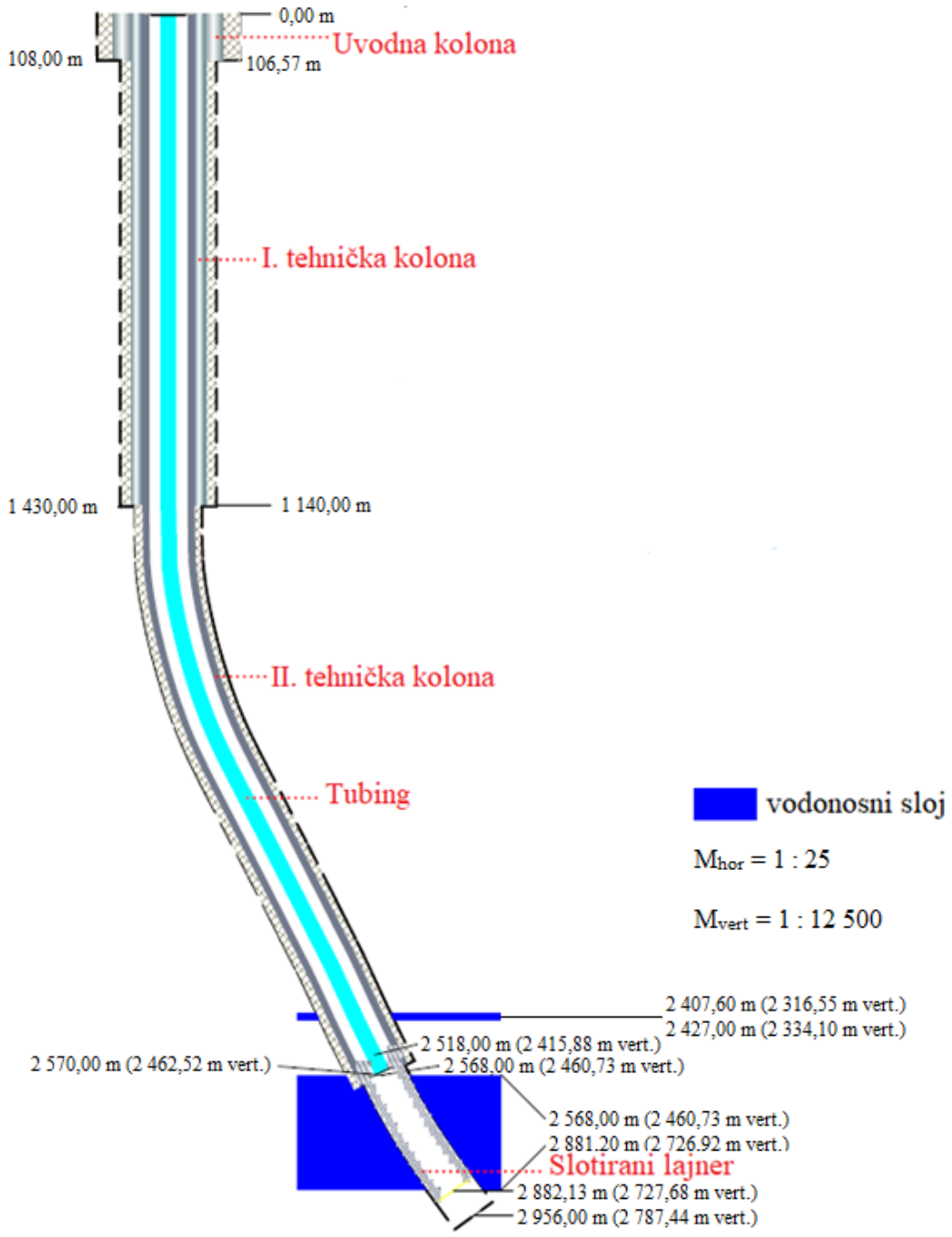
### *7.1.1. Geotermalno ležište Velika Ciglena*

Velika Ciglena je prva hrvatska geotermalna elektrana u Bjelovarskoj depresiji Panonskog sedimentnog bazena. Geotermalno ležište otkriveno je 1980. godine u istraživanju potencijalnih nalazišta ugljikovodika za potrebe INA-Naftaplin. Velika Ciglena je najpovoljnije geotermalno ležište, gledajući s energetskog aspekta, i čine ga četiri bušotine VC-1, VC-1A, VC-2 i Ptk-1 (slika 7-2).




**Slika 7-2.** Geotermalno polje Velika Ciglena (Elezović et al., 2018)

Svrha bušotine VC-1 bilo je istraživanje ugljikovodika, međutim izmjerena ležišna temperatura od 177,6 °C na dubini 3400 m ukazivala je na geotermalni potencijal. Temperatura izmjerena na dubini 2543 m, vršnog dijela ležišta bušotine VC-1A iznosila je 174,6 °C. Dodatnim ispitivanjima iz 2016. godine utvrđena je zadovoljavajuća hidrodinamička povezanost bušotina Ptk-1 i VC-1, visoka injektivnost bušotina VC-2 i Ptk-1 te visoka proizvodnost bušotina VC-1 i VC-1A. Nakon obavljenih ispitivanja, odlučeno je da će bušotine VC-1 i VC-1A biti proizvodne, a bušotine VC-2 i Ptk-1 utisne. Međusobna udaljenost proizvodnih i utisnih bušotine je dovoljna (2 do 3 km) i omogućuje ponovno zagrijavanje utisnute vode i održavanje tlaka unutar bušotine (Pavlak, 2020).




**Slika 7-3.** Konstrukcija bušotine Velika Ciglena-1A (Elezović et al., 2018)

Cementacija kolone zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm (9 5/8”) obavljena je u dva stupnja do visine DV uređaja na 1000 m. Dio zaštitnih cijevi 9 5/8“ ostavljen je necementiran da se omogući preuzimanje termičkih naprezanja u klinovima bušotinske glave.

