

# Dizajn cementne kaše za geotermalnu bušotinu Draškovec-3

---

**Ključarić, Carla**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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:169:217290>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**DIZAJN CEMENTNE KAŠE ZA GEOTERMALNU  
BUŠOTINU DRAŠKOVEC - 3**

**Diplomski rad**

Carla Ključarić

N-263

Zagreb, 2019.

DIZAJN CEMENTNE KAŠE ZA GEOTERMALNU BUŠOTINU DRAŠKOVEC - 3

CARLA KLJUČARIĆ

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

Sažetak

Bušenje i cementacija kolona zaštitnih cijevi u geotermalnim bušotinama predstavlja veliki broj izazova, uključujući i vrlo visoke temperature na relativno malim dubinama. Uz to, ugljikov dioksid koji naiđe u formacije može biti korozivna prijetnja za cementni kamen.

U ovom radu opisani su mogući problemi tijekom cementacije kolona zaštitnih cijevi geotermalne bušotine Draškovec-3 te postupci cementacije kolona zaštitnih cijevi, provedena laboratorijska ispitivanja svojstava cementnih kaša za cementaciju kolona zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") i 339,7 mm (13 3/8") te rezultati. Također prikazani su rezultati ispitivanja svojstava četiriju različitih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") bušotine Draškovec – 3. Prikazan je izbor odgovarajuće cementne kaše koja pokazuje najveću otpornost na utjecaj ugljikovog dioksida za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8").

Ključne riječi: geotermalna bušotina, cementacija zaštitnih cijevi, cementna kaša, CO<sub>2</sub> otporna cementna kaša

Diplomski rad sadrži: 78 stranica, 38 tablica, 32 slike, 6 priloga i 19 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a

2. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

3. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Datum obrane: 15. veljača 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

DESIGN OF CEMENT SLURRY FOR GEOTHERMAL WELL DRAŠKOVEC – 3

CARLA KLJUČARIĆ

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

Abstract

Drilling and well cementing geothermal wells presents a lot of challenges, including very high temperatures in relatively low depths. In addition, the carbon dioxide that comes into formation can be a corrosive danger to cement stone.

This thesis describes the possible difficulties that can occur during the cementation of the geothermal well, Draškovec-3 well design and its cement procedures, conducted laboratory tests of cement slurries for cementing casing strings with outer diameter of 473,1 mm (18 5/8") and 339,7 mm (13 3/8") and the results. Also, the results of the laboratory tests of four different cement slurries for the cementing casing string with outer diameter of 244,5 mm (9 5/8") are described. The choice of proper cement slurry for cementing casing string with outer diameter of 244,5 mm (9 5/8") with the best carbon dioxide resistance is described.

Keywords: geothermal well, well cementing, cement slurry, carbon dioxide resistance cement slurry

Thesis contains: 78 pages, 38 tables, 32 figures, 6 appendixes i 19 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Reviewers: 1. Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

2. Full Professor Zdenko Krištafor , PhD

3. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: 15<sup>th</sup> February 2019., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
University of Zagreb

# SADRŽAJ

POPIS TABLICA.....	I
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS PRILOGA .....	VI
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA.....	VII
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. CEMENTACIJA ZAŠTITNIH CIJEVI U GEOTERMALNIM BUŠOTINAMA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. PROBLEMI U GEOTERMALNIM BUŠOTINAMA .....</b>	<b>3</b>
1.1.1. Visoke temperature.....	3
1.1.2. Gubljenje cirkulacije.....	3
1.1.3. Filtracija cementne kaše .....	4
1.1.4. Utjecaj ugljikovog dioksida.....	4
<b>2. BUŠOTINA DRAŠKOVEC - 3 .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. KONSTRUKCIJA BUŠOTINE DRAŠKOVEC-3 (DR-3) .....</b>	<b>7</b>
<b>3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1. CEMENTNA KAŠA .....</b>	<b>10</b>
3.1.1. Cement.....	10
3.1.2. Aditivi u cementnoj kaši.....	11
3.1.2.1. Ubrzivači.....	11
3.1.2.2. Usporivači .....	11
3.1.2.3. Oteživači .....	12
3.1.2.4. Olakšivači .....	12
3.1.2.5. Dispergatori .....	12
3.1.2.6. Aditivi za smanjenje filtracije.....	12
3.1.2.7. Antipjenušavci .....	13
<b>3.2. OPIS PRIPREME I ISPITIVANJE SVOJSTAVA CEMENTNIH KAŠA I CEMENTNOG KAMENA .....</b>	<b>15</b>
3.2.1. Priprema i ispitivanje cementne kaše .....	15
3.2.2. Priprema i ispitivanje cementnog kamena.....	18

<b>3.3.</b>	<b>REZULTATI ISPITIVANJA SVOJSTAVA CEMENTNIH KAŠA.....</b>	<b>20</b>
3.3.1.	Sastav i svojstva cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera (18 5/8" ) .....	20
3.3.1.1.	Postupak cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	27
3.3.2.	Sastav i svojstva razdjelnice i cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	28
3.3.2.1.	Svojstva razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	28
3.3.2.2.	Sastav i svojstva cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	32
3.3.2.3.	Postupak cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	38
3.3.3.	Sastav i svojstva razdjelnice i cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	39
3.3.3.1.	Sastav i svojstva razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	39
3.3.3.2.	Sastav i svojstva cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	43
3.3.3.3.	Postupak cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	51
<b>3.4.</b>	<b>REZULTATI ISPITIVANJA SVOJSTAVA CEMENTNOG KAMENA .....</b>	<b>53</b>
3.4.1.	Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena .....	53
3.4.1.1.	Određivanje tlačne čvrstoće primjenom UCA.....	53
3.4.1.2.	Destruktivna metoda za određivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	55
3.4.2.	Ispitivanje poroznosti i propusnosti.....	60
3.4.2.1.	Poroznost .....	60
3.4.2.2.	Propusnost.....	62
3.4.2.3.	Određivanje izgleda uzorka nakon premazivanja fenolftaleinom .....	65
<b>4.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>67</b>
<b>5.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>69</b>

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Bušotine geotermalnog polja Draškovec.....	5
Tablica 3-2. Konstrukcija bušotine Draškovec-3.....	7
Tablica 4-1. Sastav cementnih kaša potrebnih za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	20
Tablica 4-2. Mjerene gustoće cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	21
Tablica 4-3. Očitane vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	22
Tablica 4-4. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	23
Tablica 4-5. Prosječne vrijednosti smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	23
Tablica 4-6. Vrijednosti konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	25
Tablica 4-7. Vrijednosti filtracije cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	26
Tablica 4-8. Izdvajanje slobodne vode iz cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	26
Tablica 4-9. Sastav razdjelnice potrebne za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	29
Tablica 4-10. Očitane vrijednosti smičnog naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	30
Tablica 4-11. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	30
Tablica 4-12. Vrijednosti konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	31
Tablica 4-13. Sastav razdjelnice potrebne za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	32
Tablica 4-14. Vrijednosti gustoća ispitivanih cementnih kaša za kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	33

Tablica 4-15. Očitane vrijednosti smičnog naprezanja cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	34
Tablica 4-16. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	34
Tablica 4-17. Prosječne vrijednosti smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	35
Tablica 4-18. Vrijednosti konzistencije ispitivanih cementnih kaša za kolonu zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	37
Tablica 4-19. Vrijednosti filtracije cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	38
Tablica 4-20. Vrijednosti količine slobodne vode .....	38
Tablica 4-21. Sastav razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	40
Tablica 4-22. Očitane vrijednosti smičnog naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	41
Tablica 4-23. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	41
Tablica 4-24. Vrijednosti konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	42
Tablica 4-25. Sastav cementnih kaša za kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	44
Tablica 4-26 Vrijednosti gustoća ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	45
Tablica 4-27. Očitane vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	46
Tablica 4-28. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	47
Tablica 4-29. Prosječne vrijednosti smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	47
Tablica 4-30. Vrijednosti konzistencije ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	49
Tablica 4-31 Vrijednosti filtracije ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	50
Tablica 4-32. Vrijednosti količine slobodne vode .....	51



Tablica 4-33. Razvoj tlačne čvrstoće nakon očvršćavanja cementnih kaša.....	54
Tablica 4-34. Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO <sub>2</sub> .....	59
Tablica 4-35. Poroznost uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO <sub>2</sub> .....	61
Tablica 4-36. Propusnost uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO <sub>2</sub> .....	64

## POPIS SLIKA

Slika 3-1. Trajektorija bušotine Draškovec-3.....	8
Slika 3-2. Konstrukcija bušotine Draškovec-3.....	9
Slika 4-1. Korištena laboratorijska oprema: a) vaga za mjerenje gustoće cementne kaše, b) viskozimetar OFITE model 800, c) HTHP konzistometar, d) sušionik, e) filter preša.....	17
Slika 4-2. Ultrazvučni analizator (UCA).....	18
Slika 4-3. Hidraulička preša Versa Tester 30M.....	19
Slika 4-4. Plinski permeametar tvrtke Core Laboratories.....	19
Slika 4-5. Dijagram smičnih naprezanja „Scavenger“ i repne cementne kaše .....	24
Slika 4-6. Konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" .....	25
Slika 4-7. Raspodjela fluida u kanalu bušotine nakon cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") .....	28
Slika 4-8. Dijagram smičnih naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	31
Slika 4-9. Konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	32
Slika 4-10. Dijagram smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša pri temperaturi od 23 °C.....	35
Slika 4-11. Dijagram smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša pri temperaturi od 88 °C.....	36
Slika 4-12. Konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" .....	37
Slika 4-13. Raspodjela fluida u kanalu bušotine nakon cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8").....	39
Slika 4-14. Dijagram smičnih naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	42
Slika 4-15. Konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	43
Slika 4-16. Dijagram smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša pri temperaturi od 23 °C.....	48

Slika 4-17. Dijagram smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša pri temperaturi od 88 °C.....	48
Slika 4-18. Konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	49
Slika 4-19 Filtracija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8".....	50
Slika 4-20. Raspodjela fluida u kanalu bušotine nakon cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") .....	52
Slika 4-21. Razvoj tlačne čvrstoće cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	54
Slika 4-22. Usporedba vremena potrebnog za razvoj tlačne čvrstoće cementnog kamena 3,5 MPa nastalog iz cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" .....	55
Slika 4-23. Uzorci cementnog kamena nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s CO <sub>2</sub> .....	56
Slika 4-24. Uzorak cementnog kamena dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3A36 nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom.....	57
Slika 4-25. Uzorak cementnog kamena dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3B10 nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom.....	57
Slika 4-26. Uzorak cementnog kamena dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3D8 nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom.....	58
Slika 4-27. Uzorak cementnog kamena dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom.....	58
Slika 4-28. Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO <sub>2</sub> .....	60
Slika 4-29. Poroznost uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO <sub>2</sub> ..	62
Slika 4-30. Propusnost uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO <sub>2</sub> .....	65
Slika 4-31. Uzorci cementnog kamena premazani fenolftaleinom nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO <sub>2</sub> .....	66
Slika 4-32. a) Izgled radijalnog presjeka premazanog fenolftaleinom b) Izgled vanjske plohe uzorka i odlomljenog dijela premazanih fenolftaleinom.....	67

## POPIS PRILOGA

Prilog 1: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8".....	72
Prilog 2: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8".....	73
Prilog 3: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena 3A36.....	74
Prilog 4: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena 3B10.....	75
Prilog 5: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena 3D8.....	76
Prilog 6: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena 3E2.....	77

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Opis	Jedinica
A	Površina poprečnog presjeka uzorka	m <sup>2</sup>
BWOC	Udjel aditiva na masu cementa (engl. <i>By Weight on Cement</i> )	%
BHCT	Temperatura na dnu u optoku (engl. <i>Bottomhole Circulating Temperature</i> )	°C
BUR	Povećanje kuta otklona (engl. <i>Buid Up Rate</i> )	°/30m
$\Delta p$	Razlika tlaka	Pa
KOP	Točka skretanja kanala bušotine (engl. <i>Kick Off Point</i> )	m
k	Propusnost uzorka cementnog kamena	m <sup>2</sup>
$\mu$	Viskoznost plina	Pa·s
L	Duljina uzorka cementnog kamena	m
Q	Protok plina kroz uzorak	m <sup>3</sup> /s
TVD	Stvarna vertikalna dubina bušotine (engl. <i>Total Vertical Depth</i> )	m
t	Vrijeme ispitivanja	min
V <sub>30</sub>	Volumen filtrata nakon 30 minuta	ml
V <sub>t</sub>	Volumen filtrata nakon vremena t	ml

# 1. UVOD

Geotermalne bušotine se uglavnom opremaju skoro jednako kao i naftno / plinske bušotine. Međutim uvjeti s kojima se cementna kaša, a kasnije cementni kamen moraju suočavati su zahtjevniji. Temperatura na dnu bušotine u geotermalnoj bušotini može biti i do 370 °C što posljedično uzrokuje pad čvrstoće cementnog kamena, a slojne vode su često izrazito korozivne što dovodi do razgradnje cementnog kamena (Krklec, 1993).

Potencijalna mjesta za izradu geotermalnih bušotina su lokacije s toplinskim anomalijama. Geotermalna ležišta mogu imati geotermički gradijent od 1,8 °C/10 m do 1,8 °C/1 m (Gaurina –Međimurec et al., 1994).

Tijekom bušenja i cementacije kolona zaštitnih cijevi geotermalnih bušotina mogu se očekivati sljedeći problemi: vrlo visoke temperature u relativno malim dubinama, gubljenje cirkulacije te korozivna prijetnja za cementni kamen zbog prisutnosti ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>).

Glavna zadaća prilikom izrade geotermalne bušotine je osiguravanje dugoročnog integriteta bušotine, posebice u visokokorozivnom okruženju zbog prisustva ugljikovog dioksida. Ugljikov dioksid može uzrokovati zakiseljavanje vode koja se nalazi u porama cementnog kamena što može dovesti do različitih mehanizama otapanja / taloženja (Berard et al., 2010).

Na ugljikov dioksid se može naići u slojnim vodama ili kao rezultat njegova utiskivanja u ležište. Kada CO<sub>2</sub> dođe u kontakt s Portland cementom, on reagira s njegovim komponentama (slobodni Ca(OH)<sub>2</sub> i C-S-H gel) te narušava cementni matriks. U toj reakciji cementni kamen u kontaktu s CO<sub>2</sub> prolazi kroz proces karbonatizacije u kojem se CO<sub>2</sub> povezuje sa slobodnim kalcijevim hidroksidom nastalim tijekom hidratacije i tvori kalcijev karbonat. U trenutku kada se potroši sav kalcijev hidroksid, kalcijev karbonat se otapa u vodi zasićenoj CO<sub>2</sub> i izlučuje iz cementnog kamena u obliku kalcijevoga hidrogenkarbonata što za posljedicu ima povećanje poroznosti i propusnosti, te smanjenje tlačne čvrstoće cementnog kamena (Sedić, 2017). Karbonatizacija može uzrokovati ozbiljne štete na cijevnom alatu te uništiti integritet zone izolacije, što može rezultirati skupim troškovima sanacije ili u najgorem slučaju napuštanjem bušotine (Berard et al., 2010).

Svrha diplomskog rada je prikaz sastava i svojstava cementnih kaša korištenih za cementaciju kolona zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") i 339,7 mm (13 3/8") bušotine Draškovec-3 i optimiranje sastava cementnih kaša za cementaciju kolone

zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") bušotine Draškovec – 3 te na kraju izbor odgovarajuće cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") koja će pokazati najveću otpornost na utjecaj ugljikovog dioksida.

## 2. CEMENTACIJA ZAŠTITNIH CIJEVI U GEOTERMALNIM BUŠOTINAMA

Bušenjem geotermalnih bušotina nailazi se na područja visokih temperatura te se također može naići na područja visokih tlakova. Upravo zbog toga je cementacija u takvim uvjetima veoma izazovna. Temperatura na dnu bušotine može dosegnuti 370 °C te može uzrokovati probleme u procesu cementacije. Slojna voda je povećanog saliniteta, korozivna te sadrži teške toksične metale; zbog toga dizajn cementne kaše treba biti takav da ona bude otporna na gore navedene uvjete. Cementna kaša za ove uvjete mora očvrnuti u cementni kamen tlačne čvrstoće od minimalno 6,9 MPa (1000 psi).

### 2.1. PROBLEMI U GEOTERMALNIM BUŠOTINAMA

Problemi na koje se može naići u geotermalnim bušotinama su visoke temperature, gubljenje cirkulacije, debeli isplačni oblog i ugljikov dioksid koji može narušiti svojstva cementnog kamena.

#### 1.1.1. Visoke temperature

Cementacija zaštitnih cijevi u geotermalnim bušotinama zahtijeva da cementni kamen ima propusnost za vodu manju od  $10^{-4}$  m<sup>2</sup> te tlačnu čvrstoću veću od 6,9 MPa. Cementnom kamenu će pri temperaturi oko 110 °C početi opadati čvrstoća te će smanjenje čvrstoće biti izraženije s povećanjem temperature. Razlog tome je promjena u strukturi hidratiranog cementa (C-S-H) ili gubljenje vode zbog čega se tlačna čvrstoća cementnog kamena smanjuje, a njegova propusnost raste. Navedena pojava naziva se smanjenje čvrstoće (engl. *strength retrogression*) (Salim i Amani, 2013). Sprječavanje ovog fenomena moguće je dodatkom kvarcnog pijeska Portland cementu u količini od najmanje 35% BWOC (engl. *By Weight On Cement*).

#### 1.1.2. Gubljenje cirkulacije

Stijene kroz koje se izrađuje kanal geotermalnih bušotina mogu biti od slabo konsolidiranih do jako frakturiranih. Zbog toga je najčešći problem u geotermalnim bušotinama gubljenje cirkulacije tijekom bušenja ili cementacije pri čemu se gube velike količine isplake ili cementne kaše. Ukoliko se gubljenje cirkulacije dogodi tijekom cementacije tada nije rijetkost da se cementna kaša ne pojavi na površini, naročito ako se



koristi cementna kaša normalnog dizajna. Kako bi se riješio ovaj problem koristi se cementna kaša male gustoće. To je cementna kaša u koju se dodaju olakšivači (ekstenderi) kako bi se smanjila gustoća. Olakšivači su materijali male gustoće koji ujedno omogućuju da se u cementnu kašu doda više vode. Najčešće se koriste lebdeći pepeo, bentonit i ekspandirani perlit. Za Portland cement, ukoliko je temperatura iznad 232 °C, preporuča se korištenje bentonita i perlita. Za korištenje visokoaluminatnih cementa pri temperaturama iznad 300 °C, prihvatljivija je upotreba lebdećeg pepela. Međutim, u geotermalnim bušotinama pokušava se izbjeći upotreba lebdećeg pepela jer može smanjiti tlačnu čvrstoću cementnog kamena pri temperaturama stvrdnjavanja iznad 230 °C te tijekom dugog vremenskog razdoblja (Salim i Amani, 2013).

#### 1.1.3. Filtracija cementne kaše

Filtracija cementne kaše (engl. *fluid loss*) ne može se izbjeći, ali se može smanjiti dodavanjem aditiva za smanjenje filtracije. Takvi aditivi se dodaju u cementnu kašu kako bi se smanjila vrijednost njihove filtracije (izdvajanje vode) pod djelovanjem diferencijalnog tlaka u bušotini u intervalu propusne formacije (Perić, 2007). Za smanjenje filtracije najčešće se koriste lateks, atapulgut, organski polimeri te karboksimetilhidroksietil celuloza. Ukoliko je gubitak tekuće faze iz cementne kaše prevelik to može uzrokovati smanjenje tlačne čvrstoće cementnog kamena (Salim et al., 2013). Također, gubitkom tekuće faze cementna kaša postaje gušća te se povećava tlak utiskivanja. To može dovesti do dodatnog gubitka tekuće faze iz cementne kaše te do moguće promjene režima protjecanja (Wellcem, 2019). Općenito pravilo je da bi filtracija cementne kaše trebala biti oko 50 do 100 ml unutar 30 minuta (Salim i Amani., 2013).

#### 1.1.4. Utjecaj ugljikovog dioksida

Jedan od problema u geotermalnim bušotinama je karbonatizacija cementnog kamena. Prema ispitivanjima na geotermalnom polju Broadlands u Novom Zelandu zaključeno je da karbonatizacija cementnog kamena ovisi o količini ugljikovog dioksida u slojnom fluidu, temperaturi te o aditivima u cementnoj kaši. Cementni kamen koji je pod utjecajem ugljikovog dioksida će imati prihvatljivu tlačnu čvrstoću, ali će propusnost biti iznad dozvoljene vrijednosti. U područjima visoke koncentracije ugljikovog dioksida, neophodna je upotreba kalcijevog alumosilikata ili kalcijevog fosfata kako bi se smanjio gubitak težine cementnog kamena. Za povećanje čvrstoće cementnog kamena na bazi Portland cementa u

ovakvim uvjetima u cementnu kašu dodaje se lebdeći pepeo ili lateks (Salim i Amani, 2013).