Za dizajn cementne kaše korišten je cement API klase G. Kako bi se postigla željena čvrstoća cementnog kamena za geotermalne bušotine, u cementnu kašu je, osim ostalih aditiva, dodano

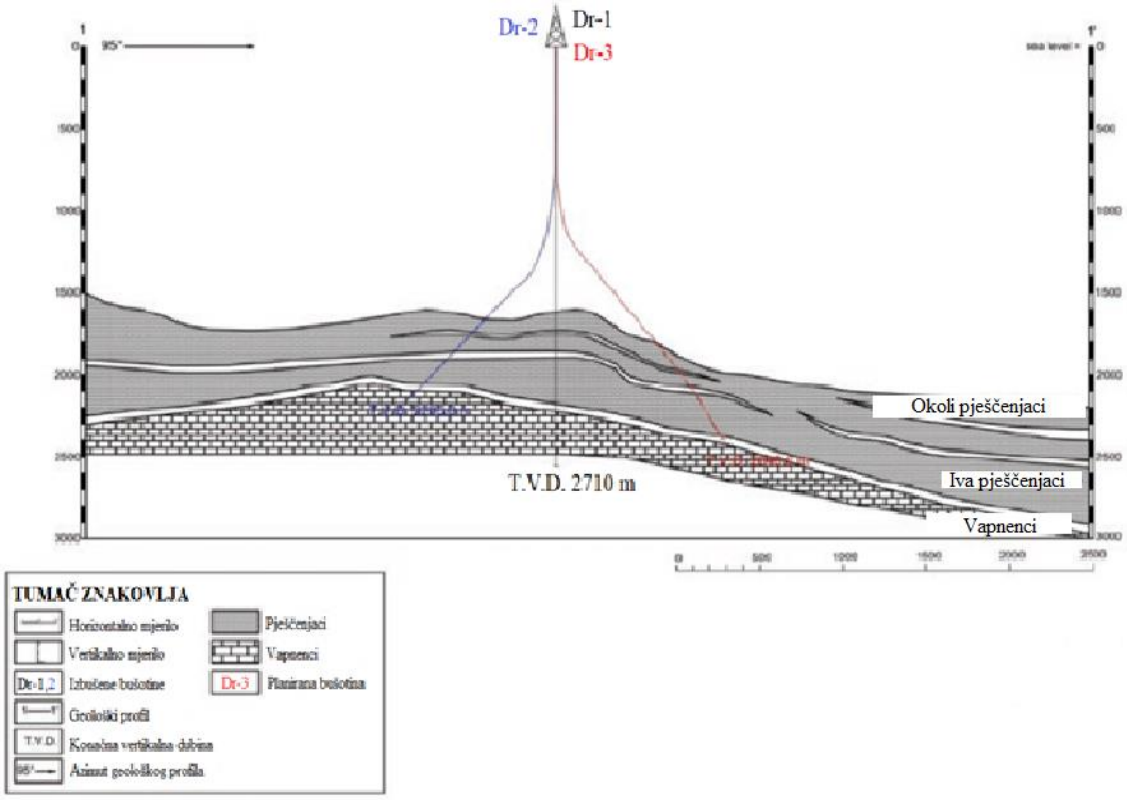
i kvarcno brašno radi povećanja čvrstoće cementnog kamena na visokim temperaturama. U tablici 7-3 prikazani su podaci o cementaciji zaštitnih cijevi bušotine Velika Ciglena 1A.

**Tablica 7-3.** Cementacija niza zaštitnih cijevi bušotine Velika Ciglena 1A (Gaurina-Međimurec et al., 1994)

| **Promjer kolone** | **Metoda** | **Gustoća cementne kaše, kg/m$^3$** | **Broj stupnjeva** | **Aditiv** |
|---|---|---|---|---|
| 473,1 mm (18 5/8”) | Kroz bušaće šipke | 1920 | 1 | $CaCl_2$, kvarcno brašno |
| 339,7 mm (13 3/8”) | Jednostupanjska | 1820 | 1 | Kvarcno brašno, smanjivač filtracije, NaCl, dispergator, antipjenušavac |
| 244,5 mm (9 5/8”) | Dvostupanjska | 1. stupanj-1860<br>2. stupanj-1890 | 2 | Kvarcno brašno, smanjivač filtracije, NaCl, dispergator, antipjenušavac, usporivač |
| 177,8 mm ( 7 ”) | Jednostupanjska | | 1 | Kvarcno brašno, smanjivač filtracije, dispergator, antipjenušavac |

*7.1.2. Eksploatacijsko polje geotermalne vode Draškovec*

Geotermalno polje Draškovec nalazi se u sjevernom dijelu Republike Hrvatske i sadrži dvije bušotine - Draškovec-1 (utisna bušotina) i Draškovec-2 (eksploatacijska bušotina). U planu je izrada sedam novih bušotina (Dr-3 do Dr-9) koje bi činile parove eksploatacijskih – utisnih bušotina. Na slici 7-4 prikazan je uzdužni geološki profil geotermalnog polja Draškovec.