## 2. BUŠOTINA DRAŠKOVEC - 3

Eksploatacijsko polje geotermalne vode Draškovec nalazi se u sjevernom dijelu Republike Hrvatske u Međimurskoj županiji. Na geotermalnom polju Draškovec nalaze se dvije bušotine: Dr-1 (utisna bušotina) i Dr-2 (eksploatacijska bušotina) koje su klasificirane kao geotermalne. Uz postojeće bušotine u planu je izrada sedam novih bušotina ( Dr-3 do Dr-9) koje bi činile parove eksploatacijskih – utisnih bušotina. Bušotina Dr-1 planira se prenamijeniti u mjernu bušotinu, a Dr-2 u utisnu. U tablici 3.1 prikazani su podaci o postojećim i budućim bušotinama na geotermalnom polju Draškovec.

Tablica 3-1. Bušotine geotermalnog polja Draškovec (Glavni rudarski projekt - AAT Geothermae, 2017)

Red. broj	Bušotina	Duljina kanala bušotine (MD) (m)	Stvarna vertikalna dubina bušotine (TVD) (m)	Otvoreni intervali (m)	Raskriveno ležište	Fluid	Status bušotine
1.	Dr-1	2713,0	2702,0	2193,0-1827,0	"Pješčenjaci"	Voda, plin	Utisna*
				2450,0-2266,0	"Vapnenci"		
2.	Dr-2	2747,7	2295,0	2175,0-1816,0	"Pješčenjaci"	Voda, plin	Proizvodna**
				2295,0-2254,0	"Vapnenci"		
3.	<b>Dr-3</b>	<b>2877</b>	<b>2540</b>	<b>Pretpostavljeni: 2175,0-1816,0</b>	<b>"Pješčenjaci"</b>	<b>Voda, plin</b>	<b>Proizvodna</b>
4.	Dr-4	2978	2754	Pretpostavljeni: 2420,0-2254,0	"Vapnenci"	Voda, plin	Proizvodna
5.	Dr-5	2992	2744	Pretpostavljeni: 2420,0-2254,0	"Vapnenci"	Voda, plin	Utisna
6.	Dr-6	cca 2550	cca 2400	Pretpostavljeni: 2420,0-2254,0	"Vapnenci"	Voda, plin	Proizvodna
7.	Dr-7	cca 2550	cca 2400	Pretpostavljeni: 2420,0-2254,0	"Vapnenci"	Voda, plin	Utisna
8.	Dr-8	cca 2500	cca 2200	Pretpostavljeni: 2175,0-1816,0	"Pješčenjaci"	Voda, plin	Proizvodna
9.	Dr-9	2806	2437	Pretpostavljeni: 2175,0-1816,0	"Pješčenjaci"	Voda, plin	Utisna

Napomena:

\*planira se prenamjena u mjernu bušotinu

\*\*planira se prenamjena u utisnu bušotinu

Zadatak sedam novih bušotina je (GRP - AAT Geothermae, 2017):

- probušiti geotermalno ležište u povoljnom strukturnom položaju u dobrom kolektorskom razvoju,
- omogućiti dugoročno pridobivanje geotermalne vode kroz eksploatacijske bušotine te omogućiti dugoročno utiskivanje ohlađene geotermalne vode i CO<sub>2</sub> u utisne bušotine.

## 2.1. KONSTRUKCIJA BUŠOTINE DRAŠKOVEC-3 (DR-3)

Bušotina Draškovec-3 izradit će se kao koso-usmjerena bušotina (slika 3-1. i 3-2.) s duljinom kanala bušotine od 2877 m te stvarne vertikalne dubine bušotine 2540 m.

Bušenje kanala za uvodnu kolonu vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") obaviti će se dlijetom promjera 584,2 mm (23") do dubine 200 m uz ispiranje bentonitnom suspenzijom gustoće 1040-1100 kg/m<sup>3</sup>. Uvodna kolona zaštitnih cijevi služiti će za prekrivanje rastresite naslage šljunka i ugljena, a bit će ugrađena do 200 m te će se za cementaciju koristiti cement API klase G.

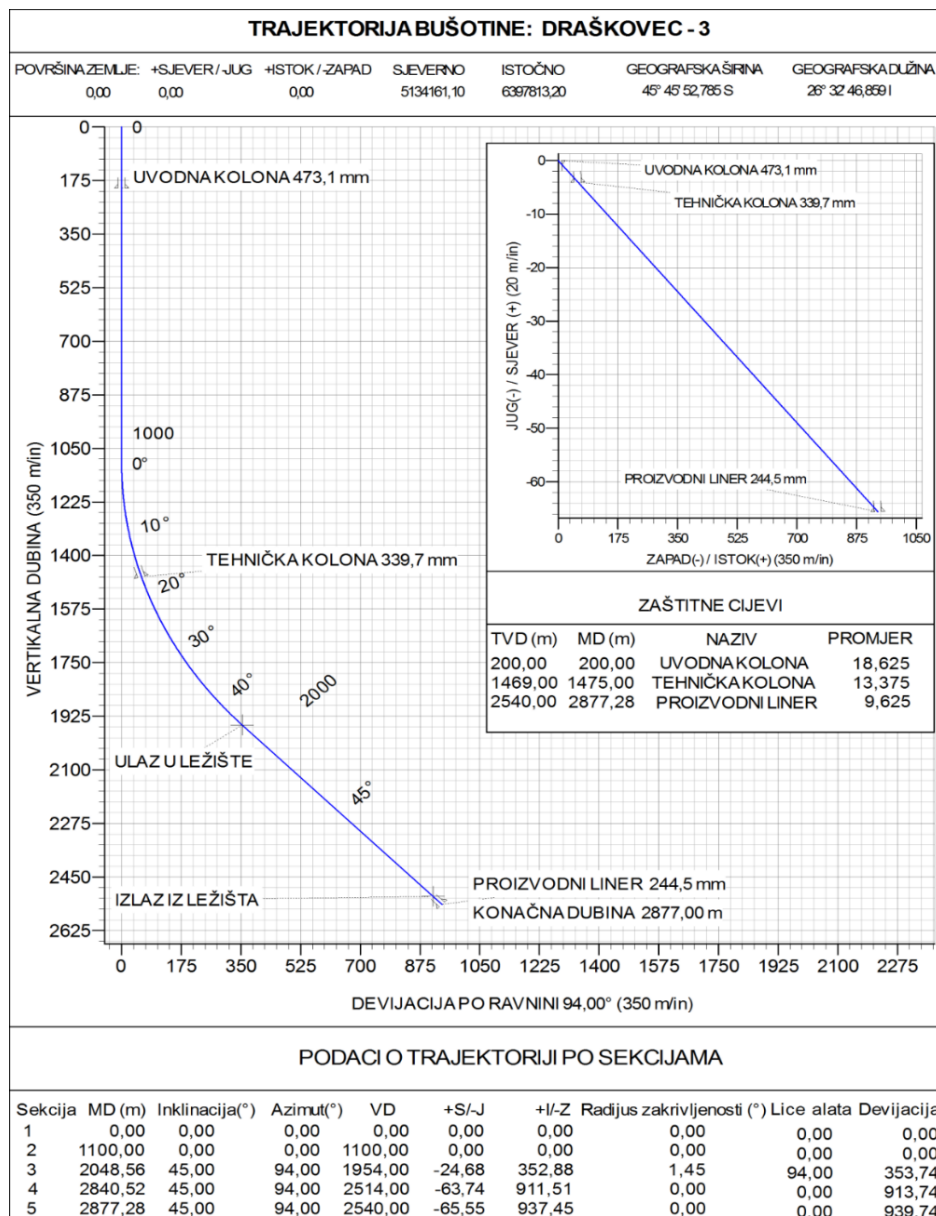
Nakon njene ugradnje i cementacije nastaviti će se bušenje dlijetom promjera 444,5 mm (17 1/2") vertikalno do 1100 m te nakon toga slijedi koso usmjerena sekcija (BUR=3°/30 m) do maksimalnog kuta otklona od 45°, do 1475 m, tj. TVD 1469 m. Bušenje će se izvoditi uz ispiranje KCl isplakom gustoće 1150-1200 kg/m<sup>3</sup>. Tehnička kolona vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8") ugraditi će se od ušća do 1475 m te će se za njenu cementaciju koristiti cement API klase G. Tehnička kolona služiti će za učvršćivanje ušća bušotine i premoštenje mekih do srednje tvrdih litoloških slojeva.

Bušenje kanala za proizvodnu kolonu (lajner) obaviti će se dlijetom promjera 311,1 mm (12 1/4") uz ispiranje drill-in fluidom gustoće 1070 kg/m<sup>3</sup>. Nastavlja se pravocrtno nakon tehničke kolone uz maksimalni kut otklona od 45 ° do TVD 2540 m. Proizvodna kolona zaštitnih cijevi cijevi je lajner vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8"), koja slijedi koso usmjerenu trajektoriju. Lajner će biti ugrađen od oko 50 m preklopa (učvršćen vješanjem) iznad pete tehničke kolone zaštitnih cijevi (TVD 1420 m) vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8") do vertikalne dubine ležišta na TVD 2540 m, što zahvaća kompletnu debljinu ležišta. Za cementaciju ove kolone koristiti će se CO<sub>2</sub> otporan cement s vrhom cementnog kamena na MD 1425 m (GRP - AAT Geothermae, 2017).

U tablici 3-2 prikazani su osnovni podaci o konstrukciji bušotine Draškovec-3.

Tablica 3-2. Konstrukcija bušotine Draškovec-3 (GRP - AAT Geothermae, 2017)

Duljina (MD)	Promjer dlijeta	Zaštitne cijevi	Dubina ugradnje z.c. (MD)	Vrh cementnog kamena	Tip i gustoća isplake
m	mm/inch		M	m	kg/m <sup>3</sup>
0 – 200	584,2 mm (23")	Uvodna kolona 473,1 mm (18 5/8") 118,6daN/m (87,5 lb/ft) K-55 BTC	0 – 200	0 (G cement)	Bent. susp. 1040 – 1100
200 – 1475 KOP 1100	444,5 mm (17 1/2")	Tehnička kolona 339,7 mm (13 3/8") 105,1 daN/m (72 lb/ft) L-80 13Cr BTC	0 – 1475	0 (G cement)	KCl 1150 – 1200
1475 – 2877	311,1 mm (12 1/4")	Proizvodni lajner 244,5 mm (9 5/8") 68,6 daN/m (47 lb/ft) L-80 13 Cr BTC	1425-2877	1425 (CO <sub>2</sub> otporan cement)	Drill-in 1070



3-1. Trajektorija bušotine Draškovec-3 (GRP - AAT Geothermae, 2017)

KONSTRUKCIJA DRAŠKOVEC-3	NAZIV	DUBINA - MD
	RAZINA ZEMLJE (0,00 m)	
	VRH CEMENTNOG KAMENA	
	UVODNA KOLONA 473,1 mm (18 5/8"); 127,7 kg/m (87,5 lb/ ft) K-55; BTC	200,00 m
	VRH VJEŠALICE PROIZVODNOG LAJNERA 244,5 mm (9 5/8") 68,6 kg/m (47 lb/ft) L-80 13Cr BTC	1425,00 m / 1421,09 m
	VRH CEMENTNOG KAMENA	
TEHNIČKA KOLONA 339,7 mm (13 3/8"); 105,1 kg/m (72 lb/ft) L-80 BTC	1475,00 m / 1469,00 m	
PROIZVODNI LAJNER 244,5 mm (9 5/8"); 68,6 kg/m (47 lb/ft); L-80; 13Cr BTC	2877,00 m / 2450,00 m	

Slika 3-2. Konstrukcija bušotine Draškovec-3 (Glavni rudarski projekt - AAT Geothermae, 2017)

### 3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Laboratorijska ispitivanja provedena u svrhu dizajna cementne kaše za bušotinu Draškovec – 3 provedena su u Laboratoriju za cementaciju tvrtke „Crosco naftni servisi d.o.o.“ u Ivanić-Gradu. Ispitivane su cementne kaše za cementaciju uvodne kolone vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8"), tehničke kolone vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8") te proizvodnog lajnera vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8").

#### 3.1. CEMENTNA KAŠA

Dizajn cementne kaše i njenih svojstava te postupak cementacije moraju se planirati i izvesti s obzirom na specifične bušotinske uvjete za odabranu bušotinu. Prilikom cementacije potrebno je znati točne vrijednosti temperature u optoku na dnu bušotine (BHCT) (engl. *Bottomhole Circulating Temperature*) jer ona utječe na svojstva cementne kaše (vrijeme zgušnjavanja, reološka svojstva, filtraciju). Na dizajn cementne kaše osim temperature na dnu bušotine, utječe i dubina bušotine, tip isplake, vrijeme protiskivanja, kvaliteta vode za pripremu kaše, veličina filtracije, režim protjecanja, taloženje čestica i količina slobodne vode, kvaliteta cementa, praškasti i tekući aditivi, razvoj čvrstoće te kvaliteta laboratorijskih ispitivanja i opreme (Kiprotich Bett, 2010).

##### 3.1.1. Cement

Za pripremu cementne kaše za cementaciju kolona zaštitnih cijevi u geotermalnim bušotinama najčešće se koristi Portland cementa API klase G. Portland cement je hidratno vezivo koje se proizvodi od Portland cementnog klinkera. Portland cementni klinker se dobiva taljenjem sirovina u rotacijskoj peći koje sadrže CaO i SiO<sub>2</sub>, te u manjoj mjeri Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Osim navedenih sastojaka javljaju se i sljedeći oksidi: MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, FeO i SO<sub>3</sub> (Sedić, 2017). Osnovne komponente Portland cementa su minerali klinkera trikalcij-silikat (C<sub>3</sub>S), dikalcij-silikat (C<sub>2</sub>S), trikalcij-aluminat (C<sub>3</sub>A), te tetrakalcij-alumoforit (C<sub>4</sub>AF). U trenutku miješanja Portland cementa s vodom, minerali klinkera hidratiziraju i nastaju novi spojevi od kojih su najvažniji hidrosilikati kalcija (CSH) i kalcijev hidroksid (Ca(OH)<sub>2</sub>). Hidrosilikati kalcija daju cementnom kamenu potrebnu čvrstoću i predstavljaju primarni vezivni materijal.

Cement API klase G namijenjen je za upotrebu kao osnovni bušotinski cement s kojim se priprema cementna kaša koja se koristi za cementaciju kolona zaštitnih cijevi od površine do 2440 m bez dodataka, a s dodatkom ubrzivača ili usporivača može pokrivati veći raspon dubina i temperatura (Gaurina-Međimurec, 2017).

### **3.1.2. Aditivi u cementnoj kaši**

Uz vodu i cement koji predstavljaju osnovu svake cementne kaše dodaju se aditivi. Aditivi koji se dodaju mogu se podijeliti u 8 grupa:

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

#### **3.1.2.1. Ubrzivači**

Ubrzivači su aditivi koji se dodaju kako bi se cementnoj kaši skratilo vrijeme zgušnjavanja te ubrzao proces očvršćavanja u cementni kamen. Oni imaju važnu ulogu u plitkim, niskotemperaturnim bušotinama gdje cementne kaše moraju imati kratko vrijeme zgušnjavanja te visoku početnu čvrstoću. Najčešće korišteni ubrzivači su kalcijev klorid koji se dodaje u količini od 1,5 do 2,0 % BWOC (količina na cement) te natrijev klorid koji se dodaje u količini od 2,0 do 2,5% BWOC (Kiprotich Bett, 2010).

#### **3.1.2.2. Usporivači**

Usporivači su aditivi koji se koriste kako bi se produljilo vrijeme zgušnjavanja cementne kaše te kako bi se kaša održala viskoznom i pumpabilnom. Koriste se u dubokim bušotinama gdje se temperatura na dnu u cirkulaciji (BHCT) očekuje da će biti visoka (Kiprotich Bett, 2010). Važno je napomenuti kako oni ne smanjuju krajnju tlačnu čvrstoću cementnog kamena već samo usporavaju brzinu razvoja njegove čvrstoće. Najčešće korišteni usporivač je kalcijev lignosulfonat koji se dodaje u količini od 0,1 do 1,5% BWOC (količina na masu cementa) (Gaurina-Međimurec, 2017).



### 3.1.2.3. Oteživači

Oteživači su aditivi koji se dodaju kako bi se povećala gustoća cemente kaše. Uz tu primarnu zadaću, služe kako bi se neznatno povećala viskoznost kaše, poboljšalo istiskivanje isplake, spriječilo smanjenje postignute tlačne čvrstoće cementnog kamena, neznatno smanjila konačna tlačna čvrstoća kamena te smanjila propusnost cementnog kamena (Gaurina-Međimurec, 2017). Glavni kriteriji za izbor oteživača su: gustoća oteživača mora biti veća od gustoće cementa, mala potreba za vodom, moraju biti kemijski inertni u cementnoj suspenziji (PetroWiki, 2018) te raspodjela veličine čestica oteživača mora biti kompatibilna s raspodjelom veličine čestica cementa jer veće čestice teže taloženju, a manje povećavaju viskoznost kaše (Nelson, 1990).

### 3.1.2.4. Olakšivači

Olakšivači su aditivi koji se upotrebljavaju za smanjenje gustoće te se time smanjuje tlak stupca cementne kaše i hidrodinamički tlak tijekom cementacije. Također služe za povećanje volumena cementne kaše po jedinici mase cementa te se time smanjuje cijena cementne kaše zbog smanjenja potrebne količine cementa. Smanjenjem gustoće smanjuje se i konačna tlačna čvrstoća cementnog kamena (Kiprotich Bett, 2010).

### 3.1.2.5. Dispergatori

Dispergatori su aditivi za smanjenje trenja te poboljšavaju reološka svojstva. Zbog toga, njihovom primjenom moguće je izraditi i protisnuti u prstenasti prostor cementne kaše veće gustoće bez značajnijih gubitaka tlaka na svladavanje otpora tijekom njihovog protjecanja. Na taj način se može znatno smanjiti ukupni tlak na dno tijekom cementacije uz zadržavanje potrebne gustoće cementne kaše (Sedić, 2017). Također, smanjuju filtraciju kod cementnih kaša koje su pripravljene s manje vode te pospješuju turbulentno protjecanje pri manjim dobavama (Gaurina-Međimurec, 2017). Prilikom pripreme cementne kaše treba se pripaziti na koncentraciju dispergatora koji se dodaje jer se povećanjem njegove koncentracije povećava izdvajanje slobodne vode.

### 3.1.2.6. Aditivi za smanjenje filtracije

U trenutku kada se cementna kaša nađe u kontaktu s propusnim ležišnim stijinama dolazi do filtracije. Vodena faza iz cementne kaše prodire u propusnu stijenu pod

djelovanjem diferencijalnog tlaka te se u utisnutoj cementnoj kaši povećava količina čvrstih čestica (filtrat). Smanjenjem volumena vodene faze, povećava se gustoća cemente kaše te se njezina svojstva (reološka svojstva, vrijeme zgušnjavanja, pumpabilnost itd.) razlikuju od početnog dizajna. Ukoliko znatna količina filtrata iz cementne kaše prođe u stijenu, kaša postaje nepumpabilna (Nelson, 1990). Za smanjenje filtracije dodaju se aditivi koji služe za sprječavanje: (1) prerane dehidracije cementne kaše u prstenastom prostoru jer ona može dovesti do čepljenja prstenastog prostora i nepotpunog smještanja cemente kaše, (2) promjene reoloških svojstava te (3) oštećenja ležišnih stijena filtratom cementne kaše (Gaurina-Međimurec, 2017).

#### 3.1.2.7. Antipjenušavci

Zapjenjene cementne kaše često geliraju što u bušotini može uzrokovati zone nižeg hidrostatičkog tlaka i shodno tome pore koje su ispunjene zrakom unutar stupca cementne kaše (Sedić, 2017). Mjerači gustoće cementne kaše nalaze se na površini i ukoliko je u cementnoj kaši zarobljen zrak, izmjerena gustoća bit će manja od gustoće u bušotini jer će se zarobljeni zrak u bušotini komprimirati pod utjecajem tlaka. Veća gustoća od planirane može uzrokovati lom ležišnih stijena i gubitak cementne kaše u okolne stijene. Antipjenušavci se koriste za smanjenje pjenjenja cementne kaše i smanjenje zasićenja zrakom tijekom miješanja cementne kaše.