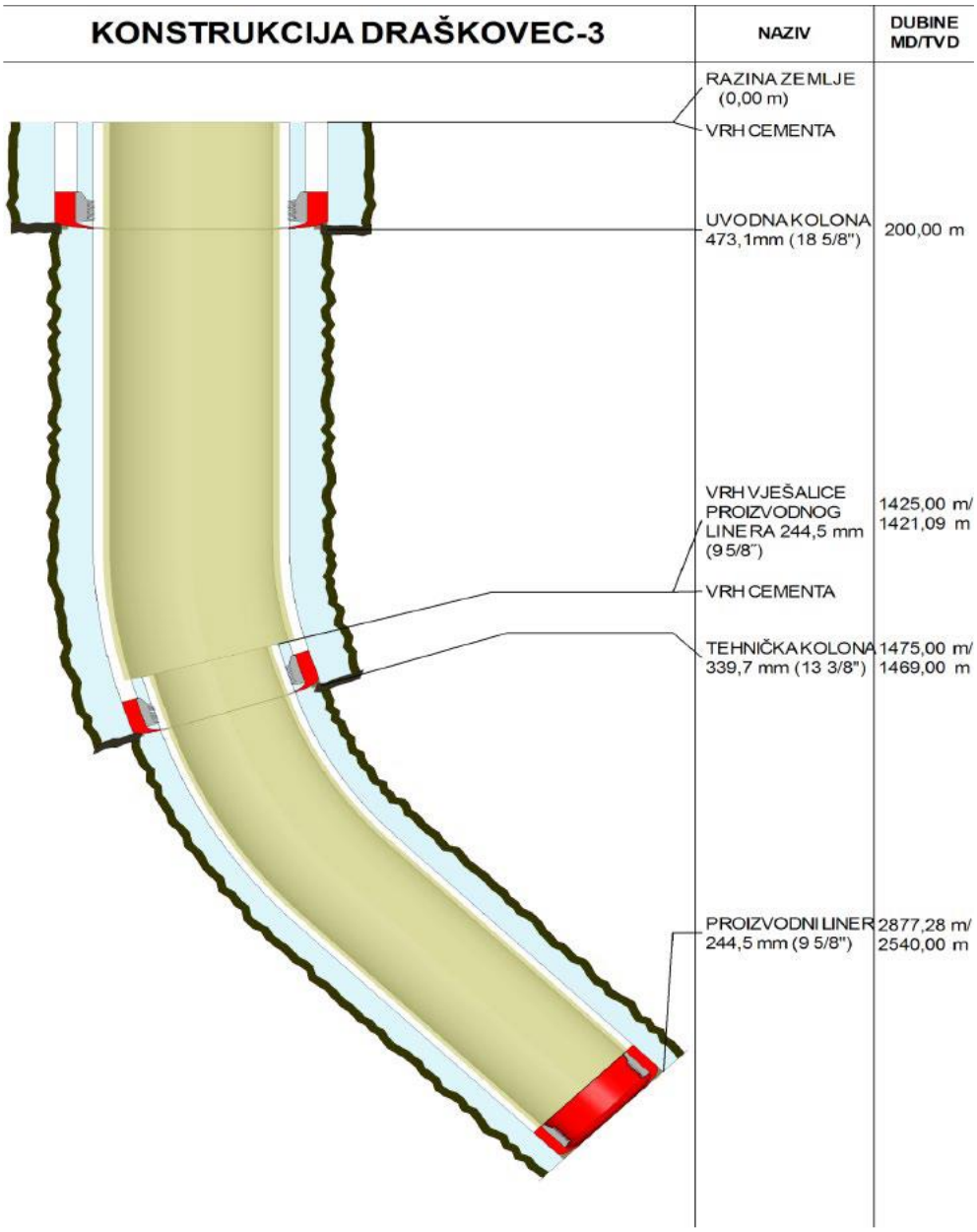



**Slika 7-4.** Uzdužni geološki profil (Elezović et al., 2018)

Bušotina Draškovec-2 2016. godine potvrdila je geotermalno polje Draškovec. Testiranjem bušotine Dr-2 otkriveno je da se geotermalna voda ubraja u kategoriju srednje toplih s otopljenim plinom zbog pronalaska određenog udjela $CO_2$ i $CH_4$. Ležišna temperatura bušotine Dr-2 iznosi 105 °C (TVD – 1958 m), a u krovini 110,1 °C (TVD – 2130,5 m) (Elezović et al., 2018).

Iz tog razloga, u tijeku je razvoj napredne geotermalne elektrane s internalizacijom ugljikovih spojeva. Taj projekt koristit će toplinu geotermalne vode, ali i plinove otopljene u geotermalnoj vodi za proizvodnju električne energije (Škrlec et al., 2019). S obzirom na to da se radi o geotermalnoj bušotini s otopljenim plinom potrebno je obratiti pozornost na kakvoću plina

zbog odabira materijala za niz zaštitnih i proizvodnih cijevi, erupcijski uređaj i bušotinsku glavu, ali i za odabir adekvatnih aditiva za cemente otporne na koroziju. Zacjevljenje proizvodnih bušotina prikazano je na slici 7-5.




**Slika 7-5.** Konstrukcija bušotine Draškovec-3 (Hrgalek et al., 2017)

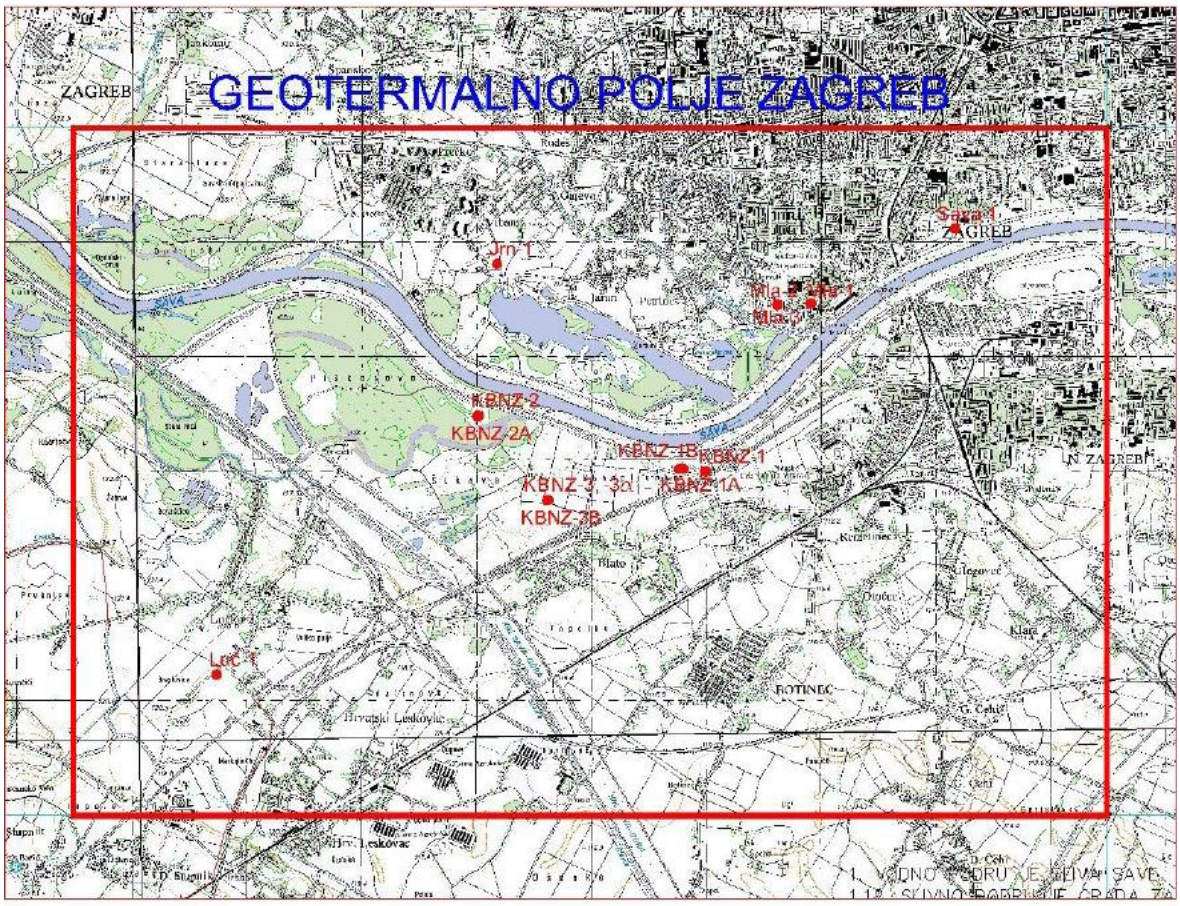
Za dizajn cementne kaše korišten je cement API klase G. Zbog prisutnosti otopljenog plina u geotermalnoj vodi, odnosno radi sprječavanja $CO_2$ korozije u repnu cementnu kašu dodan je aditiv za povećanje tlačne čvrstoće cementnog kamena „Latex 3000“. U tablici 7-4. prikazani su podaci o cementaciji pojedinog niza zaštitnih cijevi.

**Tablica 7-4.** Cementacija niza zaštitnih cijevi bušotine Draškovec-3 (Elezović et al., 2018)

| **Promjer kolone** | **Metoda** | **Gustoća cementne kaše, kg/m$^3$** | **Broj stupnjeva** |
|---|---|---|---|
| 473,1 mm (18 5/8”) | Kroz bušaće šipke | 1920 | 1 |
| 339,7 mm (13 3/8”) | Jednostupanjska | Vršna – 1510<br>Repna – 1880 | 1 |
| 244,5 mm (9 5/8”) | Dvostupanjska | Vršna – 1650<br>Repna – 1900 | 2 |
| 193,7 mm (7 5/8”) | Jednostupanjska | Repna – 1990 | 1 |

*7.1.3. Geotermalno polje Zagreb*

Geotermalno polje Zagreb proteže se jugozapadnim dijelom područja grada Zagreba. Polje je otkriveno 1977. godine ispitivanjem naftne bušotine Stupnik-1 (Stu-1). Polje sadrži ukupno četrnaest kanala bušotina, od kojih tri imaju oznaku Mladost, sedam Klinička bolnica Novi Zagreb te po jedna bušotina ima oznaku Jarun (JRN), Sava (Sava), Stupnik (Stu) i Lučanka (Luč) (Elezović et al., 2018). Vrijednost temperature vode u ležištu bušotine Mla-1 iznosi 75 °C, a mjereni tlak 104 bar (Getliher i Horvat, 2009). Položaj polja prikazan je na slici 7-6.




**Slika 7-6.** Položaj geotermalnog polja Zagreb (Elezović et al., 2018)

Geotermalna energija koristi se kroz dva tehnološka sustava i jedan podsustav:

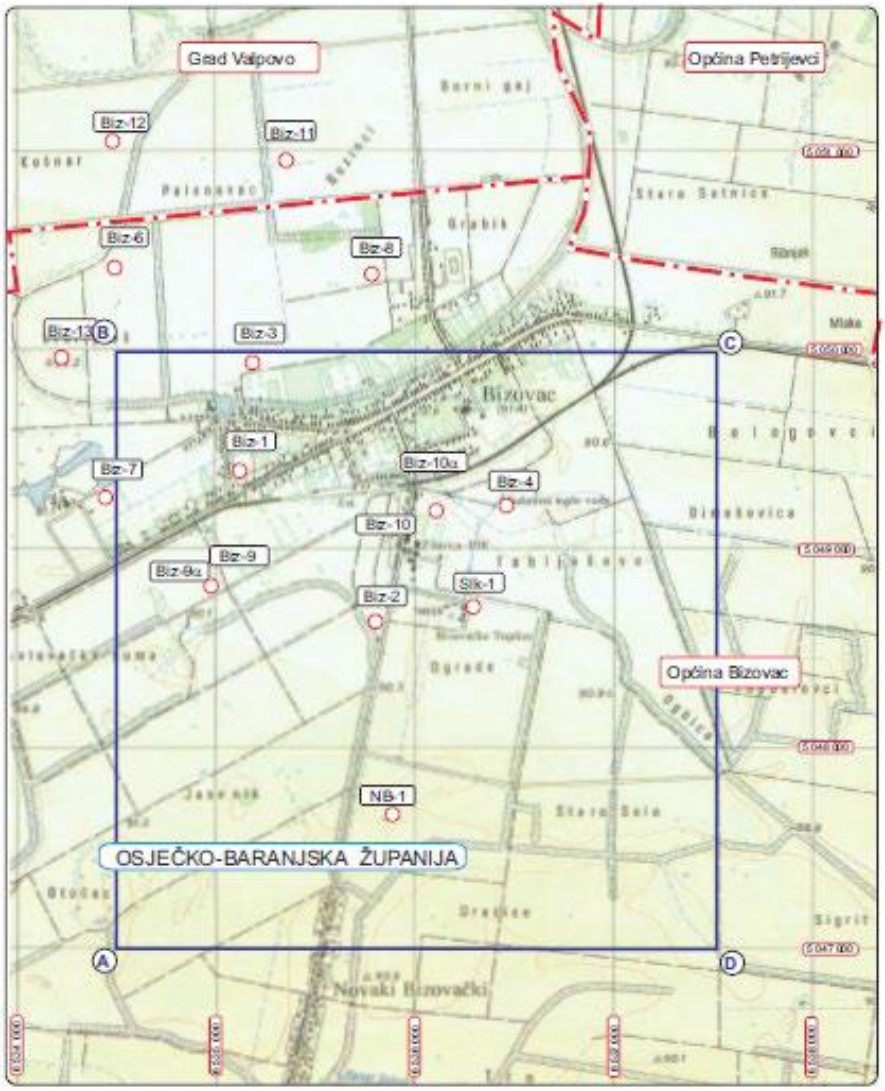
- Tehnološki sustav Mladost (proizvodna i utisna bušotina),
- Tehnološki sustav Klinička bolnica Novi Zagreb (proizvodna i utisna bušotina) i
- Tehnološki podsustav na lokalitetu Lučko (proizvodna bušotina).

Sve kolone zaštitnih cijenu cementirane su do vrha cementnom kašom na bazi cementa API klase G. Program cementacija kolona zaštitnih cijevi nije sačuvan (Elezović et al., 2018).

### *7.1.4. Geotermalno polje Bizovac*

Geotermalno polje Bizovac smješteno je u istočnoj Slavoniji. Istražnom bušotinom Bizovac-1 (Biz-1) otkriveno je 1967. godine naftno polje tijekom istraživanja nafte i plina u Dravskoj depresiji. Ubrzo je počelo bušenje još dviju bušotina, a bušotinom Bizovac-2 (Biz-2) otkrivene

su veće zalihe geotermalne vode (Elezović et al., 2018). Studije provedene 1970-ih potvrdile su temperaturu vode na ušću bušotine od 96,8 °C (Pavlak, 2020).
Položaj polja prikazan je na slici 7-7.




**Slika 7-7.** Položaj geotermalnog polja Bizovac (Elezović et al., 2018)

Za crpljenje geotermalne vode koriste se tri bušotine, dvije proizvodne – Biz-4 i Slk-1 te jedna utisna Biz-2. Zbog otopljenog plina ($CO_2$ i $CH_4$) u geotermalnoj vodi koristi se separator gdje se plin izdvaja.