Uz gore navedene aditive, u sastavu cementnih kaša su lateks i „Microblock“.

#### Mikrolateks

Uz navedene aditive u ovom istraživanju korišten je i mikrolateks. On predstavlja emulziju polimera. Mikrolateks je aditiv koji se dodaje u svrhu poboljšanja svojstava cementnog kamena. Ukoliko u strukturi cementnog kamena dolazi do širenja pukotina to za posljedicu ima smanjenje tlačne čvrstoće te povećanje propusnosti. Dodatkom mikrolateksa u cementnu kašu dolazi do obavijanja minerala klinkera C-S-H čime se zbog velike elastičnosti mikrolateksa premošćuju nastale pukotine. Kao rezultat, tlačna čvrstoća cementnog kamena se povećava, a propusnost smanjuje (Nelson, 1990). Također, njegovim dodavanjem smanjuje se potrebna količina vode za izradu cementne kaše te se povećava udio čvrstih čestica za 20% do 30%.

Cementni kamen s dodatkom lateksa ima (Sedić, 2017):

- manju propusnost,
- veću elastičnost,
- manju sklonost smanjenju obujma te
- kvalitetniju vezu s kolonom zaštitnih cijevi i stijenkama kanala bušotine.

„Microblock“

„Microblock“ je tekući aditiv suspenzije kvarcnog praha u vodi. Može se koristiti kao olakšivač za cementne kaše male gustoće te kao aditiv za povećanje tlačne čvrstoće cementnog kamena u cementnim kašama male gustoće pri niskim temperaturama. Pogodan je za primjenu u bušotinama s temperaturom u optoku na dnu bušotine (BHCT) između 16°C i 204°C (Halliburton, 2018).

## **3.2. OPIS PRIPREME I ISPITIVANJE SVOJSTAVA CEMENTNIH KAŠA I CEMENTNOG KAMENA**

### **3.2.1. Priprema i ispitivanje cementne kaše**

Laboratorijska ispitivanja koja su rađena za potrebe diplomskog rada uključivala su pripremu cementnih kaša za cementaciju kolona zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") i 339,7 mm (13 3/8") te pripremu četiriju različitih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") s ciljem postizanja što veće otpornosti cementnog kamena prema CO<sub>2</sub>. Cementne kaše za navedene kolone trebale su posjedovati svojstva koja omogućuju njihovu primjenu u bušotinskim uvjetima.

Provedena laboratorijska ispitivanja svojstava cementnih kaša prate smjernice API standarda odnosno radne upute 10 B (Recommended Practice 10 B, 1997).

Ispitivanje cementne kaše uključivalo je mjerenje gustoće, reoloških svojstava, slobodne vode, filtracije, vremena zgušnjavanja, slobodne vode te tlačne čvrstoće. Ispitivanje cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") uključivalo je mjerenje poroznosti, propusnosti, tlačne čvrstoće te premazivanje uzoraka cementnog kamena fenolftaleinom u svrhu određivanja prodora ugljikovog dioksida.

Priprema cementnih kaša sastojala se od vaganja sastojaka na elektronskoj vagi (razred točnosti ±0,01 g), mjerenja volumena vode (korištena je vodovodna voda) te miješanja. Miješanje cementnih kaša razlikovalo se od preporučene metode prilikom pripreme za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") jer su one sadržavale mikrokuglice koje imaju tendenciju pucanja prilikom miješanja u klasičnoj miješalici (mikseru). Stoga su one miješane u laboratorijskoj miješalici s metalnim lopaticama s brzinama od 200 do 1000 o/min. Nakon pripreme cementnih kaša slijedilo je ispitivanje njihovih svojstava.

Gustoća cementne kaše mjerena je vagom za isplaku (slika 4-1 a) te je bilo važno istisnuti eventualno zarobljeni zrak zbog kojeg se mogu dobiti netočne vrijednosti gustoće.

Za mjerenje reoloških svojstava korišten je viskozimetar OFITE model 800 (slika 4-1 b). Mjerenje je vršeno dva puta za svaku kašu; za cementnu kašu za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") pri sobnoj temperaturi i pri 29 °C, ; za cementu kašu za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8") pri sobnoj temperaturi i pri 47 °C te za cementnu kašu za cementaciju kolone

zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") pri sobnoj temperaturi i pri 88 °C. Očitane vrijednosti smičnog naprezanja pri 3, 6, 30, 60, 100, 200, 300 okretaja u minuti. Očitane vrijednosti množenjem s koeficijentom 0,51 daju vrijednosti smičnog naprezanja u Pa.

Vrijeme zgušnjavanja mjereno je HTHP konzistometrom (slika 4-1 c) gdje su dobiveni podaci konzistencije cementnih kaša. Početkom zgušnjavanja smatra se vrijeme koje protekne od trenutka primjene tlaka i temperature do trenutka kad cementna kaša postigne konzistenciju od 40 Bc (Gaurina-Međimurec, 2017).

Izdvajanje slobodne vode iz cementne kaše mjereno je u sušioniku (slika 4-1 d) u koji je stavljena graduirana staklena menzura u koju je ulivena cementna kaša do oznake 250 ml. Cementna kaša je prethodno zagrijana u atmosferskom konzistometru. Cementna kaša za cementaciju zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") u sušionik je stavljena pri sobnoj temperaturi, cementna kaša za cementaciju zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8") zagrijana je na 47 °C, a cementna kaša za cementaciju zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") zagrijana je na 80 °C. Menzura je zatvorena sa staklenim čepom te je ostavljena u sušioniku 2 sata kako bi se nakon toga očitala vrijednost slobodne vode.

Za ispitivanje filtracije korištena je visokotlačna i visokotemperaturna filter preša (HTHP filter preša) (slika 4-1 e) u koju je ulivena prethodno zagrijana i kondicionirana cementna kaša u atmosferskom konzistometru. Cementna kaša za cementaciju zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") nije prethodno zagrijavana te je mjerenje filtracije vršeno pri sobnoj temperaturi, cementna kaša za cementaciju zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8") zagrijana je na 47 °C, a cementna kaša za cementaciju zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") zagrijana je na 88 °C. Mjerenje je trajalo 30 minuta, a rezultati su prikazani u ml/30 min. Dobiveni podatak pokazuje količinu izdvojene tekuće faze odnosno filtrata iz cementne pod djelovanjem diferencijalnog tlaka od 6,89 MPa (1000 psi). Filter medij bio je filter papir.



a)



b)



c)



d)



e)

Slika 4-1. Korištena laboratorijska oprema: a) vaga za mjerenje gustoće cementne kaše, b) viskozimetar OFITE model 800, c) HTHP konzistometar, d) sušionik, e) filter preša

### 3.2.2. Priprema i ispitivanje cementnog kamena

Ispitivanje cementnog kamena uključivalo je ispitivanje čvrstoće cementnog kamena nedestruktivnom i destruktivnom metodom, ispitivanje poroznosti i propusnosti.

Ispitivanje čvrstoće cementnog kamena nedestruktivnom metodom korištenjem ultrazvučnog analizatora (UCA) (slika 4-2.) predstavlja mjerenje pri simuliranim bušotinskim uvjetima. Cementna kaša postavlja se u visokotlačnu ćeliju te se mjeri brzina prolaska ultrazvučnog vala kroz cementnu kašu odnosno nakon očvršćavanja kroz cementni kamen. Ultrazvučni analizator povezan je s kompjutorskim programom koji mjeri vrijeme prolaska signala kroz cementni kamen u ovisnosti o vremenu i na temelju tih podataka interpolira vrijednosti tlačne čvrstoće ispitivane cementne kaše.



Slika 4-2. Ultrazvučni analizator (UCA)

Destruktivna metoda za određivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena podrazumijeva primjenu maksimalnog opterećenja pri kojem uzorak cementnog kamena puca. Za mjerenje tlačne čvrstoće koristi se hidraulička preša (slika 4-3.) koja ostvaruje silu na uzorak pri konstantnoj brzini dok se uzorak ne razruši.



Slika 4-3. Hidraulička preša Versa Tester 30M

Poroznost cementnog kamena je određena volumetrijskom metodom na plinskom porozimetru tvrtke Core Laboratories korištenjem dušika za popunjavanje povezanog pornog prostora. Mjerenje se zasniva na Boyle-ovom zakonu ekspanzije plina odnosno metoda uključuje ekspanziju plina iz referentne ćelije poznatog obujma u ćeliju s uzorkom.

Propusnost je određena na plinskom permeametu tvrtke Core Laboratories prikazanom na slici 4-4. , mjerenjem pada tlaka pri protoku zraka kroz uzorak poznate površine presjeka i duljine.



Slika 4-4. Plinski permeametar tvrtke Core Laboratories (CoreLab, 2019)



### 3.3. REZULTATI ISPITIVANJA SVOJSTAVA CEMENTNIH KAŠA

U sljedećim podpoglavljima prikazani su rezultati ispitivanja svojstava razdjelnica i cementnih kaša potrebnih za cementaciju bušotine Draškovec-3. Radi kraćih naslova poglavlja, slika i tablica vanjski promjeri kolona zaštitnih cijevi bit će prikazani u inchima.

#### 3.3.1. Sastav i svojstva cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera (18 5/8" )

Za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera (18 5/8") korištena je „Scavenger“ cementna kaša (1) i repna cementna kaša (2A). U tablici 4-1. prikazan je sastav pripremljenih cementnih kaša.

Tablica 4-1. Sastav cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Sastav	Cementna kaša	
	„Scavenger“	Repna
	Količina (g)	
Cement API klasa G	320,00	800,00
	Količina na masu cementa % (g)	
Voda	160,00 (512,00 g)	44,00 (352,00 g)
Dodaci		
Bentonit	3,20 (10,24 g)	
Antipjenušavac	0,20 (0,64 g)	
Kalcijev klorid		0,50 (4,00 g)

„Scavenger“ cementna kaša utiskuje se nakon isplake i prije cementne kaše. Ona služi kao razdjelnica kako bi se smanjilo zagađenje cementne kaše isplakom te kako bi se isplaka lakše uklonila iz prstenastog prostora s minimalnim oštećenjem formacije. Prednosti korištenja „Scavenger“ cementne kaše su: jednostavnost dizajna, niska cijena, mogućnost podešavanja gustoće u realnom vremenu (Duckworth, 2011).

- a) Gustoća cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Gustoće cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" prikazane su u tablici 4-2.

Tablica 4-2. Vrijednosti gustoće cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Svojstvo		Cementna kaša	
		„Scavenger“	Repna
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	1350	1910

Prema prikazanim rezultatima mjerenja vidljivo je da „Scavenger“ cementna kaša ima znatno nižu gustoću od repne cementne kaše. Repna cementna kaša treba imati veću gustoću kako bi se izolirale rastresite naslage osiguravajući kratko vrijeme zgušnjavanja te veću tlačnu čvrstoću cementnog kamena (IADC, 2018).

- b) Reološka svojstva cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Za određivanje reoloških svojstava „Scavenger“ cementne kaše provedeno je mjerenje pri 23 °C prije i nakon kondicioniranja u atmosferskom konzistometru, a repne cementne kaše pri 23 °C i 29 °C. Očitane vrijednosti smičnih naprezanja izražene u lb /100 ft<sup>2</sup> pri brzinama rotacije od 3 do 300 o/min te 200 do 3 o/min prikazane su u tablici 4-3. i 4-4. U tablici 4-5. prikazane su prosječne vrijednosti smičnih naprezanja izražene u Pa pri smičnim brzinama od 5,1 do 510 s<sup>-1</sup>. Navedene vrijednosti smičnih brzina izražene u s<sup>-1</sup> dobivene su množenjem brzina rotacije (o/min) koeficijentom 1,7. Na slici 4-5. prikazane su prosječne vrijednosti smičnih naprezanja ispitanih cementnih kaša. Preko očitanih vrijednosti na Fann viskozimetru putem softwera je moguće izračunati otpore protjecanju. U ovome radu to nije izračunato jer prikaz otpora protjecanju nije bio primarni cilj rada.

Tablica 4-3. Očitane vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

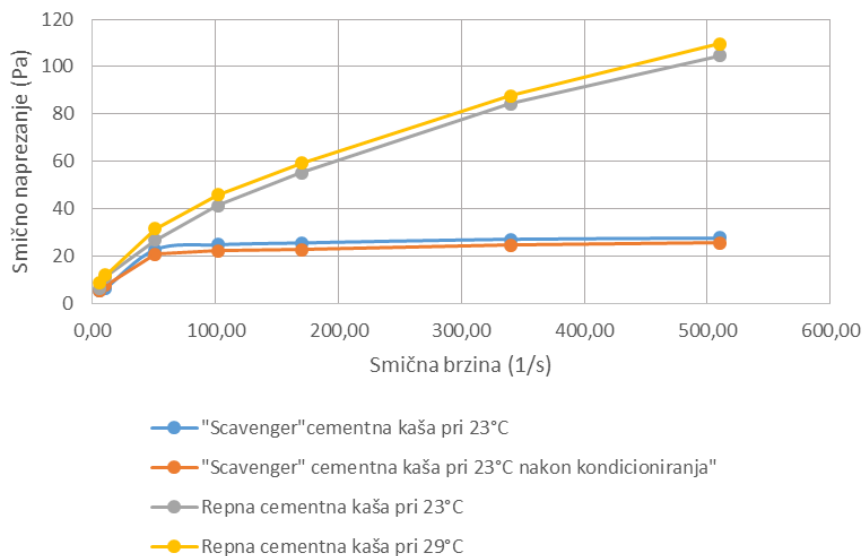
Brzina rotacije (o/min)	Smično naprezanje pri brzinama rotacije od 3 do 300 o/min (lb/100ft <sup>2</sup> )			
	„Scavenger“ cementna kaša		Repna cementna kaša	
	23 °C	23 °C	23 °C	29 °C
3	11	8	12	17
6	13	13	22	22
30	44	40	53	59
60	49	43	82	90
100	50	44	112	117
200	53	48	175	175
300	54	50	205	215
200	53	48	156	169
100	50	45	104	115
60	48	44	80	90
30	45	41	52	64
6	11	17	22	25
3	10	13	13	17

Tablica 4-4. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Smična brzina (s <sup>-1</sup> )	Smično naprezanje pri smičnim brzinama od 5.1 do 510 s <sup>-1</sup> (Pa)			
	„Scavenger“ cementna kaša		Repna cementna kaša	
	23 °C	23 °C	23 °C	29 °C
5,1	5,61	4,08	6,12	8,67
10,2	6,63	6,63	11,22	11,22
51	22,44	20,4	27,03	30,09
102	24,99	21,93	41,82	45,9
170	25,5	22,44	57,12	59,67
340	27,03	24,48	89,25	89,25
510	27,54	25,5	104,55	109,65
340	27,03	24,48	79,56	86,19
170	25,5	22,95	53,04	58,65
102	24,48	22,44	40,8	45,9
51	22,95	20,91	26,52	32,64
10,2	5,61	8,67	11,22	12,75
5,1	5,1	6,63	6,63	8,67

Tablica 4-5. Prosječne vrijednosti smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Smična brzina (s <sup>-1</sup> )	Smično naprezanje pri smičnim brzinama od 5.1 do 510 s <sup>-1</sup> (Pa)			
	„Scavenger“ cementna kaša		Repna cementna kaša	
	23 °C	23 °C	23 °C	29 °C
5,1	5,36	5,36	6,38	8,67
10,2	6,12	7,65	11,22	11,96
51	22,7	20,66	26,78	31,37
102	24,74	22,19	41,31	45,9
170	25,5	22,7	55,08	59,16
340	27,03	24,48	84,41	87,72
510	27,54	25,5	104,55	109,65



Slika 4-5. Dijagram smičnih naprezanja „Scavenger“ i repne cementne kaše

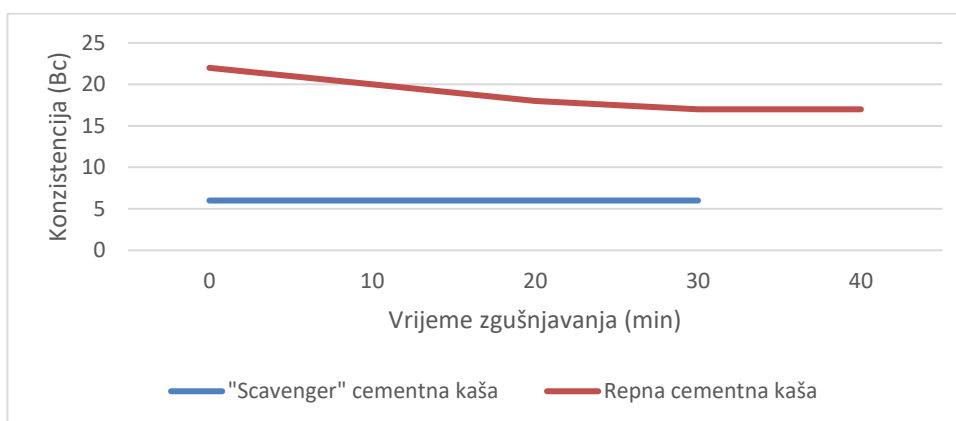
Na slici 4-5. vidljiva je razlika smičnih naprezanja „Scavenger“ i repne cementne kaše. Repna cementna kaša pokazala je znatno veće vrijednosti u odnosu na „Scavenger“ cementnu kašu. Uz to, vrijednosti smičnih naprezanja „Scavenger“ cementne kaše smanjile su se nakon kondicioniranja (pri istoj temperaturi) dok su se vrijednosti smičnih naprezanja repne cementne kaše neznatno povećale nakon njenog zagrijavanja i kondicioniranja u atmosferskom konzistometru.

- c) Konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Promjena konzistencije cementnih kaša s vremenom mjerena je u atmosferskom konzistometru. Određivanje konzistencije „Scavenger“ cementne kaše trajalo je 30 minuta pri sobnoj temperaturi (23 °C), a određivanje konzistencije repne cementne kaše pri 29 °C trajalo je 40 minuta. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4-6. i na slici 4-6.

Tablica 4-6. Vrijednosti konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Vrijeme ispitivanja (min)	Cementna kaša	
	„Scavenger“	Repna
	Konzistencija (Bc)	
0	6	22
10	6	20
20	6	18
30	6	17
40	-	17



Slika 4-6. Konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je kako „Scavenger“ cementna kaša ima konstantnu i nisku vrijednost konzistencije tijekom 30 minuta. Repna cementna kaša ima višu konzistenciju, ali nižu od 40 Bc te bi se mogla bez problema protisnuti na odgovarajuću dubinu.

d) Filtracija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Ispitivanje filtracije cementnih kaša odvija se 30 minuta pri tlaku od 6,9 MPa. Prilikom mjerenja filtracije „Scavenger“ i repne cementne kaše, filtrat se izdvojio u kraćem vremenu („Scavenger“ cementna kaša za 3 minute, a repna cementna kaša za 2 minute) te se u tom slučaju volumen filtrata računa prema sljedećoj formuli:

$$V_{30} = V_t \frac{5,477}{\sqrt{t}} \quad (4-1)$$

gdje su:

- $V_{30}$  - volumen filtrata nakon 30 minuta, ml  
 $V_t$  - volumen filtrata nakon vremena t, ml  
t - vrijeme ispitivanja, min

Tablica 4-7. Vrijednosti filtracije cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Svojstvo	Cementna kaša	
	„Scavenger“	Repna
Vrijeme ispitivanja (min)	3	2
$V_t$ (ml)	80	45
$V_{30}$ (ml)	253	174

Iz rezultata prikazanih u tablici 4-7. vidljivo je kako „Scavenger“ cementna kaša ima 30 – minutnu filtraciju veću nego repna cementna kaša čemu je razlog veća količina vode na količinu cementa (160% BWOC).

- e) Izdvajanje slobodne vode iz cementnih kaša za cementaciju 18 5/8" kolone zaštitnih cijevi

U tablici 4-8. prikazane su vrijednosti izdvajanja slobodne vode.

Tablica 4-8. Izdvajanje slobodne vode iz cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Svojstvo	Cementna kaša	
	„Scavenger“	Repna
Slobodna voda ml/250 ml	8	2

Prema rezultatima ispitivanja vidljivo je kako „Scavenger“ cementna kaša pokazuje 4 puta veće vrijednosti izdvojene vode u odnosu na repnu cementnu kašu.