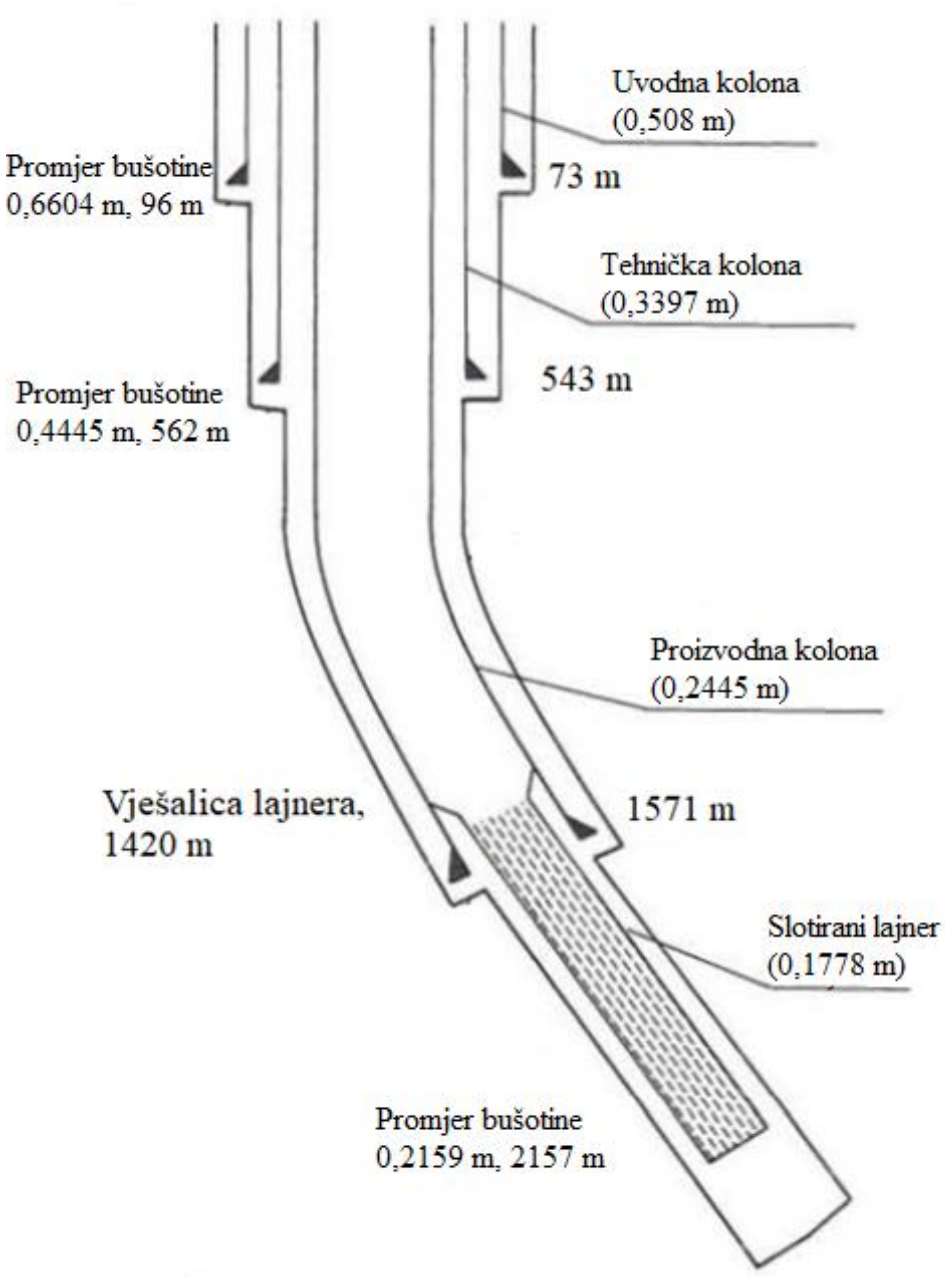
Sve kolone zaštitnih cijevi cementirane su do vrha cementom kašom na bazi cementa API klase G uz dodatak aditiva. Program cementacija kolona zaštitnih cijevi nije sačuvan (Elezović et al., 2018).

## 7.2. Geotermalna polja u svijetu

U nastavku se opisuju dva primjera iz prakse: cementacija geotermalne bušotine na geotermalnim poljima Berlin (El Salvador) i Svartseogi (Island).

### *7.2.1. Geotermalno polje Berlin*

Geotermalno polje Berlin smješteno je u istočnom dijelu El Salvadora oko 100 km od San Salvador (Guerrero, 1998). Prva bušotina TR-1 izbušena je 1968. godine, a naknadno je izbušeno još devet bušotina na tom lokalitetu (slika 7-8). Geotermalno polje Berlin ubraja se u visoko temperaturna ležišta s obzirom na vrijednost temperature 280-300 °C u ležištu. Glavna zona nalazi se između 1752 i 1852 m dubine s temperaturom od 300 °C i tlakom od 118 bar (Rodriguez, 2005).




**Slika 7-8**. Konstrukcija bušotine TR-4A (Guerrero, 1998)

Bušotina TR-4A prva je izbušena usmjerena i proizvodna na tom polju konačne dubine 2 157 m. Njena izrada zahtijevala je najviše utrošenog vremena odnosno 200 radnih dana. Njeno bušenje karakterizirano je velikim gubicima isplake, instrumentiranjem i zaglavom bušaćeg alata.

Za cementaciju proizvodne kolone 0,2445 m (9 5/8“) korištena je cementna kaša na bazi cementa API klase H, kvarcno brašno (engl. *silica flour*), dispergator (CFR-2), smanjivač filtracije, usporivač za visoke temperature (HR-12), antipjenušavac i voda (tablica 7-5).

**Tablica 7-5.** Sastav cementne kaše za cementaciju proizvodne bušotine TR-4A

| **Cement i aditivi** | **Cementacija kroz bušaće šipke** | **Cementacija kroz prstenasti prostor** |
|---|---|---|
| Cement API klase H | 100 | 100 |
| Kvarcno brašno (% BWOC) | 35 | 35 |
| Dispergator (% BWOC) | 0,6 | |
| Smanjivač filtracije (% BWOC) | 1,5 | 1,5 |
| Usporivač za visoke temperature (% BWOC) | 2 | |
| Antipjenušavac (% BWOC) | 0,2 | |

Gustoća kaše je iznosila 1830 kg/m$^3$. Utrošeno je 91,12 tona cementa i 50 m$^3$ vode.

Postupak korišten za cementaciju bušotine TR-4A. Proizvodna kolona zaštitnih cijevi cementirana je sljedećim redom (Guerrero, 1998):

1. Zaustavna ploča s brtvenim rukavcem (engl. *sealing sleeve*) postavljena je 25 m iznad cementacijske pete.
2. Trn (adapter za brtvljenje) (engl. *sealing adapter; “Tag-in”*) je navrnut na prvu bušaću šipku te je niz bušaćih šipki spušten do zaustavne ploče i odsjednut u brtvenom rukavcu.
3. Cementacijska glava je spojena na vrh niza bušaćih šipki.
4. Isplaka je cirkulirana kroz bušaće šipke u periodu od tri sata kako bi se bušotina pročistila i ohladila.
5. Utisnuto je 6,5 m$^3$ odjeljivača (vodena otopina natrijevog bikarbonata).
6. Protisnuto je 89 m$^3$ cementne kaše kroz bušaće šipke. Prvih 58 m$^3$ protisnuto je s djelomičnim povratom isplake na površinu, dok je preostalih 31 m$^3$ cementne kaše utisnuto bez povrata isplake na površinu.
7. Cementna kaša je iz bušaćih šipki istisnuta s 12,8 m$^3$ isplake.

8. Odmah je s površine utisnuto 17,5 $m^3$ vode u prstenasti prostor, a zatim 34 $m^3$ cementne kaše. Povrata utisnute kaše na površinu nije bilo što upućuje na zaključak da prstenasti prostor nije do ušća ispunjen cementnom kašom.
9. Nakon 12 sati očvršćavanja cementne kaše, a radi popunjavanja prstenastog prostora, u njega je s površine utisnuto još 20 $m^3$ cementne kaše i time je završena cementacija.

Četiri dana nakon završetka cementiranja zaštitnih cijevi obavljeno je ispitivanje kvalitete veze cementnog kamena (engl. *CBL log*) i utvrđeno je dobro vezivanje (prosječna kvaliteta 40-90%) u cijelom prstenastom prostoru (Guerrera, 1998).

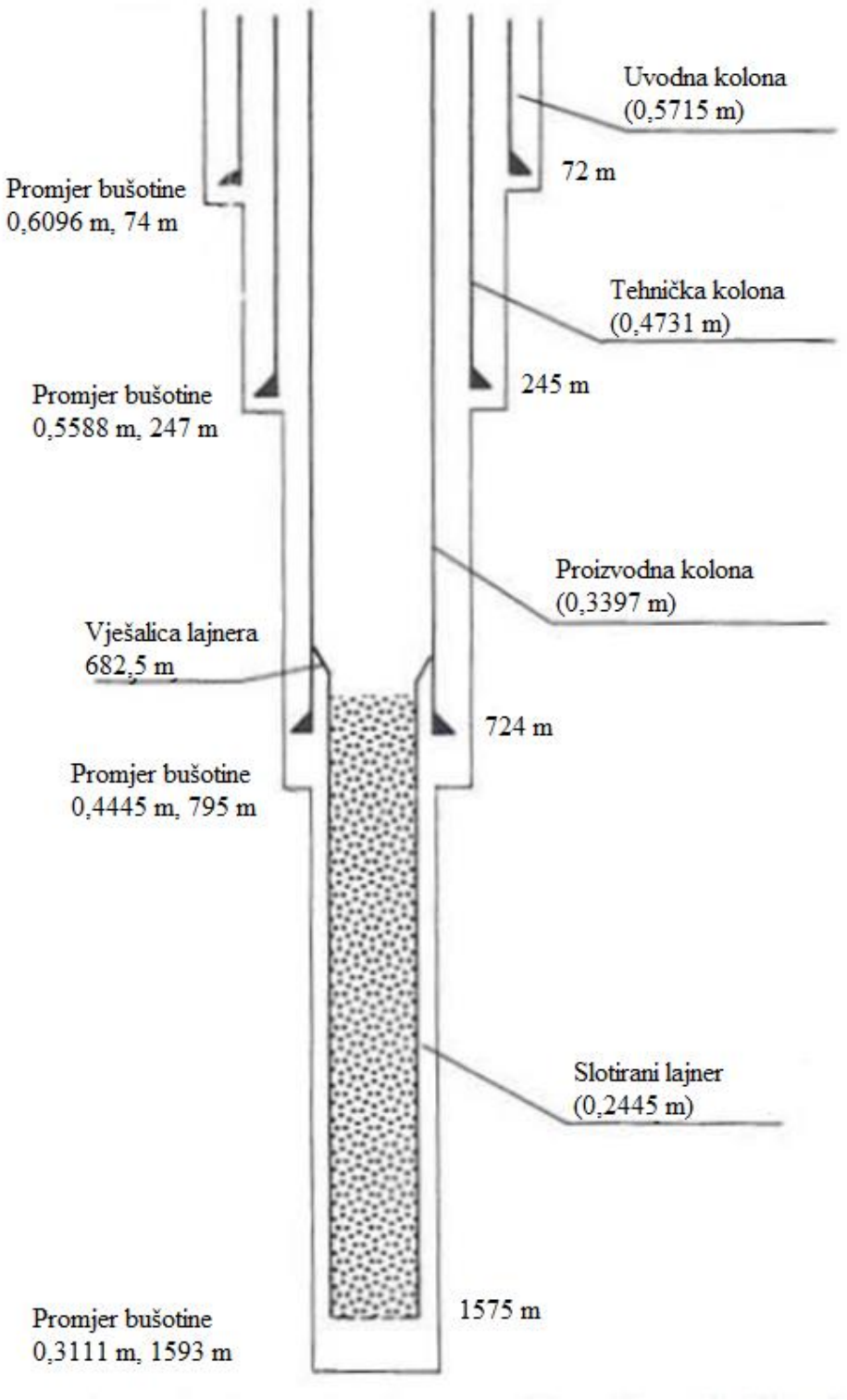
Na temelju iskustva cementiranja geotermalnih bušotina na geotermalnom polju Berlin doneseni su sljedeći zaključci (Guerrero, 1998):

a) Prije primarne cementacije potrebno je ukloniti ili značajno smanjiti probleme s gubljenjem cirkulacije. Potrebno je provesti istraživanja kako bi se utvrdio najbolji trenutak za premošćivanje zone gubljenja za vrijeme bušenja ili cementacije zaštitnih cijevi.
b) Uspješna cementacija geotermalnih bušotina podrazumijeva ispunjavanje prstenastog prostora cementnom kašom. Korištenjem jednostupanjske ili dvostupanjske cementacije moguće je postići zadovoljavajuće ispunjavanje prstenastog prostora bez obzira na probleme s gubitkom cirkulacije i povratom cementa na površinu.
c) Karakteristika procesa cementacije polja Berlin jest jednostavnost. Razlog tomu su provedena istraživanja i dobra pripremljenost na zone gubljenja cirkulacije. Korištenjem ekspandiranog perlita premoštene su zone gubljenja cirkulacije.
d) Iskustva pokazuju da je najbolja tehnika za cementiranje geotermalnih bušotina metoda cementacije kroz bušaće šipke.
e) Uspjeh cementacije geotermalnih bušotina uvelike ovisi o podacima koji su dobiveni ispitivanjem bušotine, kvalitete cementne veze te o kvaliteti cementa i aditiva.

### *7.2.2. Geotermalno polje Svartseogi na Islandu*

Geotermalno polje Svartseogi nalazi se na poluotoku Reykjanes, oko 50 km JZ od grada Reykjavika. Izbušeno je ukupno petnaest bušotina s najvećom dubinom 2 000 metara

(Guerrera, 1998). Klasificirano je kao visoko temperaturno polje zbog vrijednosti temperature 235-240 °C (Gudmundsson, 1988). Na slici 7-9 prikazana je konstrukcija bušotine SJ-19.




**Slika 7-9.** Konstrukcija bušotine SJ-19 (Guerrero, 1998)

Cementna kaša za cementaciju proizvodne kolone 13 3/8“ ugrađene u bušotinu SJ-19 pripremljena je od Portland cementa, kvarcnog brašna, ekspandiranog perlita, bentonita, usporivača i vode (Tablica 7-6). Gustoća cementne kaše iznosila je 1650 kg/m$^3$.