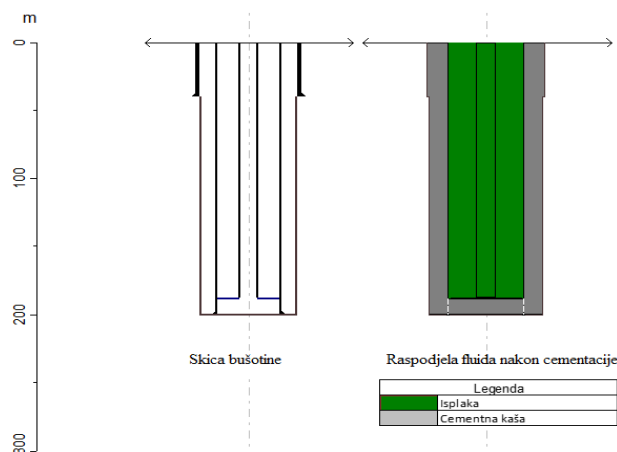
### 3.3.1.1. Postupak cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"

Postupak ugradnje, cementacije i ispitivanja hermetičnosti kolone zaštitnih cijevi opisan je u nastavku (GRP- AAT Geothermae, 2017):

1. Ugraditi kolonu zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") u bušotinu prema dnevniku ugradnje.
2. Utisnuti u niz zaštitnih cijevi otežanu isplaku prema računu balansa – plivanje kolone.
3. Ugraditi u kolonu zaštitnih cijevi bušaće šipke promjera 127,0 mm (5") s trnom i odsjesti u brtveni rukavac s ukupnim teretom bušaćih šipki - provjeriti hermetičnost niza.
4. Nadopuniti kolonu zaštitnih cijevi s otežanom isplakom do vrha.
5. Kondicionirati isplaku cirkulacijom u prstenastom prostoru (engl. *open hole*).
6. Ispitati hermetičnost tlačnih vodova tlakom od 150 bar.
7. Utisnuti u bušaće šipke 2 m<sup>3</sup> vode, a potom 4 m<sup>3</sup> razdjelnice gustoće 1350 kg/m<sup>3</sup> protokom 800 l/min („Scavenger“).
8. Miješati cementnu kašu i utiskivati ju protokom 900 l/min dok se cementna kaša ne pojavi na površini.
9. Protisnuti cementnu kašu iz bušaćih šipki.
10. Ispustiti tlak iz tlačnog voda i provjeriti povrat fluida.
11. Ako nema povrata izvući trn iz brtvenog rukavca.
12. Ako ima povrata, ne izvlačiti trn iz brtvenog rukavca dok se cementna kaša ne stvrdne.
13. Izvući bušaće šipke vanjskog promjera 127 mm (5") iz kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8").
14. Čekanje na stvrdnjavanje cementne kaše (TWOC) – 16 sati.
15. Ako padne razina cementne kaše izvesti dodatnu cementaciju prstenastog prostora metodom dolijevanja kroz prstenasti prostor između konduktor kolone i kolone zaštitnih cijevi promjera 473,1 mm (18 5/8").

Na slici 4-7. prikazana je raspodjela fluida u kanalu bušotine nakon cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8").





Slika 4-7 Raspodjela fluida u kanalu bušotine nakon cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 473,1 mm (18 5/8") (GRP - AAT Geothermae, 2017)

### 3.3.2. Sastav i svojstva razdjelnice i cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

U svrhu cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" korištene su razdjelnica, vršna i repna cementna kaša.

#### 3.3.2.1. Svojstva razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

U tablici 4-9. prikazan je sastav razdjelnice potrebne za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8".

Tablica 4-9. Sastav razdjelnice potrebne za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Sastav	Razdjelnica
	Količina (g)
Voda	530,00
	Količina na masu cementa g (%)
<b>Dodaci</b>	
Antipjenušavac	1,59 (0,30 %)
Bentonit	7,56 (1,43 %)
Spacer	12,10 (2,28 %)
KCl	15,90 (3,00 %)
Barit	212,00 (40,00 %)

Razdjelnica (engl. *spacer*) je fluid koji se utiskuje nakon isplake, a prije cementne kaše. Ona za cilj ima ukloniti zaostalu isplaku i isplačni oblog, ali i spriječiti prodor cementne kaše u pore i pukotine stijena te omogućiti kvalitetnu podlogu za nadolazeću cementnu kašu (Šango, 2017). Također, služi kako bi držala isplaku i cementnu kašu odvojenom te navlažila zaštitne cijevi za dobro prijanjanje cementne kaše (London, 2012).

- a) Gustoća razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Gustoća razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" iznosi 1300 kg/m<sup>3</sup> te je manja od vršne i repne cementne kaše.

- b) Reološka svojstva razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

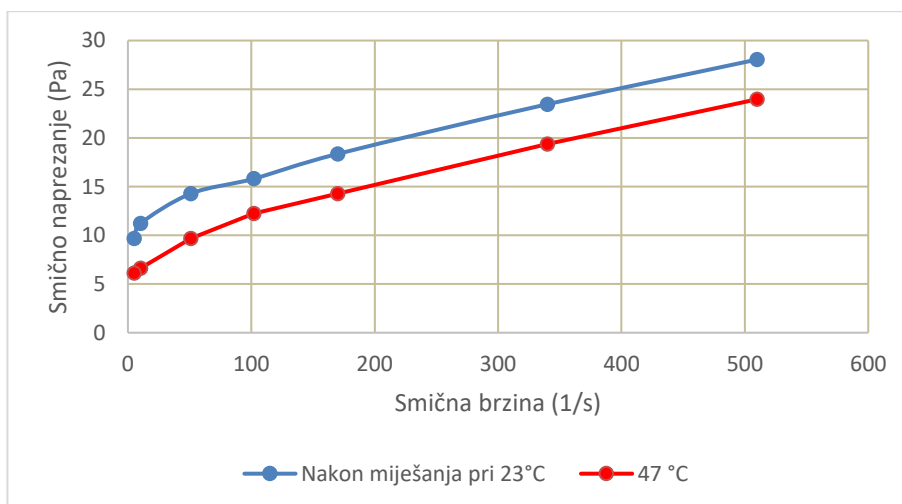
Ispitivanje reoloških svojstava razdjelnice mjereno je pri 23 °C te pri 47 °C. Rezultati ispitivanja smičnih naprezanja izraženi u lb /100 ft<sup>2</sup> pri brzinama rotacije od 300 do 3 o/min prikazani su u tablici 4-10. te izraženi u Pa pri brzinama rotacije od 510 do 5,1 s<sup>-1</sup> u tablici 4-11. Navedene vrijednosti smičnih brzina izražene u s<sup>-1</sup> dobivene su množenjem brzina rotacije (o/min) koeficijentom 1,7. U tablici 4 -10. i 4-11. te slici 4-8. prikazane su vrijednosti smičnih naprezanja ispitane razdjelnice.

Tablica 4-10. Očitane vrijednosti smičnog naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Smično naprezanje pri brzinama rotacije od 300 do 3 o/min (lb/100ft <sup>2</sup> )		
Brzina rotacije (o/min)	Razdjelnica	
	Nakon miješanja pri 23 °C	47 °C
300	55	47
200	46	38
100	36	28
60	31	24
30	28	19
6	22	13
3	19	12

Tablica 4-11. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Smična brzina ( $s^{-1}$ )	Smično naprezanje pri smičnim brzinama od 510 do 5.1 $s^{-1}$ (Pa)	
	Razdjelnica	
	Nakon miješanja pri 23 °C	47 °C
510	28,05	23,97
340	23,46	19,38
170	18,36	14,28
102	15,81	12,24
51	14,28	9,69
10,2	11,22	6,63
5,1	9,69	6,12



Slika 4-8. Dijagram smičnih naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Na slici 4-8. vidljivo je smanjenje smičnog naprezanja nakon zagrijavanja razdjelnice na 47°C.

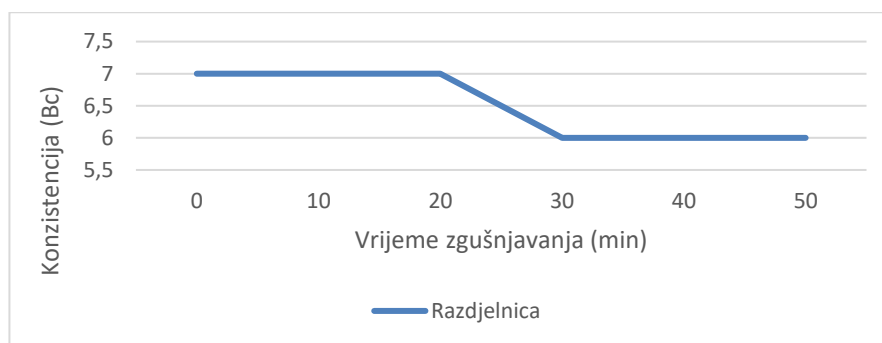
- c) Konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijev vanjskog promjera 13 3/8"

Promjena konzistencije razdjelnice s vremenom mjerena je u atmosferskom konzistometru. Određivanje konzistencije trajalo je 50 min te je mjereno na sobnoj

temperaturi (23 °C) te se razdjelnica zagrijavala do 47 °C. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4-12. i na slici 4-9.

Tablica 4-12. Vrijednosti konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijev vanjskog promjera 13 3/8"

Vrijeme ispitivanja (min)	Razdjelnica
	Konzistencija (Bc)
0	7
10	7
20	7
30	6
40	6
50	6



Slika 4-9. Konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je kako razdjelnica ima konstantnu vrijednost konzistencije od 7 Bc prvih 20 min te se nakon toga vrijednost smanjuje za 1 Bc (razdjelnica je postigla temperaturu od 47 °C). Nakon toga s protekom vremena konzistencija se ne mijenja i zadržava vrijednost od 6 Bc.

3.3.2.2. Sastav i svojstva cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

U tablici 4-13. prikazan je sastav vršne i repne cementne kaše potrebne za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8".

Tablica 4-13. Sastav razdjelnice potrebne za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Sastav	Cementna kaša	
	Vršna	Repna
	Količina (g)	
Cement API klasa G	450,00	740,00
	Količina na masu cementa % (g)	
Voda	105,00 (472,50 g)	38,00 (281,20 g)
<b>Dodaci</b>		
Bentonit	2,10 (9,45 g)	
Smanjivač filtracije	0,60 (2,70 g)	0,40 (2,96 g)
Usporivač	0,10 (0,45 g)	0,05 (0,37 g)
Antipjenušavac	0,30 (1,35 g)	0,20 (1,48 g)
Dispergator		0,70 (5,18 g)
„Microblock“		15,00 (111,00 g)

a) Gustoća cementnih kaša potrebnih za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Gustoća cementnih kaša određena je vagom za isplaku te su rezultati prikazani u tablici 4-14.

Tablica 4-14. Vrijednosti gustoća ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Svojstvo		Cementna kaša	
		Vršna	Repna
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	1490	1900

Iz tablice 4-14 vidljivo je da vršna cementna kaša ima manju gustoću od repne cementne kaše jer sadrži olakšivač bentonit i veću količinu vode.

b) Reološka svojstva ispitivanih cementnih kaša za cementaciju 13 3/8" kolone zaštitnih cijevi

Za određivanje reoloških svojstava cementnih kaša provedeno je mjerenje pri 23 °C te pri 47 °C. Očitane vrijednosti smičnih napreznja izražene u lb /100 ft<sup>2</sup> pri brzinama rotacije od 3 do 300 o/min te 200 do 3 o/min prikazane su u tablici 4-15. te su u tablici 4-16. prikazane vrijednosti smičnih napreznja izražene u Pa pri smičnim brzinama od 5,1 do 510 s<sup>-1</sup>. U tablici 4-17. prikazane su prosječne vrijednosti smičnih napreznja izražene u Pa pri smičnim brzinama od 5,1 do 510 s<sup>-1</sup>. Navedene vrijednosti smičnih brzina izražene u s<sup>-1</sup> dobivene su množenjem brzina rotacije (o/min) koeficijentom 1,7. Na slikama 4-10. i 4-11. prikazane su prosječne vrijednosti smičnih napreznja ispitanih cementnih kaša

Tablica 4-15. Očitane vrijednosti smičnog napreznja cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

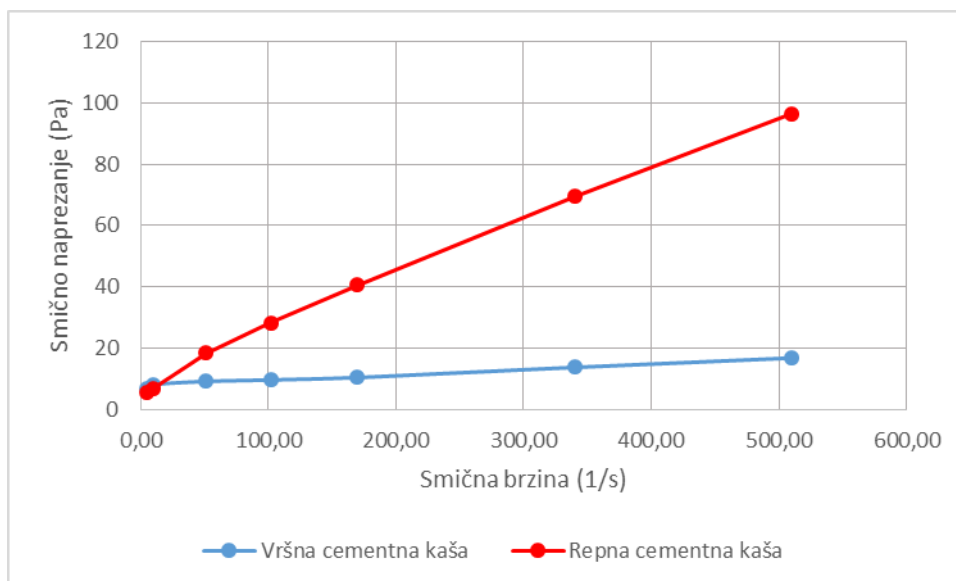
Brzina rotacije (o/min)	Smično napreznje pri brzinama rotacije od 3 do 300 o/min (lb/100ft <sup>2</sup> )			
	Vršna		Repna	
	23 °C	47 °C	23 °C	47 °C
3	11	10	15	4
6	16	16	19	8
30	18	24	45	30
60	19	25	64	53
100	20	26	87	79
200	27	31	143	137
300	33	35	189	186
200	27	30	129	130
100	21	26	72	73
60	19	25	47	48
30	18	24	27	27
6	16	22	8	7
3	15	16	6	5

Tablica 4-16. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

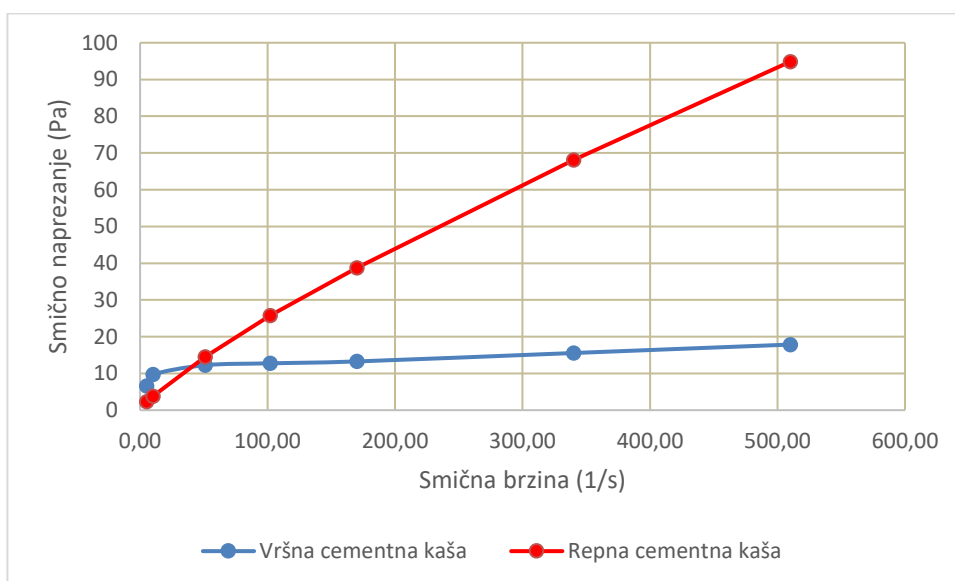
Smična brzina (s <sup>-1</sup> )	Smično naprezanje pri smičnim brzinama od 5.1 do 510 s <sup>-1</sup> (Pa)			
	Vršna		Repna	
	23 °C	47 °C	23 °C	47 °C
5,1	5,61	5,1	7,65	2,04
10,2	8,16	8,16	9,69	4,08
51	9,18	12,24	22,95	15,3
102	9,69	12,75	32,64	27,03
170	10,2	13,26	44,37	40,29
340	13,77	15,81	72,93	69,87
510	16,83	17,85	96,39	94,86
340	13,77	15,3	65,79	66,3
170	10,71	13,26	36,72	37,23
102	9,69	12,75	23,97	24,48
51	9,18	12,24	13,77	13,77
10,2	8,16	11,22	4,08	3,57
5,1	7,65	8,16	3,06	2,55

Tablica 4-17. Prosječne vrijednosti smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Smična brzina (s <sup>-1</sup> )	Smično naprezanje pri smičnim brzinama od 5.1 do 510 s <sup>-1</sup> (Pa)			
	Vršna		Repna	
	23 °C	47 °C	23 °C	47 °C
5,1	6,63	6,63	5,36	2,30
10,2	8,16	9,69	6,89	3,83
51	9,18	12,24	18,36	14,54
102	9,69	12,75	28,31	25,76
170	10,46	13,26	40,55	38,76
340	13,77	15,56	69,36	68,09
510	16,83	17,85	96,39	94,86



Slika 4-10. Dijagram prosječnih smičnih napreznaja ispitivanih cementnih kaša pri temperaturi 23 °C



Slika 4-11. Dijagram prosječnih smičnih napreznaja ispitivanih cementnih kaša pri temperaturi 47 °C

Na temelju rezultata prikazanih na slikama 4-10. i 4-11. repna cementna kaša ima veće vrijednosti smičnog napreznaja od vršne cementne kaše. Također, vršna cementna kaša ima manju promjenu smičnog napreznaja od trenutka pokretanja viskozimetra (3 o/min) do kraja mjerenja (300 o/min).

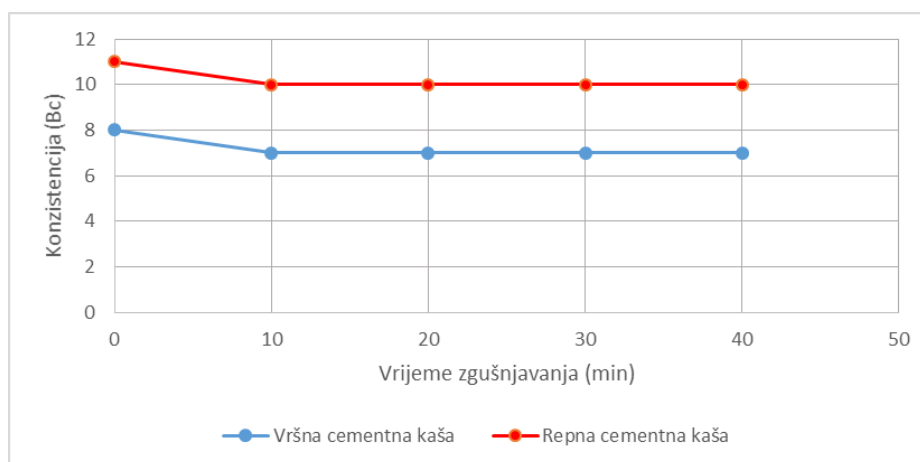


c) Konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Promjena konzistencije cementnih kaša s vremenom mjerena je u atmosferskom konzistometru pri temperaturi od 47 °C i atmosferskom tlaku. Određivanje konzistencije vršne i repne cementne kaše trajalo je 40 min. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4-18. i na slici 4-12.

Tablica 4-18. Vrijednosti konzistencije ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Vrijeme ispitivanja (min)	Cementna kaša	
	Vršna	Repna
	Konzistencija (Bc)	
0	8	11
10	7	10
20	7	10
30	7	10
40	7	10



Slika 4-12. Konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Prema rezultatima na slici 4-12. vidljivo je kako repna cementna kaša ima veću konzistenciju od vršne cementne kaše. Također kod obje cementne kaše došlo je do smanjenja konzistencije nakon 10 minuta kada su zagrijane do 38 °C te su tu vrijednost zadržale i nakon 20 minuta kada je temperatura povećana na 47 °C.

d) Filtracija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Ispitivanje filtracije cementnih kaša odvijalo se 30 minuta za repnu cementnu kašu te 6 minuta za vršnu cementnu kašu. Prilikom mjerenja filtracije cementnih kaša, filtrat se izdvojio u kraćem vremenu (za 6 minuta) te se u tom slučaju volumen filtrata računa prema formuli (4-1). Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4-19.