**Tablica 7-6.** Sastav cementne kaše za cementaciju bušotine SJ-19 (Guerrero, 1998)

| **Cement i aditivi** | **Koncentracija (% BWOC)** |
|---|---|
| Portland cement | 100 |
| Kvarcno brašno (325 mesh) | 40 |
| Ekspandirani perlit | 2 |
| Bentonit | 2 |
| Usporivač | 0,5 |

Zaštitne cijevi cementirane su sljedećim redom (Guerrero, 1998):

1. Zbog pojave gubitka cirkulacije odlučeno je da će cementacija zaštitnih cijevi biti obavljena u dvije faze. Isplaka unutar zaštitnih cijevi protisnuta je vodom.
2. Za prvu fazu cementacije pripremljeno je 47 m$^3$ cementne kaše prosječne gustoće 1680 kg/m$^3$. Voda je utisnuta s ciljem pročišćavanja prstenastog prostora i pripremanja za drugu fazu cementacije.
3. Cementna kaša je protisnuta s 43 m$^3$ vode bez korištenja gumenih čepova.
4. Nakon 18 sati očvršćivanja cementne kaše obavljena su EK mjerenja temperature te je otkriven akvifer na dubini od 460 m. Ispitivanjem kvalitete cementnog kamena (engl. *CBL log*) otkriven je vrh cementa unutar zaštitnih cijevi na 531 m.
5. Za drugu fazu cementacije pripremljena su 44 m$^3$ cementne kaše jednake gustoće kao za prvu fazu.
6. Nakon pet sati očvršćivanja cementne kaše protisnuto je još 13 m$^3$ u prstenasti prostor bez povratka kaše na površinu. Protiskivanjem još 0,7 m$^3$ kaše ostvaren je povratak na površinu. Snimanje kvalitete veze cementnog kamena obavljeno je petnaest sati nakon završetka cementacije i ustanovljena je prihvatljiva kvaliteta cementne veza (prosječna kvaliteta 80%) duž čitave duljine zaštitnih cijevi.

# 8. ZAKLJUČAK

Geotermalna ležišta, s obzirom na iskoristivost dostupne temperature, dijele se na ležišta s temperaturom do 100 °C (nisko temperaturna), između 100 °C i 180 °C (srednje temperaturna) te na ležišta s temperaturom višom od 180 °C (visoko temperaturna). Prikazani primjeri geotermalnih ležišta u Republici Hrvatskoj pripadaju razredu nisko i srednje temperaturnih ležišta. Cementacija geotermalnih bušotina obuhvaća utiskivanje cementne kaše kroz zaštitne cijevi, kroz bušaće šipke ili kroz prstenasti prostor. Prilikom dizajniranja cementne kaše za geotermalne uvjete potrebno je obratiti pozornost na uvjete tlaka i temperature koji vladaju na dnu kanala bušotine jer djeluju na svojstva cementne kaše (vrijeme zgušćivanja i vezivanja, reološka svojstva, filtraciju, gustoću i izdvajanje slobodne vode) i svojstva cementnog kamena (tlačnu čvrstoću, propusnost, otpornost na koroziju). Izrada geotermalnih bušotina je zahtjevna s aspekta bušenja i cementacije kolona zaštitnih cijevi. U geotermalnim bušotinama velike probleme uzrokuje visoka temperatura, debeo isplačni oblog, gubljenje cirkulacije, $CO_2$ korozija, primarna i sekundarna migracija plina.

Iako se Portland cement uz dodatak različitih aditiva najčešće koristi za pripremu cementne kaše, za cementaciju geotermalnih bušotina koriste se i posebne vrste cementa kao što su cementi na bazi kalcijeva fosfata ili kalcijeva aluminosilikata, pjenocementi, cementi s dodatkom lateksa, staklenih mikrokuglica ili organskih polimera. Njihovom primjenom izbjegavaju se ili svode na prihvatljivu mjeru prethodno navedeni problemi.

Geotermalna ležišta predstavljaju neiscrpan oblik toplinske energije koja se može izravno koristiti ili pretvarati u električnu energiju. Prednost geotermalne energije u odnosu na ostale obnovljive izvore jest konstantna proizvodnja energije, a troškovi ulaganja su niži u odnosu na ulaganja u druge obnovljive izvore te ona predstavlja ključan faktor kao obnovljivi izvor energije u budućnosti. Zbog toga, potrebno je posebnu pažnju posvetiti tehnologiji cementiranja geotermalnih bušotina kako bi one kroz dugi vremenski period zadržale svoj mehanički i hidraulički integritet i omogućile proizvodnju geotermalne vode.

## 9. LITERATURA


1. AL RAMADAN, M., 2019. Experimental Investigation of Well Integrity: Annular Gas Migration in Cement Column. The University of Oklahoma, USA.
2. API – American Petroleum Institute, 1997. Recommended Practice for Testing Well Cements. API Recommended Practice 10B, twenty-second edition.
3. API – American Petroleum Institute, 2019. Cements and Materials for Well Cementing. API Spec 10A, twenty-fifth edition.
4. BELANI, A., i ORR, S., 2008. A Systematic Approach to Hostile Environments. Schlumberger.
5. BELLO, K. S., 2014. Experimental Assesment of Cement Integrity under Thermal Cycle Loading Conditions in Geopressured Geothermal Reservoir. Louisiana State University.
6. BETT, E. K., 2017. Geothermal Well Cementing, Materials and Placement Techniques. Geothermal Training Programme, Reports 2010, Number 10, The United Nations University, Reykjavík, Iceland pp 99-130.
7. BOUR, D. i RICKARD, B., 2000. Application of Foamed Cement on Hawaiian Geothermal Well, vol.24, str. 55-60. Haliburton Energy Services, The Resource Group.
8. CALVERT, D.G. i SMITH, D.K., 1990. API Oilwell Cementnig Practices. Halliburton Services, str.1364-1373.
9. CARSON, C., 1982. Geothermal drilling problems and their impact on cost Sands82-0261C. Sandia National Laboratories.
10. CASTILLA, R., 2017. Geothermal wells vs. HPHT in Oil & Gas, https://www.linkedin.com/pulse/geothermal-wells-vs-hpht-oil-gas-raymi-castilla/ (pristupljeno 29.04.2021.)
11. FINGER, J i BLANKENSHIP, D., 2010. Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling. Sandia National Laboratories. California.
12. FINK J., 2015. Petroleum Engineer' s Guide to Oil Field Chemicals and Fluids, Chapter 10, Second Edition, str. 317-367.
13. FRITTELLA, F., BABBO, M. i MUFFO, I.A., 2009. Best Practices and Lessons Learned From 15 Years of Experience of Cementing HPHT Wells in Italy. BJ Services, Bahrain.

14. GAURINA-MEĐIMUREC, N., MATANOVIĆ, D., KRKLEC, G., 1994. Cement slurries for geothermal wells cementing. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, vol.6, 1994., str. 127-134.
15. GAURINA – MEĐIMUREC, N., BORIVOJE, P., 2011. Konstrukcija i mehanička cjelovitost bušotina za utiskivanje $CO_2$. Rudarsko-geološko-naftni zbornik 23, str. 1-8.
16. GAURINA – MEĐIMUREC, N., 2010. Utjecaj $CO_2$ na cementni kamen. Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu. Zagreb.
17. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2017. Predavanje iz kolegija Bušotinski fluidi 2, ak. god. 2017./2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.
18. GETLIHER, A. i HORVAT, S., 2008. Uporaba geotermalnih resursa na području grada Zagreba u cilju gospodarskog razvitka. SECON HDGK d.o.o., str. 613-690.
19. GUERRERO, C.E.G., 1998. Cementing of Geothermal Wells. Geothermal Training Programme, Reports 1998, Number 6, The United Nations University, Reykjavik, Iceland, pp 157-188.
20. GUDMUNDSSON, J.-S., 1988. High-Temperature Field in Iceland, Geothermal Reservoir Engineering, pp 317-325.
21. HAIDHER, S., KALE, S., AFFES, S., KUMAR NAIR, S., 2006. HP/HT Cement System Design – East Coast Case History. Indian Drilling Technology Conference and Exibition. India.
22. HERNANDEZ, R. i NGUYEN, H., 2010. Reverse-Circulation Cementing and Foam Latex Cement Enable Drilling in Lost-Circulation Zones. Proceedings Worl Geothermal Congress 2010. Indonesia.
23. HOLE, H., 2008. Geothermal Deep Well Drilling Practices – An Introduction. Geothermal Consultants NZ Ltd., Birkenhead, Auckland, New Zealand.
24. HRGALEK, M., RUŽIĆ, I., ERNOIĆ, K., KUTNJAK, B., BARTOLEC, D., JEŽOVITA, O., DUBOVEČAK, V., BUDANOVIĆ, K. ZIMPRICH, E., HRGAREK, P., GLAVICA, P. i VUKOVIĆ, M., 2017. Glavni rudarski projekt eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Draškovec AATG.
25. ISO 10427-2 2004, 2004. Equipment for well cementing – Part 2: Centralizer placement and stop-collar testing.
26. MALDONADO, B., ARRAZOLA, A., MORTON, B., 2006. Ultradeep HP/HT Completions: Classification, Design Methodologies, and Technical Challenges. Baker Oil Tools, USA.

27. MICHAUX, M., NELSON, E., VIDICK, B., 1990. Cement Chemistry and Additives, vol.1, no.1 str. 18-25. Saint-Etienne. France.
28. MORALES, M., MORRIS, W., CRIADO, M., ROBLES, J., BIANCHI, G., 2003. Improving the sulfate resistance performance of API cement class A upon appropriate slurry design. Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Port of Spain.
29. NELSON, E., BARET, J.-F., MICHAUX, M., 1990. Cement Aditives and Mechanisms of Action Dowell Schlumberger, Chapter 3, str 1-37.
30. PAVLAK, N., 2020. Geotermalna energija i primjeri iz Republike Hrvatske, Završni rad, Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet. (obranjen: 07.07.2020.)
31. POUR, M. M. i MOGHADASI, J., 2007. New Cement Formulation That Solves Gas Migration Problem sin Iranian South Pars Field Condition. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Bahrain.
32. RADWAN, A. i KARIMI, M., 2011. Feasibility Study of Casing Drilling Application in HPHT Environments; A Review of Challenges, Benefits and Limitations. Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. Oman. pp 1-8.
33. RODRIGUEZ, V.A., 2005. Analysis of temperature and pressure measurements and production dana for Berlin geothermal fiel, El Salvador. Geothermal Training Programme, Reports 2005, Number 16, The United Nations University, Reykjavik, Iceland.
34. SAGHIRI, A. M., ORGANI, J., ASATOURIAN, A., GUTMAN, L. J., GARCIA-GODOY, F., LOTFI, M. i SHEIBANI, N., 2016. Calcium silicate-based cements and functional impacts of various constituents. (pristupljeno 23.05.2021.)
35. SALIM, P., AMANI, M., 2013a. Special consideration in cementing high temperature wells. Texas A&M University, Qatar, vol.1, no.4, str. 120-124.
36. SALIM, P., AMANI, M., 2013b. Principal Points in Cementing Geothermal Wells, Advances in Petroleum Exploration and Development, Texas A&M University, Qatar, str.77-91.
37. SEDIĆ, K., 2017. Optimiranje sastava cementnih kaša za cementiranje zaštitnih cijevi u bušotinama za utiskivanje ugljikovoga dioksida, Doktorski rad, Zagreb. (obranjen 07.06.2017.)
38. SHADRAVAN, A., AMANI, M., 2012. HPHT 101 – What Every Engineer or Geoscientist Should Know about High Pressure High Temperature Wells. Texas A&M University. Texas.

39. ŠKRLEC, M., KOLBAH, S., ŽIVKOVIĆ, S. i TUMARA, D., 2019. Korištenje resursa geotermalne energije u Republici Hrvatskoj. Nafta i Plin. Zagreb. str 51-55.
40. SUGAMA, T., 2006. Advanced Cements for Geothermal Wells. Energy Sciences and Technology Department/Energy Resources Division. Brookhaven National Laboratory.
41. UGWU, I., SCHUBERT, J. i TEODORIU, C., 2008. Cement Fatigue and HPHT Well Integrity with Application to Life of Well Prediction. Petroleum Engineering Department, Texas A&M University College Station. Texas. (pristupljeno 29.04.2021.)
42. UNGEMACH, P., ANTICS, M. i PAPACHRISTOU, M., 2005. Suistanable Geothermal Reservoir Management. Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya.
43. YUAN, Z., 2012. The effect of cement mechanical properties and reservoir compaction on HPHT well integrity. Texas A&M University. (pristupljeno 03.05.2021.)

Web izvori:

44. TPI POLENCE (06.04.2021.)
https://www.tpipolene.co.th/en/cement-en/masonry/item/338-oilwell
45. HRVATSKO ZAKONODAVSTVO (15.04.2021.)
http://zakon.poslovna.hr/public/strategija-upravljanja-vodama/456570/zakoni.aspx
46. ENERGETSKI INSTITUT HRVOJE POŽAR (16.04.2021.)
http://www.eihp.hr/
47. DRILLING CONTRACTOR (23.04.2021.)
https://www.drillingcontractor.org

IZJAVA

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

Toni Granić

Toni Granić

KLASA: 602-04/21-01/54
URBROJ: 251-70-03-21-2
U Zagrebu, 07.06.2021.

**Toni Granić, student**

# RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/21-01/54, UR. BROJ: 251-70-12-21-1 od 09.04.2021. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

## CEMENTIRANJE GEOTERMALNIH BUŠOTINA

Za voditeljicu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu dr. sc. Nediljka Gaurina - Međimurec, redovita profesorica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**Voditeljica**

(potpis)

Prof. dr. sc. Nediljka Gaurina Međimurec

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)