Tablica 4-19. Vrijednosti filtracije cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Svojstvo	Cementna kaša	
	Vršna	Repna
Vrijeme ispitivanja (min)	6	30
$V_t$ (ml)	110	30
$V_{30}$ (ml)	246	30

Iz rezultata prikazanih u tablici 4-19. uočava se velika razlika u količini izdvojenog filtrata. Repna cementna kaša nakon 30 minuta ispitivanja ima izdvojeno 30 ml filtrata dok se iz vršne cementne kaše izdvojilo 110 ml filtrata tijekom 6 minuta odnosno tijekom 30 minuta bi bilo izdvojeno otprilike 246 ml filtrata. Razlog tome je veća količina vode na masu cementa (105 % BWOC) u odnosu na količinu vode u repnoj cementnoj kaši ( 38% BWOC).

e) Izdvajanje slobodne vode iz cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Ispitivanje izdvajanja slobodne vode i cementnih kaša provedeno je u sušioniku te je mjerenje za svaku cementnu kašu trajalo 2 sata. Nakon proteklog vremena staklena graduirana menzura izvađena je iz sušionika te su zabilježeni rezultati koji su prikazani u tablici 4-20.

Tablica 4-20. Vrijednosti količine slobodne vode

Svojstvo	Cementna kaša	
	Vršna	Repna
Slobodna voda ml/250 ml	3	0

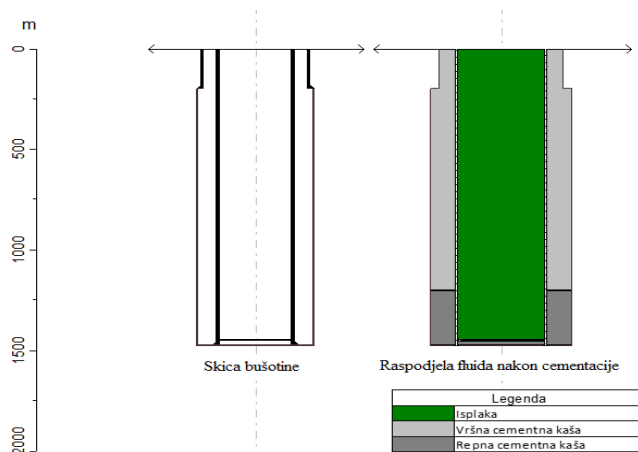
Prema rezultatima iz tablice 4-20. vidljivo je kako se iz repne cementne kaše nije izdvojila voda dok je iz vršne cementne kaše izdvojeno 3 ml/250ml.

### 3.3.2.3. Postupak cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Postupak ugradnje, cementacije i ispitivanja hermetičnosti kolone zaštitnih cijevi opisan je u nastavku (GRP- AAT Geothermae, 2017):

1. Ugraditi kolonu zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8") do dna bušotine. Navrnuti glavu za cirkulaciju i kondicionirati isplaku kako bi se postigle što manje vrijednosti plastične viskoznosti i naprezanja pri pokretanju.
2. Navrnuti cementacijsku glavu s čepovima i ispitati tlačne vodove tlakom od 250 bar.
3. Izmiješati razdjelnice u posebnim spremnicima.
4. Utisnuti u niz zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8") 2 m<sup>3</sup> kemijskog aditiva za prethodnicu, a potom 6 m<sup>3</sup> razdjelnice gustoće 1340 kg/m<sup>3</sup>.
5. Upustiti u kolonu zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8" prethodni čep.
6. Miješati cementnu kašu i utiskivati cementnu kašu u homogenizator te u kolonu zaštitnih cijevi protokom od 700 - 1 000 l/min.
7. Isprati cementacijske vodove prije protiskivanja cementne kaše.
8. Upustiti u kolonu zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8") nahodni čep.
9. Protisnuti cementnu kašu isplakom, protokom od 1 200 do 300 l/min.
10. Ispustiti tlak iz kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8"), provjeriti hermetičnost cijevne opreme, ostaviti cementacijsku glavu otvorenom.
11. Čekanje na stvrdnjavanje cementne kaše (TWOC) – 30 sati.

Na slici 4-13. prikazana je raspodjela fluida u kanalu bušotine nakon cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 (13 3/8").



Slika 4-13. Raspodjela fluida u kanalu bušotine nakon cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 339,7 mm (13 3/8'') (GRP - AAT Geothermae, 2017)

### 3.3.3. Sastav i svojstva razdjelnice i cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8''

U svrhu cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8'' potrebno je dizajnirati razdjelnicu te cementnu kašu. Za navedenu kolonu dizajnirat će se četiri različite cementne kaše označene kao 3A36, 3B10, 3D8 i 3E2 te će se na temelju rezultata izabrati najpovoljnija.

#### 3.3.3.1. Sastav i svojstva razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8''

U tablici 4-21. prikazan je sastav razdjelnice.

Tablica 4-21. Sastav razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8''

Sastav	Razdjelnica
	Količina (g)
<b>Voda</b>	404,00
	Količina na masu cementa (%)
<b>Dodaci</b>	
Antipjenušavac	1,21 (0,30 %)
Bentonit	6,92 (1,71 %)
Spacer	10,37 (2,57 %)
KCl	12,12 (3,00 %)
Kalcijev karbonat	323,00 (80,00 %)

- a) Gustoća razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Gustoća razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" iznosi 1400 kg/m<sup>3</sup> te je manja od cementne kaše koja slijedi nakon nje.

- b) Reološka svojstva razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

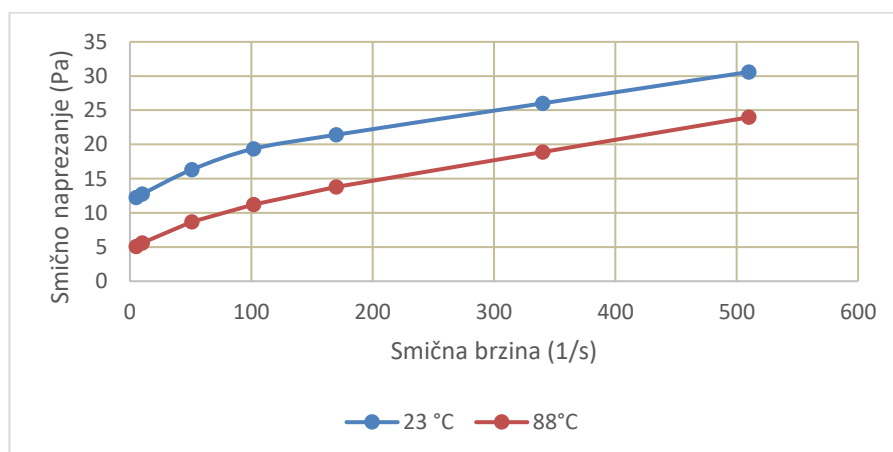
Za određivanje reoloških svojstava razdjelnice provedeno je mjerenje pri 23 °C (nakon miješanja razdjelnice) te pri 88 °C. Očitane vrijednosti smičnih napreznja izražene u lb /100 ft<sup>2</sup> pri brzinama rotacije od 300 do 3 o/min prikazane su u tablici 4-22. te su u tablici 4-23. prikazane vrijednosti smičnih napreznja izražene u Pa pri smičnim brzinama od 510 do 5,1 s<sup>-1</sup>. Navedene vrijednosti smičnih brzina izražene u s<sup>-1</sup> dobivene su množenjem brzina rotacije (o/min) koeficijentom 1,7. Na slici 4-14. prikazane su vrijednosti smičnih napreznja.

Tablica 4-22. Očitane vrijednosti smičnog napreznja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Smično napreznje pri brzinama rotacije od 300 do 3 o/min (lb/100ft <sup>2</sup> )		
Brzina rotacije (o/min)	Razdjelnica	
	23 °C	88 °C
300	60	47
200	51	37
100	42	27
60	38	22
30	32	17
6	25	11
3	24	10

Tablica 4-23. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Smično naprezanje pri smičnim brzinama od 510 do 5,1 s <sup>-1</sup> (Pa)		
Smična brzina (s <sup>-1</sup> )	Razdjelnica	
	23 °C	88 °C
510	30,6	23,97
340	26,01	18,87
170	21,42	13,77
102	19,38	11,22
51	16,32	8,67
10,2	12,75	5,61
5,1	12,24	5,1



Slika 4-14. Dijagram smičnih naprezanja razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

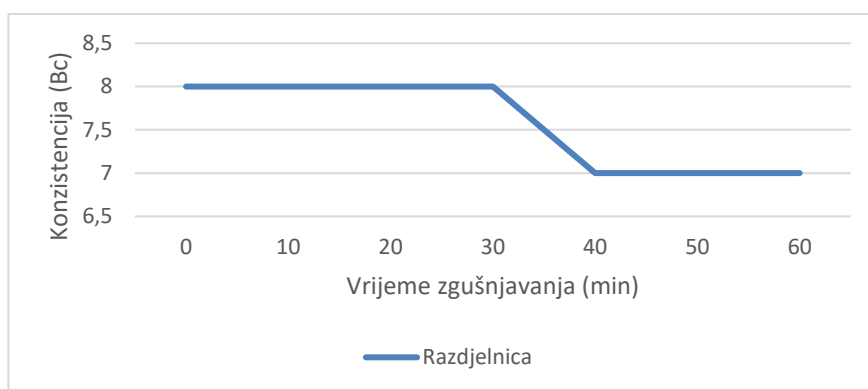
Sa slike 4-14. vidljivo je da se vrijednosti smičnog naprezanja razdjelnice s porastom temperature smanjuje.

- c) Konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Promjena konzistencije razdjelnice s vremenom mjerena je u atmosferskom konzistometru. Određivanje konzistencije trajalo je 60 min. Mjerenje je započelo pri sobnoj temperaturi (23 °C) te se razdjelnica zagrijavala do 88 °C. 88 °C je postignuto nakon 30 minuta. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4-24. i na slici 4-15.

Tablica 4-24. Vrijednosti konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

Vrijeme ispitivanja (min)	Razdjelnica
	Konzistencija (Bc)
0	8
10	8
20	8
30	8
40	7
50	7
60	7



Slika 4-15. Konzistencija razdjelnice za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je kako razdjelnica ima konstantnu vrijednost konzistencije od 8 Bc prvih 30 min te se nakon toga vrijednost smanjuje za 1 Bc (razdjelnica je postigla temperaturu od 88 °C). Nakon toga s protekom vremena konzistencija se ne mijenja i zadržava vrijednost od 7 Bc.

### 3.3.3.2. Sastav i svojstva cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Dizajniranje sastava cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" uključivalo je dizajn četiriju različitih cementnih kaša te je njihov sastav prikazan u tablici 4-25. Različit sastav cementnih kaša za cilj je imao ukazati na utjecaj određenih komponenti (aditiva) na svojstva cementne kaše te u konačnici pokazati koji cementni kamen pokazuje najbolju otpornosti prema CO<sub>2</sub>. Dizajnirane kaše označene su: 3A36, 3B10, 3D8 te 3E2 pri čemu je značenje oznake sljedeće:

- 3: treća kolona zaštitnih cijevi
- A,B,D,E: tip kaše
- 36, 10, 8, 2: broj ispitivane varijante tipa kaše.

Osnova cementnih kaša 3A36, 3B10 i 3E2 bio je cement API klase G s mikrokuglicama, a za cementnu kašu 3D8 je bio je cement API klase G s mikrokuglicama uz dodatak kvarca. U cementnu kašu 3A36 za razliku od cementne kaše 3B10 dodan je mikrolateks. Cementna kaša 3D8 je svojim sastavom (korištenim aditivima) jednaka cementnoj kaši 3B10 te je u nju dodan kvarc. Cementna kaša 3E2 svojim sastavom u potpunosti se razlikuje od cementnih kaša 3A36, 3B10 te 3D8. Ona ne sadrži „Microblock“ niti mikrolateks.



Tablica 4-25. Sastav cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Sastav	Cementna kaša			
	3A36	3B10	3D8	3E2
<b>Cement + aditivi</b>	<b>Količina (g)</b>			
Cement API klasa G	583,00	583,00	540,00	600,00
Mikrokuglice				
Kvarc	-	-		-
<b>Voda i aditivi</b>	<b>Količina na masu cementa (%)</b>			
Voda	36,00 (209,88 g)	50,00 (291,50 g)	37,00 (199,80 g)	54,00 (324,00 g)
Usporivač zgušnjavanja	0,13 (0,76 g)	0,30 (1,75 g)	0,30 (1,62 g)	0,30 (1,80 g)
„Microblock“	20,00 (116,60 g)	20,00 (116,60 g)	15,00 (81,00 g)	
Antipjenušavac	0,40 (2,33 g)	0,40 (2,33 g)	0,40 (2,16 g)	0,40 (2,40 g)
Mikrolateks	16,00 (93,28 g)			
Dispergator				54,00 (324,00 g)
Smanjivač filtracije				1,10 (6,60 g)
Olakšivač				8,00 (48,00 g)

Kroz cementne kaše 3A36 i 3B10 promatrao se utjecaj mikrolateksa na svojstva cementnih kaša. Zbog dodatka mikrolateksa u kaši 3A36 smanjen je udio vode na 36% vode na masu cementa (BWOC) dok je u 3B10 zbog nedostatka mikrolateksa povećan na 50% vode na masu cementa. Cementna kaša 3D8, nazvana još i molvanska mješavina, ne sadrži mikrolateks već se u odnosu na 3B10 gledao utjecaj kvarca. Cementna kaša 3E2 ne sadrži mikrolateks, kvarc i „Microblock“.

- a) Gustoća cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Gustoća cementnih kaša određena je vagom za isplaku te su rezultati prikazani u tablici 4-26. Gustoće cementnih kaša 3A36, 3B10 i 3D8 iznose 1650 kg/m<sup>3</sup> dok gustoća cementne kaše 3E2 iznosi 1640 kg/m<sup>3</sup> jer sadrži veći udio vode od ostalih cementnih kaša te olakšivač.

Tablica 4-26. Vrijednosti gustoća ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Svojstvo		Cementna kaša			
		3A36	3B10	3D8	3E2
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	1650	1650	1650	1640

- b) Reološka svojstva cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Za određivanje reoloških svojstava cementnih kaša provedeno je mjerenje pri 23 °C i 88 °C. Očitane vrijednosti smičnih napreznja izražene u lb /100 ft<sup>2</sup> pri brzinama rotacije od 3 do 300 o/min te 200 do 3 o/min prikazane su u tablici 4-27. i 4-28. U tablici 4-29. prikazane su prosječne vrijednosti smičnih napreznja izražene u Pa pri smičnim brzinama od 5,1 do 510 s<sup>-1</sup>. Navedene vrijednosti smičnih brzina izražene u s<sup>-1</sup> dobivene su množenjem brzina rotacije (o/min) koeficijentom 1,7. Na slikama 4-16. i 4-17. prikazane su prosječne vrijednosti smičnih napreznja ispitivanih cementnih kaša.

Tablica 4-27. Očitane vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

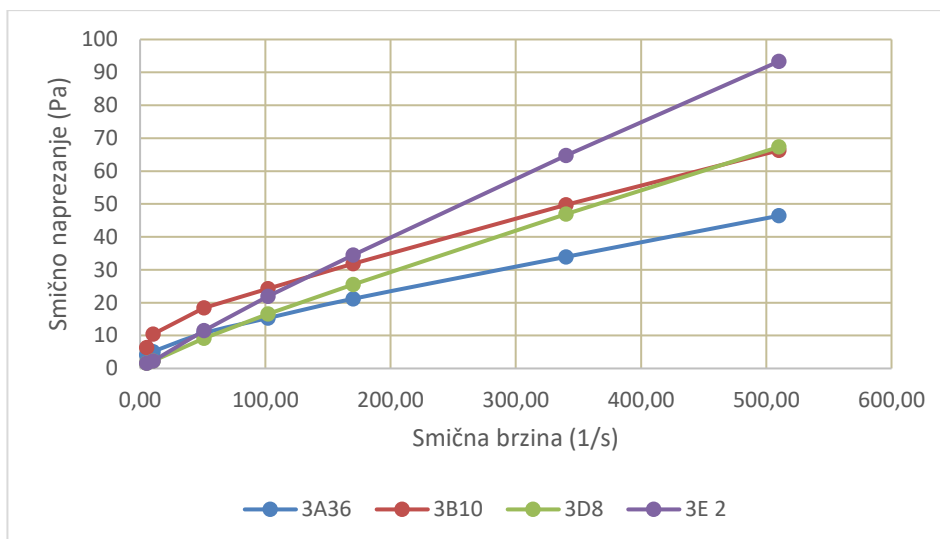
Brzina rotacije (o/min)	Smično naprezanje pri brzinama rotacije od 3 do 300 o/min (lb/100ft <sup>2</sup> )							
	3A36		3B10		3D8		3E2	
	23°C	88°C	23°C	88°C	23°C	88°C	23°C	88°C
3	8	14	14	2	3	5	3	3
6	10	23	27	6	5	9	5	6
30	22	50	42	20	19	33	23	27
60	31	72	51	32	34	55	44	50
100	42	93	66	47	51	80	68	76
200	67	135	101	79	93	135	128	134
300	91	169	130	105	132	174	183	182
200	66	129	94	75	91	120	126	124
100	41	86	59	43	49	68	67	68
60	29	67	44	30	31	45	42	44
30	20	47	30	17	17	26	22	24
6	10	23	14	5	4	7	4	5
3	8	17	11	4	3	5	3	3

Tablica 4-28. Izračunate vrijednosti smičnog naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

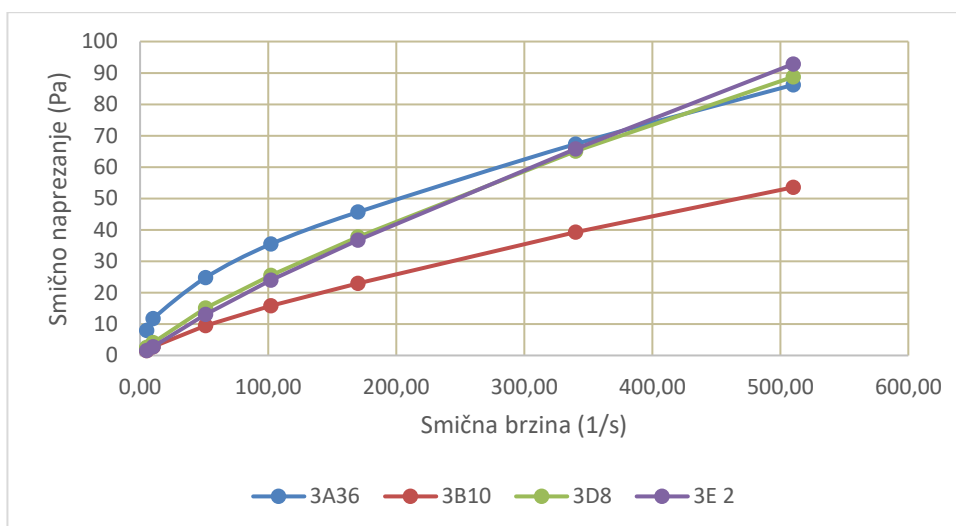
Smično naprezanje pri smičnim brzinama od 5,1 do 510 s <sup>-1</sup> (Pa)								
Smična brzina (s <sup>-1</sup> )	3A36		3B10		3D8		3E2	
	23°C	88°C	23°C	88°C	23°C	88°C	23°C	88°C
5,1	4,08	7,14	7,14	1,02	1,53	2,55	1,53	1,53
10,2	5,1	11,73	13,77	3,06	2,55	4,59	2,55	3,06
51	11,22	25,5	21,42	10,2	9,69	16,83	11,73	13,77
102	15,81	36,72	26,01	16,32	17,34	28,05	22,44	25,5
170	21,42	47,43	33,66	23,97	26,01	40,8	34,68	38,76
340	34,17	68,85	51,51	40,29	47,43	68,85	65,28	68,34
510	46,41	86,19	66,3	53,55	67,32	88,74	93,33	92,82
340	33,66	65,79	47,94	38,25	46,41	61,2	64,26	63,24
170	20,91	43,86	30,09	21,93	24,99	34,68	34,17	34,68
102	14,79	34,17	22,44	15,3	15,81	22,95	21,42	22,44
51	10,2	23,97	15,3	8,67	8,67	13,26	11,22	12,24
10,2	5,1	11,73	7,14	2,55	2,04	3,57	2,04	2,55
5,1	4,08	8,67	5,61	2,04	1,53	2,55	1,53	1,53

Tablica 4-29. Prosječne vrijednosti smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Smično naprezanje pri smičnim brzinama od 5,1 do 510 s <sup>-1</sup> (Pa)								
Smična brzina (s <sup>-1</sup> )	3A36		3B10		3D8		3E2	
	23°C	88°C	23°C	88°C	23°C	88°C	23°C	88°C
5,1	4,08	7,91	6,38	1,53	1,53	2,55	1,53	1,53
10,2	5,1	11,73	10,46	2,81	2,3	4,08	2,3	2,81
51	10,71	24,74	18,36	9,44	9,18	15,05	11,48	13,01
102	15,3	35,45	24,23	15,81	16,58	25,5	21,93	23,97
170	21,17	45,65	31,88	22,95	25,5	37,74	34,43	36,72
340	33,92	67,32	49,73	39,27	46,92	65,03	64,77	65,79
510	46,41	86,19	66,3	53,55	67,32	88,74	93,33	92,82



Slika 4-16. Dijagram smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša pri temperaturi od 23 °C



Slika 4-17. Dijagram smičnih naprezanja ispitivanih cementnih kaša pri temperaturi od 88 °C

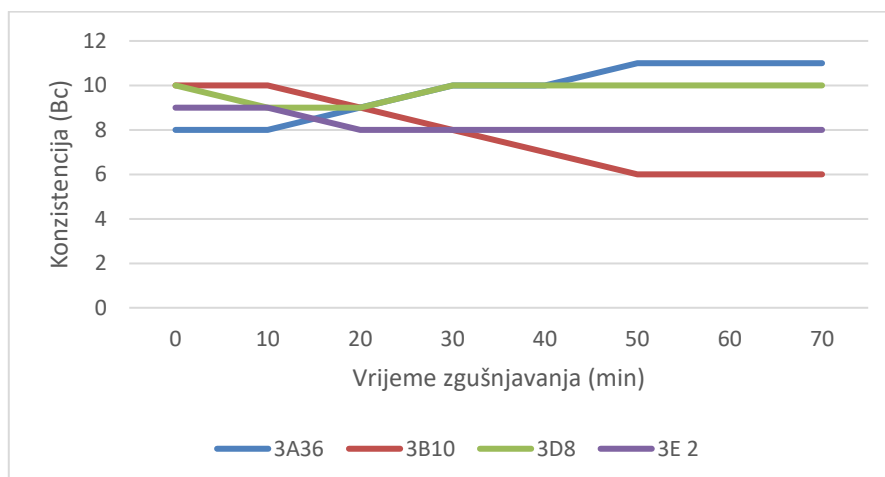
Na slici 4-16. se vidi smanjenje smičnog naprezanja cementne kaše 3A36 u odnosu na druge cementne kaše čemu uzrok može biti što se jedino u njenom sastavu nalazi mikrolateks. Cementna kaša 3D8 ne sadrži mikrolateks kao niti cementna kaša 3B10, ali sadrži manju količinu „Microblocka“ u odnosu na 3B10 (15% BWOC). Cementna kaša 3E2 pokazuje najveće vrijednosti smičnih naprezanja. Povećanjem temperature cementna kaša 3E2 pokazuje najveće vrijednosti smičnih naprezanja u odnosu na druge, dok cementna kaša 3B10 jedina pokazuje smanjenje smičnih naprezanja pri povećanju temperature. Cementna kaša 3A36 pokazuje najveći porast vrijednosti smičnih naprezanja u odnosu na mjerenja pri 23 °C

c) Konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Promjena konzistencije cementnih kaša s vremenom mjerena je u atmosferskom konzistometru pri temperaturi od 88 °C i atmosferskom tlaku. Određivanje konzistencije je trajalo 70 min. Rezultati mjerenja konzistencije ispitivanih cementnih kaša atmosferskim konzistometrom prikazani su u tablici 4-30. i na slici 4-18.

Tablica 4-30. Vrijednosti konzistencije ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Vrijeme ispitivanja (min)	Cementna kaša			
	3A36	3B10	3D8	3E2
	Konzistencija (Bc)			
0	8	10	10	9
10	8	10	9	9
20	9	9	9	8
30	10	8	10	8
40	10	7	10	8
50	11	6	10	8
60	11	6	10	8
70	11	6	10	8



Slika 4-18. Konzistencija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

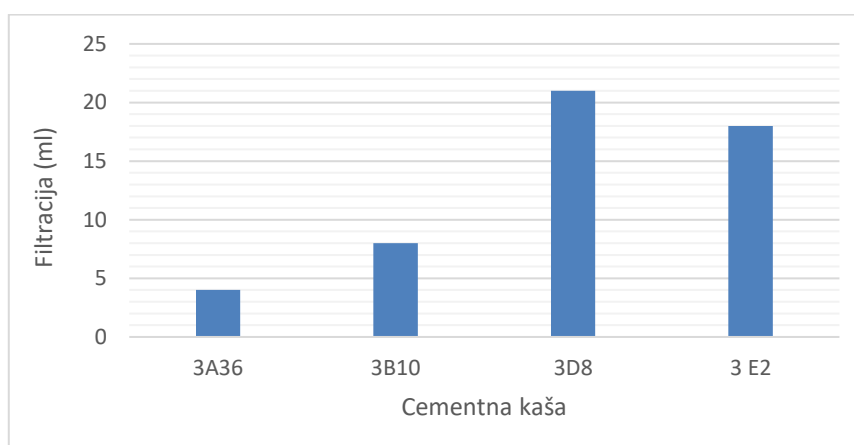
Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je da cementna kaša 3A36 pokazuje najveće vrijednosti konzistencije čemu je razlog najmanja količina usporivača koji je dodan u cementnu kašu ( 0,13% BWOC) u odnosu na druge cementne kaše u kojima je dodan u količini od 0,30% BWOC. Vrijednosti konzistencije svih cementnih kaša nakon 70 minuta su značajno niže od 40 Bc te pokazuju zadovoljavajuće rezultate.

d) Filtracija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Ispitivanje filtracije trajalo je za sve cementne kaše 30 min te su vrijednosti filtracije cementnih kaša prikazane u tablici 4-31 i na slici 4-19.

Tablica 4-31. Vrijednosti filtracije ispitivanih cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Svojstvo	Cementna kaša			
	3A36	3B1 0	3D 8	3E 2
Vrijeme ispitivanja (min)	30	30	30	30
V <sub>t</sub> (ml)	4	8	21	18



Slika 4-19. Filtracija cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Sa slike 4-19. vidljivo je kako cementna kaša 3A36 ima najmanju filtraciju zbog dodatka lateksa koji nije prisutan u ostalim cementnim kašama. Zbog dodatka mirkolateksa

filtracija je u odnosu na cementnu kašu 3B10 smanjena za 50%. Sve cementne kaše imaju zadovoljavajuću filtraciju.

- e) Izdvajanje slobodne vode iz cementnih kaša za cementaciju 9 5/8" kolone zaštitnih cijevi

Ispitivanje izdvajanja slobodne vode iz cementnih kaša provedeno je u sušioniku pri temperaturi od 80°C te je mjerenje za svaku cementnu kašu trajalo 2 sata. Nakon proteklog vremena staklena graduirana menzura izvađena je iz sušionika te su zabilježeni rezultati koji su prikazani u tablici 4-32.

Tablica 4-32. Vrijednosti količine slobodne vode

Slobodna voda	Cementna kaša			
	3A36	3B10	3D8	3E2
ml/250 ml	0,0	0,0	0,0	0,0

Prema rezultatima ispitivanja može se uočiti kako ni kod jedne cementne kaše nije došlo do izdvajanja slobodne vode čime su dobiveni zadovoljavajući rezultati.

### 3.3.3.3. Postupak cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

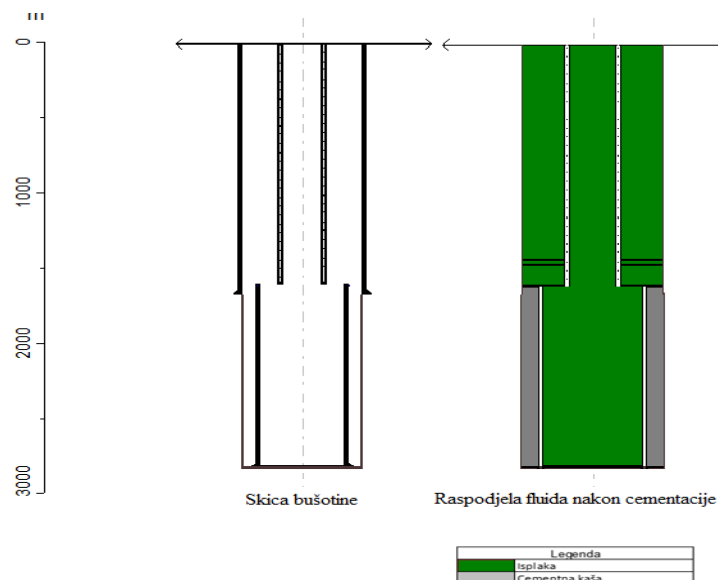
Postupak ugradnje, cementacije i ispitivanja hermetičnosti kolone zaštitnih cijevi opisan je u nastavku (GRP- AAT Geothermae, 2017):

1. Odsjesti lajner kolonom vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") u lajner vješalicu, odspojiti se alatom za ugradnju od lajner kolone i nakon provjere odspajanja vratiti se i nastaviti cirkulaciju isplakom.
2. Ispitati tlačne vodove tlakom od 200 bar.
3. Izmiješati razdjelnice i potom utisnuti 2 m<sup>3</sup> kemijskog aditiva za prethodnicu, a potom 8 m<sup>3</sup> razdjelnice.
4. Miješati cementnu kašu i utiskivati cementnu kašu protokom od 700 - 1 000 l/min.
5. Isprati cementacijske vodove prije protiskivanja cementne kaše.
6. Upustiti u bušotinski niz čep čistač bušaćih šipki.



7. Protisnuti cementnu kašu razdjelnicom ( $2 \text{ m}^3$ ) i isplakom, protokom od 800 do 600 lit/min do dosjednog tlaka – usporiti pri nailasku čepa čistača bušaćih šipki na čep čistač lajner kolone.
8. Ispustiti tlak iz bušotinskog niza – provjeriti povrat fluida.
9. Nasjedanjem usidriti paker na vrhu lajner vješalice i zadići niz na položaj za cirkulaciju.
10. Nakon ispiranja viška cementne kaše i razdjelnice izvaditi bušaći niz iz bušotine.
11. Čekati na stvrdnjavanje cementne kaše (TWOC)-36 sati.

Na slici 4-20. prikazana je raspodjela fluida u kanalu bušotine nakon cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8").



Slika 4-20. Raspodjela fluida u kanalu bušotine nakon cementacije kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8") (GRP - AAT Geothermae, 2017)

### 3.4. REZULTATI ISPITIVANJA SVOJSTAVA CEMENTNOG KAMENA

Ispitivanje cementnog kamena uključivalo je ispitivanje čvrstoće cementnog kamena nedestruktivnom i destruktivnom metodom, ispitivanje poroznosti i propusnosti.

#### 3.4.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena

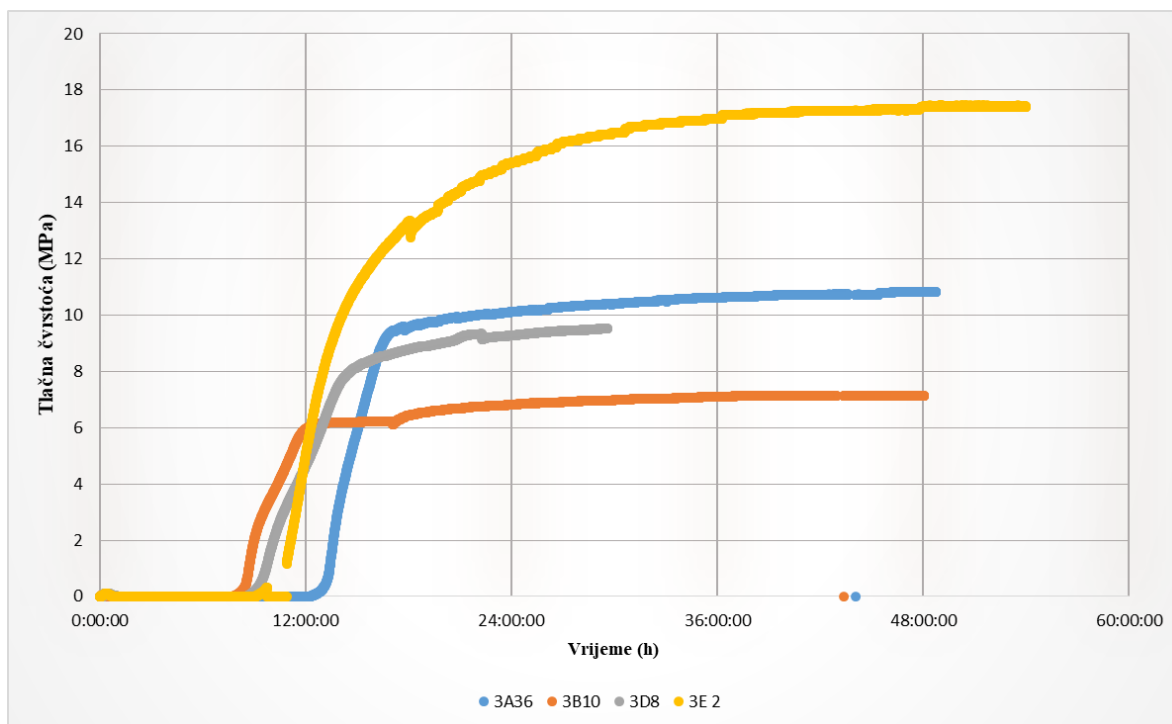
Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnih kamena dobivenih od cementnih kaša 3A36, 3B10, 3D8 te 3E2 vršeno je na dva načina. Prvi pristup je nedestruktivna metoda prilikom koje se koristi ultrazvučni analizator ( engl. *Ultrasonic Cement Analyzer – UCA*), a druga metoda je destruktivna.

##### 3.4.1.1. Određivanje tlačne čvrstoće primjenom UCA

Razvoj tlačne čvrstoće uzoraka cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8" i 13 3/8" prikazani su na priložima 1 i 2. Vidljivo je da su obje cementne kaše postigle čvrstoću od 3,5 MPa odnosno najmanju tlačnu čvrstoću potrebnu za nastavak radova u bušotini, Podaci o razvoju tlačne čvrstoće uzoraka cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" dobiveni su njihovim očvršćavanjem u ultrazvučnom analizatoru pri 95 °C i 41 MPa . Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4-33., na slici 4-21. te na priložima 3, 4, 5, 6.

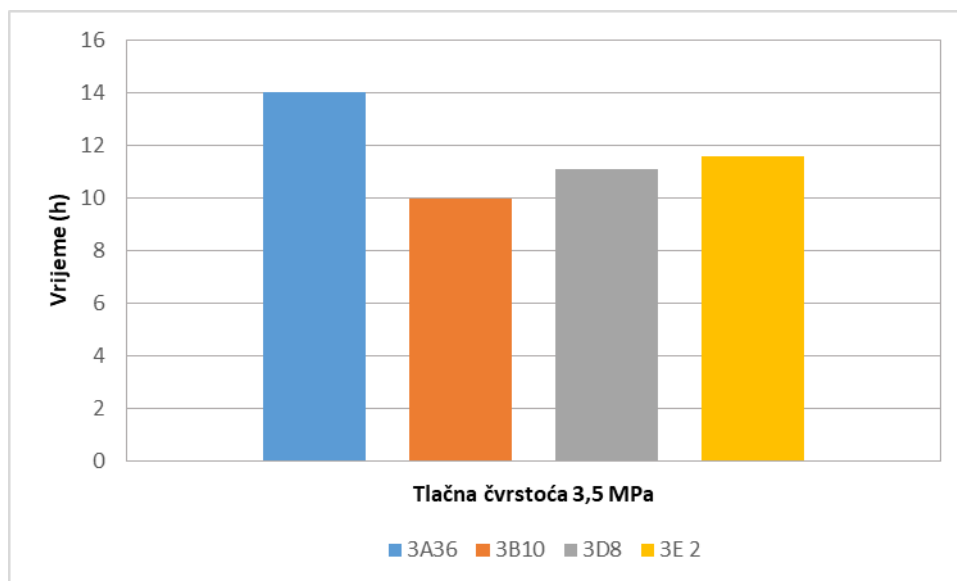
Tablica 4-33. Razvoj tlačne čvrstoće nakon očvršćavanja cementnih kaša

Svojstvo	Cementna kaša			
	3A36	3B10	3D8	3E2
Tlačna čvrstoća nakon 24 sata (MPa)	10,13	6,83	9,27	15,4
Tlačna čvrstoća nakon 48 sati (MPa)	10,82	7,12	-	17,42
Vrijeme do postizanja 0,35 MPa (početak zgušnjavanja) (hh:mm:ss)	13:05:00	8:28:30	9:15:30	9:11:30
Vrijeme do postizanja 3,5 MPa (čvrstoća potrebna za nastavak radova u bušotini) (hh:mm:ss)	14:03:00	9:57:30	11:06:30	11:35:30



Slika 4-21. Razvoj tlačne čvrstoće cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Na temelju krivulja razvoja tlačne čvrstoće prikazanih na slici 4-21. može se zaključiti da su svi uzorci cementnog kamena postigli zadovoljavajuće tlačne čvrstoće. Cementnoj kaši 3D8 nije mjerena tlačna čvrstoća nakon 48 sati jer je mjerenje prekinuto zbog zadovoljavajućeg trenda porasta tlačne čvrstoće te nije ponovljeno. Najveća tlačna čvrstoća cementnog kamena postignuta je očvršćavanjem cementne kaše 3E2 dok je najmanju tlačnu čvrstoću pokazao cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3B10. Razlog leži u sastavu cementne kaše jer cementna kaša 3B10 ne sadrži lateks koji je vidljivo povećao tlačnu čvrstoću u cementnoj kaši 3A36 te u odnosu na cementnu kašu 3A36, sadrži 39% više vode BWOC. Povećanje tlačne čvrstoće cementnog kamena 3A36 je za 52 % veće u odnosu na cementni kamen 3B10 nakon 48 sati mjerenja. Cementni kamen 3E2 je nakon 48 sati postigao tlačnu čvrstoću 2,45% veću u odnosu na cementni kamen 3B10. Cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 u odnosu na druge cementne kaše ne sadrži mikrolateks i „Microblock“ te je usprkos tome pokazao najveću vrijednost tlačne čvrstoće. Na temelju ovog rezultata ukazuje se potreba za provedbom daljnjih mjerenja te optimiranja sastava navedene cementne kaše.



Slika 4-22. Usporedba vremena potrebnog za postizanje tlačne čvrstoće cementnog kamena od 3,5 MPa

Prema rezultatima prikazanim na slici 4-22. vidi se da je najviše vremena za postizanje tlačne čvrstoće 3,5 MPa (najmanja tlačna čvrstoća potrebna za nastavak radova u bušotini) bilo potrebno cementnom kamenu dobivenog iz cementne kaše 3A36, dok je najmanje vremena bilo potrebno cementnom kamenu dobivenom očvršćavanjem cementne kaše 3B10 ( 9 sati i 57,5 minuta).

#### 3.4.1.2. Destruktivna metoda za određivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementnih kaša za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8"

Priprema uzoraka cementnog kamena potrebnih za ispitivanje tlačne čvrstoće uključivala je pripremu cementnih kaša (3A36, 3B10, 3D8 i 3E2) te njihovo uljevanje u plastične posudice u obliku valjčića. Pripremljena su četiri različita sastava cementnih kaša te je svaka ulivena u 8 posudica (A, B, C, D, E, F, G i H uzorci). Tako pripremljeni uzorci stavljeni su na stvrdnjavanje u vodenu kupku 30 dana pri temperaturi 80 °C i atmosferskom tlaku. Nakon stvrdnjavanja uzorcima A, B, C i D izmjerena je propusnost i poroznost, a nakon toga je uzorcima A,B i C izmjerena tlačna čvrstoća destruktivnom metodom.

Ostali uzorci cementnog kamena (E, F, G i H) stavljeni su u vodenu kupku zasićenu ugljikovim dioksidom na 30 dana pri 100 °C i tlaku od 7 MPa. Nakon 30 dana uzorcima

cementnog kamena (E, F, G i H) izmjerena je propusnost i poroznost te je uzorcima F, G i H ponovno izmjerena tlačna čvrstoća destruktivnom metodom, dok se uzorak E koristio za premazivanje fenolftaleinom.

Ispitivanja propusnosti i poroznosti provedena su samo za kolonu zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" jer je za navedenu kolonu bilo važno osigurati cementni kamen otporan na ugljikov dioksid.

Na slici 4-23. prikazani su uzorci cementnog kamena nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom.



Slika 4-23. Uzorci cementnog kamena nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom

Na uzorcima 3A36, 3B10 i 3D8 na slici 4-23. vidljive su bijele mrlje na vanjskom plaštu. Te bijele mrlje predstavljaju sloj otopljenog kalcijevog karbonata. Prilikom izlaganja cementnog kamena vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom došlo je do stvaranja kalcijevog karbonata koji je otopljen u vodenoj kupki. Kasnijim reakcijama kalcijev karbonat se otapa u vodi zasićenoj  $\text{CO}_2$  i izlučuje iz cementnog kamena u obliku kalcijevoga hidrogenkarbonata. Prilikom ispuštanja tlaka  $\text{CO}_2$  kalcijev hidrogenkarbonat se reverzibilnim procesom ponovno pretvorio u kalcijev karbonat koji se stvorio na stijenkama uzoraka cementnog kamena i na taj način tvori slabo propusni sloj. Daljnjim ispitivanjem upotrebom fenolftaleina pokazat će se na kojim mjestima je došlo do karbonatizacije odnosno na kojim mjestima je ugljikov dioksid reagirao s cementnim kamenom.

Na slikama 4-24, 4-25, 4-26, 4-27 prikazani su svi uzorci dobiveni nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom.



Slika 4-24. Uzorak cementnog kamena dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3A36 nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom



Slika 4-25. Uzorak cementnog kamena dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3B10 nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom



Slika 4-26. Uzorak cementnog kamena dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3D8 nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom

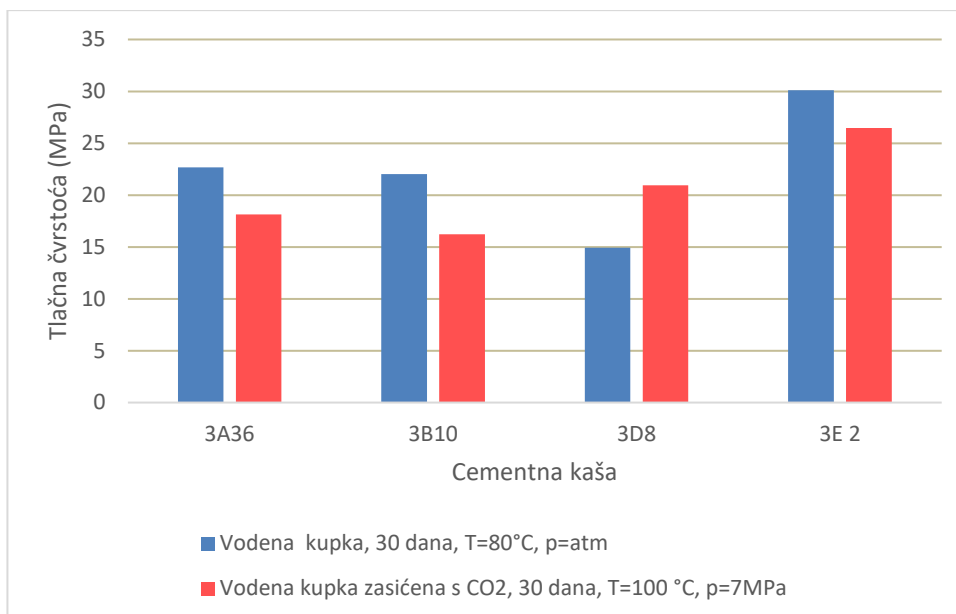


Slika 4-27. Uzorak cementnog kamena dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom

Rezultati mjerenja tlačne čvrstoće uzoraka cementnog kamena destruktivnom metodom prikazani su u tablici 4-34. i na slici 4-28.

Tablica 4-34. Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>

Seriya	Tlačna čvrstoća (MPa (psi))			
Uzorak	3A36	3B10	3D8	3E2
Vodena kupka, 30 dana, T=80°C, p=atm				
A	21,94 (3182,11)	24,09 (3494,08)	13,12 (1903,02)	24,74 (3587,67)
B	24,74 (3587,67)	20,65 (2994,92)	11,62 (1684,64)	33,34 (4835,55)
C	21,29 (3088,51)	21,29 (3008,51)	20,00 (2901,33)	32,26 (4679,57)
Prosječna vrijednost	22,66 (3286,10)	22,01 (3165,84)	14,91 (2163,00)	30,11 (4367,60)
Vodena kupka zasićena s CO <sub>2</sub> , 30 dana, T=100 °C, p=7Mpa				
F	10,54 (1528,66)	16,78 (2433,37)	14,41 (2090,21)	26,89 (3899,64)
G	23,02 (3338,09)	15,92 (2308,59)	24,95 (3618,86)	27,53 (3993,23)
H	20,86 (3026,12)	15,92 (2308,59)	23,45 (3400,48)	24,95 (3618,86)
Prosječna vrijednost	18,14 (2630,96)	16,21 (2350,18)	20,94 (3036,52)	26,46 (3837,24)



Slika 4-28 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>

Iz rezultata prikazanih na slici 4-28. vidljivo je da je tlačna čvrstoća uzoraka cementnog kamena 3A36 i 3B10 prije izlaganja vodi zasićenoj ugljikovim dioksidom skoro podjednaka (razlika je 0,65 MPa). Nakon njihovog izlaganja vodenoj kupki zasićenoj s ugljikovim dioksidom dolazi do smanjenja tlačne čvrstoće te je smanjenje značajnije kod uzorka 3B10 koji ne sadrži lateks (razlika u tlačnoj čvrstoći iznosi 1,93 MPa). Cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3D8 pokazao je najmanju tlačnu čvrstoću prije izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>, ali je nakon izlaganja došlo do povećanja tlačne čvrstoće. Najveće vrijednosti tlačne čvrstoće prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub> pokazali su uzorci dobiveni očvršćavanjem cementne kaše 3E2 koja ne sadrži mikrolateks niti „Microblock“.



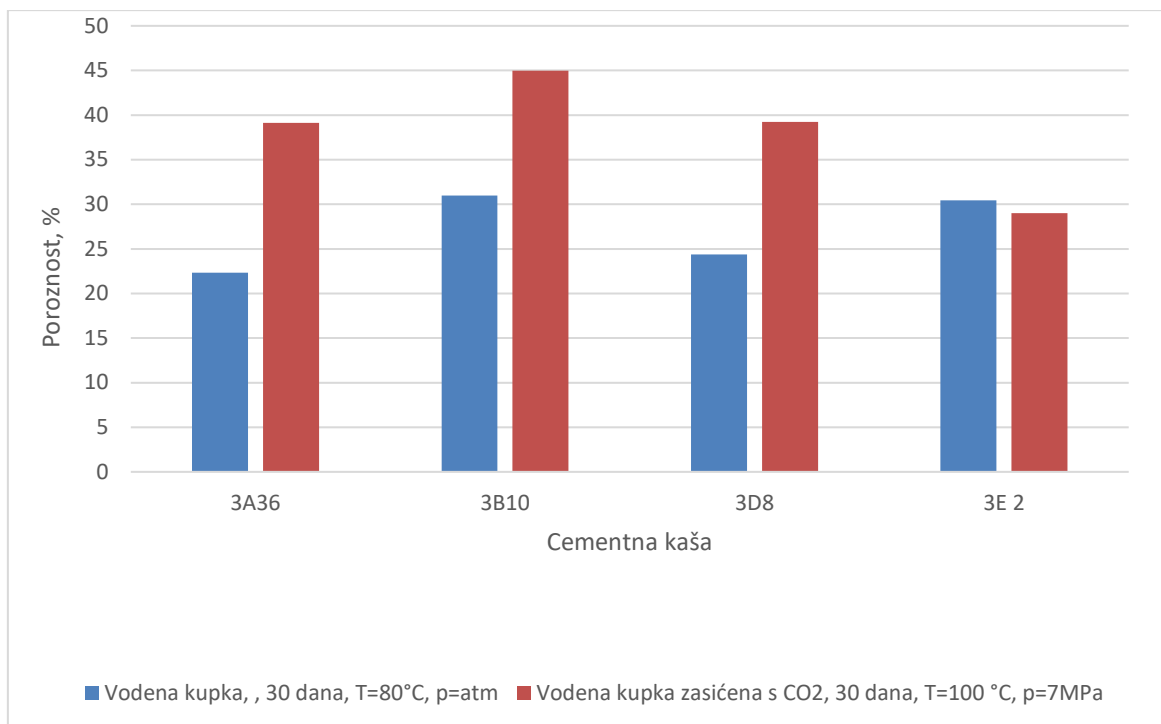
### 3.4.2. Ispitivanje poroznosti i propusnosti

#### 3.4.2.1. Poroznost

Poroznost se računa iz omjera obujma pornog prostora i ukupnog obujma uzorka i izražava se kao dio cijelog ili kao postotak. Uzorcima cementnog kamena A, B, C i D mjerena je poroznost nakon stvrdnjavanja u vodenoj kupki 30 dana pri temperaturi 80 °C i pri atmosferskom tlaku. Uzorcima cementnog kamena E, F, G i H mjerena je poroznost nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj ugljikovim dioksidom 30 dana pri 100 °C i tlaku od 7 MPa. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4-35 i na slici 4-29.

Tablica 4-35. Poroznost uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>

Serija	Poroznost (%)			
	3A36	3B10	3D8	3E2
	Vodena kupka, 30 dana, T=80°C, p=atm			
A	21,45	31,44	24,34	31,09
B	23,37	31,15	24,46	30,17
C	22,52	30,70	23,74	30,00
D	22,02	30,70	24,76	30,52
Prosječna vrijednost	22,34	30,99	24,36	30,45
	Vodena kupka zasićena s CO <sub>2</sub> , 30 dana, T=100 °C, p=7MPa			
E	37,99	45,56	39,24	29,99
F	39,35	44,76	38,92	30,61
G	39,25	45,10	38,74	23,42
H	39,87	44,54	39,96	32,06
Prosječna vrijednost	39,12	44,99	39,22	29,02



Slika 4-29. Poroznost uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>

Prema rezultatima prikazanim u tablici 4-35 i na slici 4-29 vidljivo je kako najmanju poroznost prije izlaganja uzorka ugljikovom dioksidu ima cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3A36 dok je najveću poroznost pokazao cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3B10. Poroznost svih uzoraka osim 3E2 bila je manja prije izlaganja ugljikovom dioksidu. Poroznost cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementne kaše 3E2 nakon izlaganja uzorka ugljikovom dioksidu smanjila se 4,9%.

### 3.4.2.2. Propusnost

Propusnost (engl. *permeability*) cementnog kamena predstavlja otpor prodiranju fluida kroz cementni kamen u prstenastom prostoru kanala bušotine. Cementni kamen mora imati malu propusnost kako bi se spriječila migracija fluida u prstenasti prostor te dalje prema površini.

Mjerenje se zasniva na Darcy-evom zakonu protoka fluida kroz poroznu sredinu.

Propusnost cementnog kamena izračunava se prema sljedećoj jednadžbi:

$$k = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{A \cdot \Delta P} \quad (4-2)$$

gdje su:

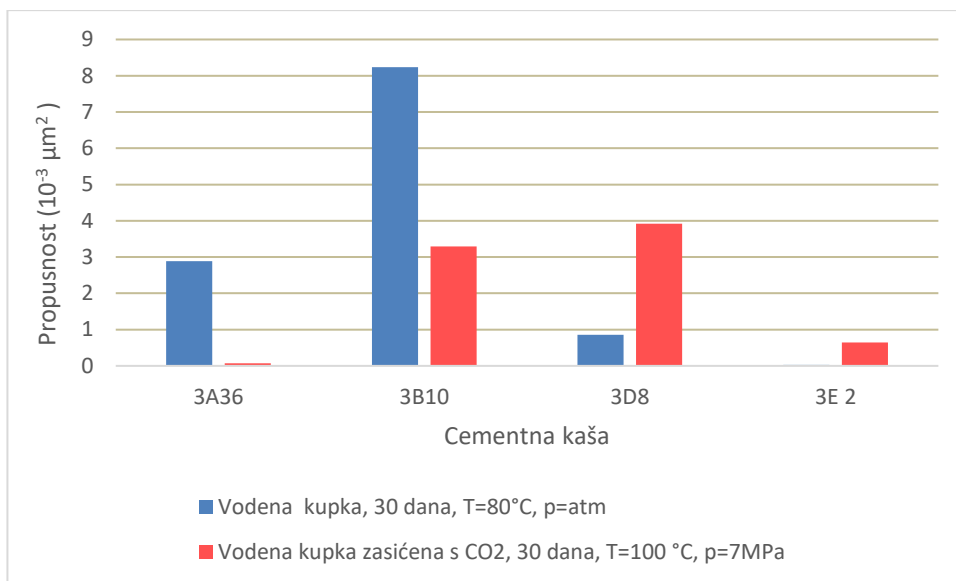
k	- propusnost uzorka cementnog kamena (m <sup>2</sup> )
Q	- protok plina kroz uzorak (m <sup>3</sup> /s)
μ	- viskoznost plina (Pa·s)
L	- duljina uzorka cementnog kamena (m)
A	- površina poprečnog presjeka uzorka (m <sup>2</sup> )
ΔP	- razlika tlaka (Pa)

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4-36. te su na slici 4-30. prikazane prosječne vrijednosti.

Uzorcima cementnog kamena A, B, C i D mjerena je propusnost nakon stvrdnjavanja u vodenoj kupki 30 dana pri temperaturi 80 °C i pri atmosferskom tlaku. Uzorcima cementnog kamena E, F, G i H mjerena je propusnost nakon izlaganja vodenoj kupki zasićenoj ugljikovim dioksidom 30 dana pri 100 °C i tlaku od 7 MPa.

Tablica 4-36. Propusnost uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>

Serija	Propusnost (10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> (mD))			
	3A36	3B10	3D8	3E2
	Vodena kupka, 30 dana, T=80°C, p=atm			
A	2,139 (2,168)	5,138 (5,206)	0,338 (0,342)	0,034 (0,034)
B	2,251 (2,281)	5,899 (5,977)	0,302 (0,306)	0,028 (0,028)
C	3,80 (3,85)	8,526 (8,639)	1,59 (1,612)	0,028 (0,028)
D	3,377 (3,422)	13,369 (13,548)	1,201 (1,217)	0,029 (0,029)
<b>Prosječna vrijednost</b>	<b>2,891 (2,93)</b>	<b>8,233 (8,343)</b>	<b>0,858 (0,869)</b>	<b>0,03 (0,03)</b>
	Vodena kupka zasićena s CO <sub>2</sub> , 30 dana, T=100 °C, p=7MPa			
E	0,077 (0,078)	2,260 (2,290)	4,005 (4,058)	0,788 (0,798)
F	0,084 (0,085)	5,681 (5,756)	7,354 (7,451)	0,730 (0,740)
G	0,078 (0,079)	4,082 (4,136)	3,155 (3,197)	0,695 (0,704)
H	0,056 (0,057)	1,162 (1,177)	1,148 (1,163)	0,370 (0,375)
<b>Prosječna vrijednost</b>	<b>0,074 (0,075)</b>	<b>3,296 (3,339)</b>	<b>3,916 (3,967)</b>	<b>0,646 (0,654)</b>



Slika 4-30. Prosječne vrijednosti propusnost uzoraka cementnog kamena prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>

Iz rezultata mjerenja propusnosti sa slike 4-30 vidljivo je kako cementni kamen nastao očvršćavanjem iz cementne kaše 3B10 ima najveću (prosječnu) propusnost prije izlaganja uzorka vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub> u odnosu na druge uzorke. Najbolje rezultate pokazao je cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 s prosječnom propusnošću  $0,03 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (prije izlaganja uzorka vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>). Njegova propusnost je čak 278,1 puta manja u odnosu na uzorak 3B10. Kao preporučena i prihvatljiva vrijednost propusnosti uzima se da je manja od  $10^{-5} \mu\text{m}^2$  (Nelson, 1990) te je prema tom kriteriju cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 jedini pokazao približno prihvatljivu vrijednost. Vrijednosti propusnosti uzoraka cementnog kamena prije izlaganja uzorka vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub> dobivenih očvršćavanjem cementnih kaša 3A36 i 3B10 pokazuju kako cementni kamen koji sadrži lateks (3A36) ima manju propusnost u odnosu na cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3B10 koja ne sadrži lateks. Ovim rezultatom potvrđeno je da lateks smanjuje propusnost cementnog kamena. Povećanje propusnosti cementnog kamena bez lateksa je 2,84 puta u odnosu na cementni kamen s lateksom. Rezultati propusnosti dobiveni nakon izlaganja uzorka vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub> pokazuju da cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3A36 ima najmanju vrijednost propusnosti ( $0,074 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) te je time zadovoljen kriterij prihvatljive propusnosti cementnog kamena. Uzorci cementnih kamena dobivenih očvršćavanjem cementnih kaša 3A36 i 3B10 pokazali su

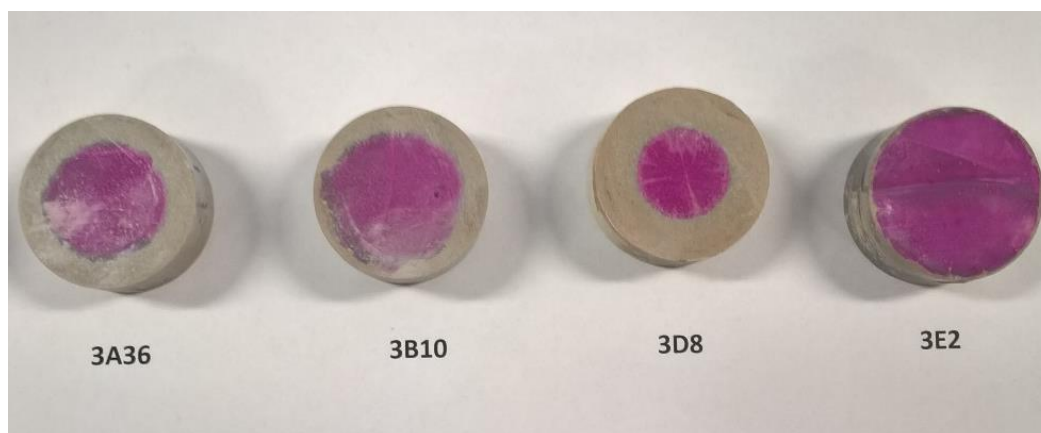
smanjenje propusnosti nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>, dok su uzorci 3D8 i 3E2 pokazali povećanje propusnosti nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>

#### 3.4.2.3. Određivanje izgleda uzorka nakon premazivanja fenolftaleinom

Najjednostavnija metoda određivanja prodora ugljikovog dioksida u strukturu cementnog kamena je premazivanje uzorka cementnog kamena fenolftaleinom. Metoda se temelji na vizualnom zapažanju promjene boje površine cementnog kamena nakon premazivanja fenolftaleinom. Fenolftalein je pH indikator koji je u kiseloj i neutralnoj okolini bezbojan (pH manji od 8,2), dok u lužnatoj okolini poprima crvenoljubičastu boju (pH viši ili jednak 8,2).

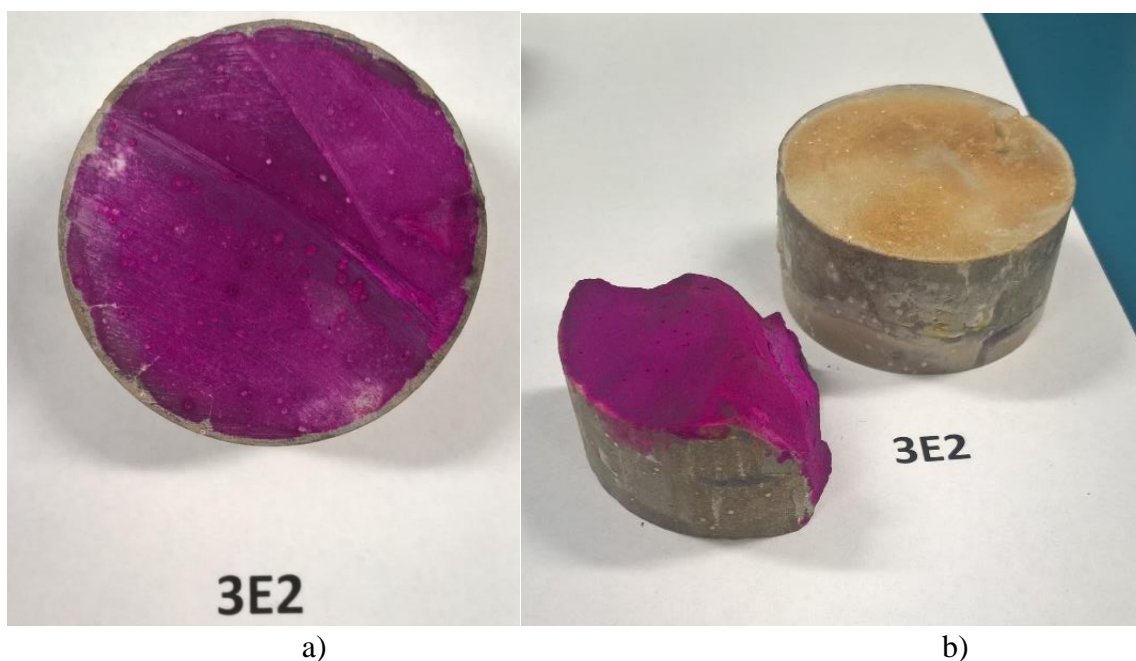
Cementni kamen nastao iz čistog Portland cementa uglavnom ima pH vrijednost oko 12 zbog prisutnosti kalcijevoga hidroksida koji nastaje tijekom hidratacije. U slučajevima kada je takav cementni kamen izložen okolini u kojoj se nalazi voda zasićena ugljikovim dioksidom, kalcijev hidroksid reagira s ugljičnom kiselinom zbog čega biva djelomično ili u potpunosti potrošen (Sedić, 2017).

Ispitivanje se provodilo na jednom od uzoraka cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem svake cementne kaše. Uzorci su se radijalno prerezali i premazali fenolftaleinom te je odmah uslijedila promjena boje na površini uzorka. Promjena boje u crvenoljubičastu ukazuje na otpornost prodiranja CO<sub>2</sub>, a prodiranje (difuzija) CO<sub>2</sub> u strukturu cementnog kamena očituje se u nepromjenjivosti boje (bezbojna). Na slici 4-31 prikazani su uzorci cementnog kamena premazani fenolftaleinom nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>.



Slika 4-31. Uzorci cementnog kamena premazani fenolftaleinom nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>

Na svim uzorcima cementnog kamena došlo je do promjene boje što upućuje na to da su svi uzorci pokazali određenu otpornost prema prodoru ugljikovog dioksida. Najlošiju otpornost na ugljikov dioksid pokazao je uzorak cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementne kaše 3D8 gdje je otpornost zabilježena samo u središnjem dijelu uzorka. Područje na uzorku koje nije promijenilo boju ukazuje da je na tom dijelu došlo do karbonatizacije. Najbolju otpornost pokazao je cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2. Na slici 4-32 a vidljiva je skoro potpuna promjena boje na tom uzorku, osim na rubnim dijelovima (1 mm). Na slici 4-32 b prikazana je otpornost odlomljenog uzorka cementnog kamena (unutrašnji dio) te vanjska ploha uzorka. Vidljivo je kako vanjska ploha uzorka nije promijenila boju te je na tom dijelu došlo do prodiranja ugljikovog dioksida. Ispod gornje plohe je stvoren zaštitni sloj koji je onemogućio daljnje prodiranje ugljikovog dioksida. Ovim ispitivanjem cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 jedini se pokazao otpornim na ugljikov dioksid te bi se ona mogla primijeniti za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 9 5/8" za bušotinu Draškovec-3.



Slika 4-32. a) Izgled radijalnog presjeka uzorka cementnog kamena 3E2 premazanog fenolftaleinom te b) vanjske plohe uzorka i odlomljenog dijela premazanih fenolftaleinom

## 4. ZAKLJUČAK

Cementacija geotermalne bušotine za cilj ima osiguravanje dugoročnog integriteta bušotine, posebice u visokokorozivnim okruženjima uz prisustvo ugljikovog dioksida. Geotermalna bušotina Draškovec-3 zahtijeva cementaciju uvodne kolone (18 5/8"), tehničke kolone (13 3/8") te proizvodnog lajnera (9 5/8").

Cilj ovog rada bio je pripremiti i ispitati svojstva cementnih kaša potrebnih za cementaciju navedenih kolona. Također, bilo je potrebno ispitati otpornost cementnog kamena na ugljikov dioksid nastalog iz cementnih kaša za cementaciju 9 5/8" kolone zaštitnih cijevi.

Prema rezultatima ispitivanja cementnih kaša za cementaciju uvodne kolone, tehničke kolone i proizvodnog lajnera može se zaključiti da su ispitane cementne kaše pokazale zadovoljavajuća svojstva.

Ispitivanje nedestruktivnom metodom tlačne čvrstoće uzoraka cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementnih kaša pokazalo je da je najveću tlačnu čvrstoću ima cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 koja ne sadrži mikrolateks niti „Microblock“.

Također na temelju vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka cementnih kamena dobivenih očvršćavanjem cementnih kaša 3A36 i 3B10 može se zaključiti da je lateks povećao tlačnu čvrstoću uzorku 3A36. Ispitivanje tlačne čvrstoće, destruktivnom metodom, uzoraka cementnog kamena pokazalo je, kao i ispitivanjem nedestruktivnom metodom, da najveće vrijednosti tlačne čvrstoće (prije i nakon izlaganja vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>) imaju uzorci dobiveni očvršćavanjem cementne kaše 3E2.

Ispitivanje propusnosti pokazalo je da cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 ima najmanju propusnost (prije izlaganja uzorka vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>). Rezultati propusnosti dobiveni nakon izlaganja uzoraka vodi zasićenoj s CO<sub>2</sub>, pokazuju da je uzorak cementnog kamena dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 povećao propusnost.

Određivanje prodora ugljikovog dioksida u strukturu cementnog kamena određeno premazivanjem uzorka fenolftaleinom pokazalo je da je cementni kamen dobiven očvršćavanjem cementne kaše 3E2 jedini otporan na ugljikov dioksid. Osim toga on ima i najveće vrijednosti tlačnih čvrstoća te niske vrijednosti propusnosti. Na temelju ovih rezultata ukazuje se potreba za provedbom daljnjih mjerenja te optimiranja sastava cementne kaše 3E2. Optimiranje sastava cementne kaše 3E2 trebalo bi se usmjeriti prema



optimiranju koncentracija korištenih aditiva. Također sastav cementne kaše trebao bi se optimirati u svrhu povećanja tlačne čvrstoće cementnog kamena, ali uz zadržavanje otpornosti cementnog kamena prema ugljikovom dioksidu.

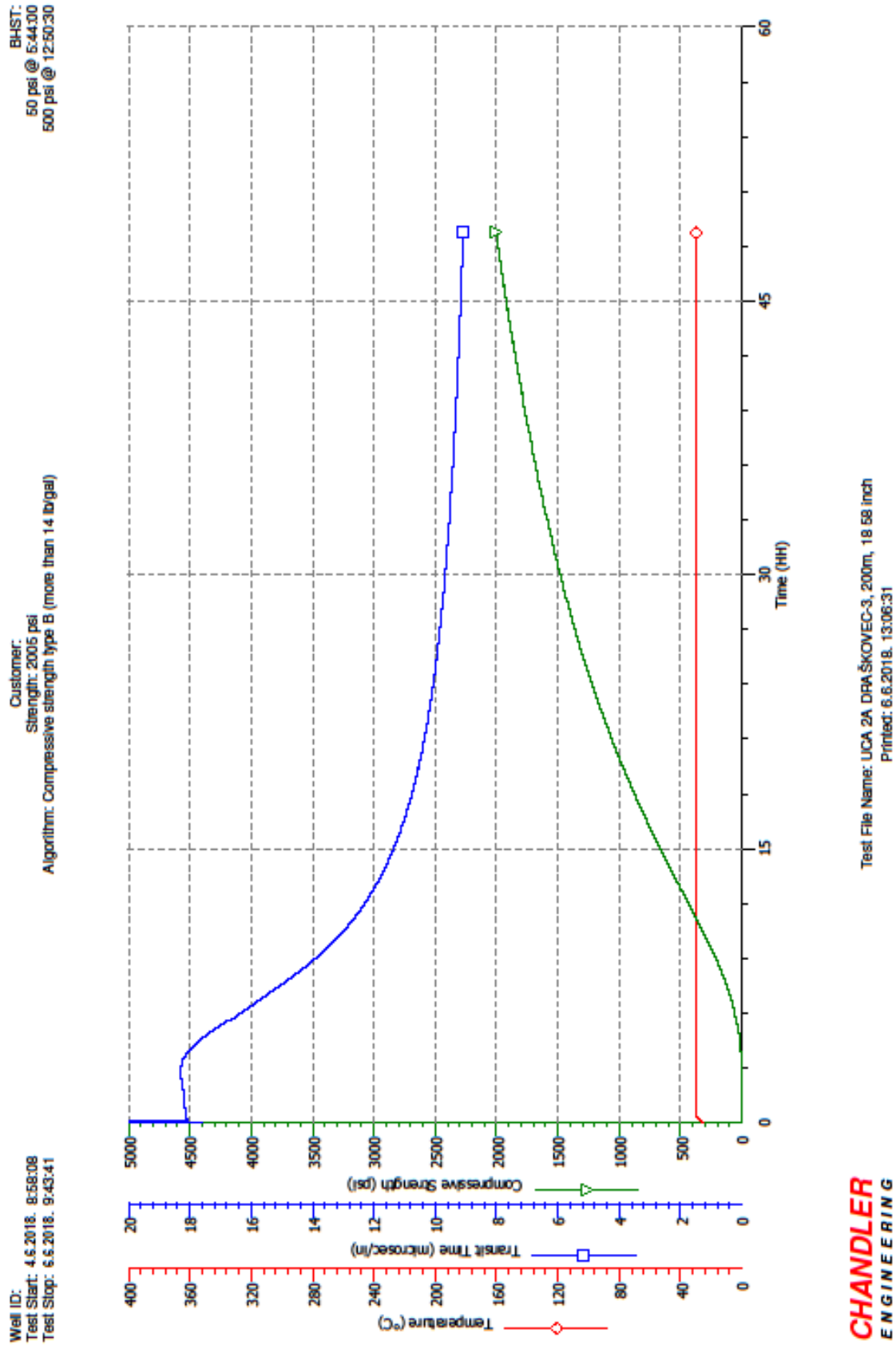
Prema prikazanim rezultatima može se zaključiti da je cementna kaša 3E2 otporna na ugljikov dioksid te ima zadovoljavajuću tlačnu čvrstoću te je stoga primjenjiva za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm (9 5/8").

## 5. LITERATURA

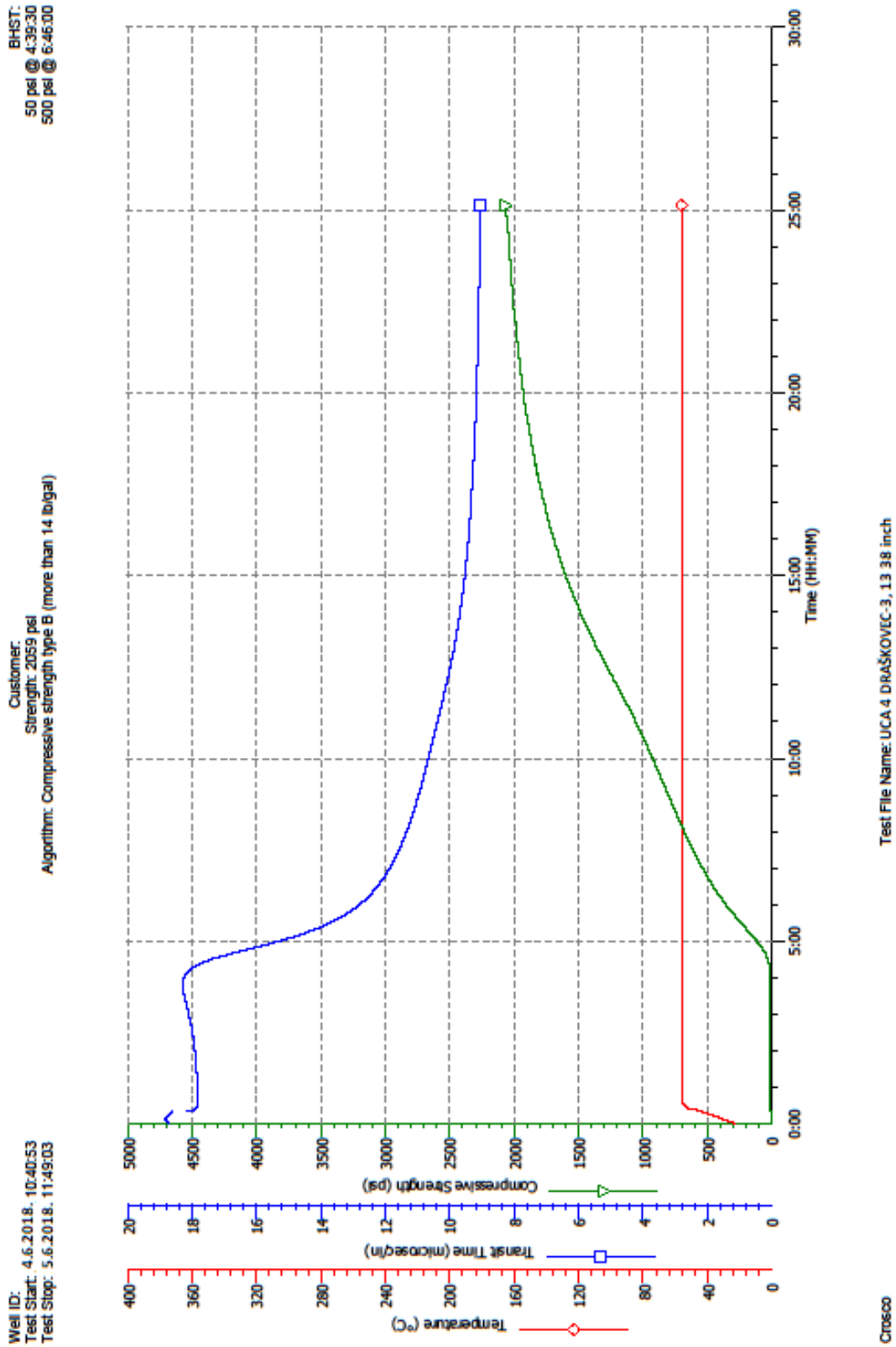
1. AAT Geothermae, 2017.: Glavni rudarski projekt eksploatacije geotermalne vode na eksploatacijskom polju Draškovec AATG.
2. API – American Petroleum Institute (1997): Recommended Practice for Testing Well Cements. API Recommended Practice 10B, twenty-second edition.
3. BERARD, B.,HERNANDEZ, R., NGUYEN, H.: Foamed CaP Cement Enables Drilling and Cementing of Geothermal Wells: Case History, Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010., str.1
4. DUCKWORTH, D.: Scavenger slurries: recycling vintage technology for improved zonal isolation and economic optimization, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 12-14 April 2011., str.1-2
5. GAURINA – MEĐIMUREC, N., MATANOVIĆ, D., KRKLEC, G.: Cement slurries for geothermal wells cementing. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, vol.6, 1994., str. 127-134
6. GAURINA-MEĐIMUREC, N.: Predavanje iz kolegija Bušotinski fluidi 2, ak. god. 2016./2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.
7. KIPROTICH BETT, E.: Geothermal well cementing-materials and placement techniques, Geothermal training programme, 2010., str.10-12, 15
8. KRKLEC, G., 1993. Cementne kase za cementiranje geotermalnih busotina, Diplomski rad , Zagreb
9. LONDON, B.: Recommendations to ensure proper cement placement, Halliburton, 2012., str.25
10. NELSON,E., 1990. "Well Cementing", Dowell Schlumberger Educational Services, Houston, USA.
11. PERIĆ, M., 2007.: Englesko hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina, Zagreb.
12. SALIM, P., AMANI, M., 2013.: Principal Points in Cementing Geothermal Wells, Advances in Petroleum Exploration and Development, str.77-91
13. SEDIĆ, K., 2017.: Optimiranje sastava cementnih kaša za cementiranje zaštitnih cijevi u bušotinama za utiskivanje ugljikovoga dioksida, Doktorski rad, Zagreb.
14. ŠANGO, J., 2017.: Cementne kaše za zatvaranje mjesta gubljenja isplake, Diplomski rad, Zagreb

15. CoreLab, 2019. URL: <https://www.corelab.com/cli/university-training/gas-permeameter-perg-200> (3.1.2019.)
16. Halliburton. Microblock cement additive. URL: <https://www.halliburton.com/en-US/ps/cementing/materials-chemicals-additives/agents/lightweight/microblock-cement-additive.html> (12.9.2018.)
17. IADC. Tail cement. URL: <http://www.iadclexicon.org/tail-cement/> (7.12.2018.)
18. PetroWiki. Cement slurry weighting agents. URL: [https://petrowiki.org/Cement\\_slurry\\_weighting\\_agents](https://petrowiki.org/Cement_slurry_weighting_agents) (5.12.2018.)
19. Wellcem. Fluid loss in cement slurries for oil well applications. URL: <https://blog.wellcem.com/fluid-loss-in-cement-slurries-for-oil-well-applications> (15.1.2019.)

Prilog 1: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 18 5/8"



Prilog 2: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena dobivenog očvršćavanjem cementne kaše za cementaciju kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 13 3/8"

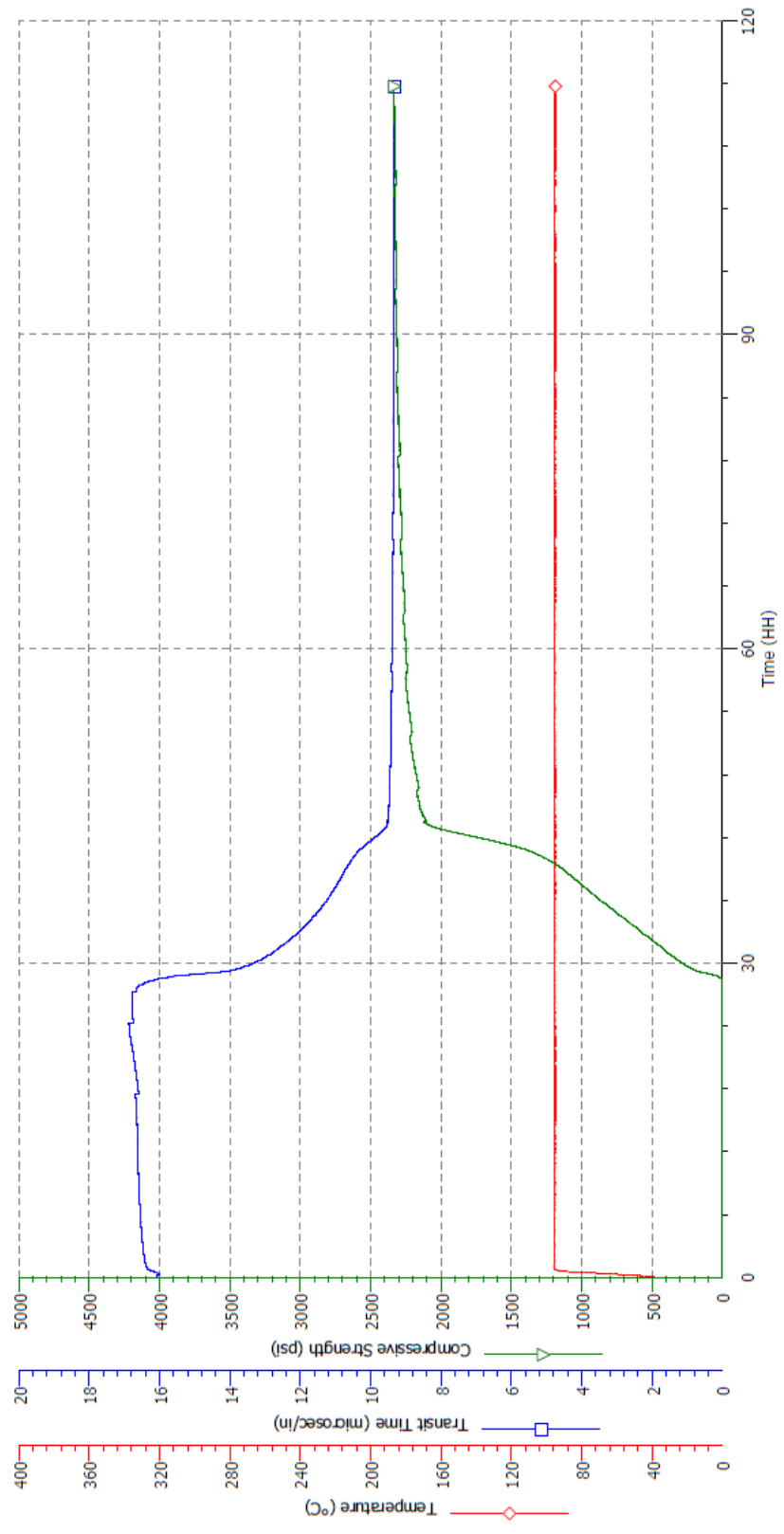


Prilog 3: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena 3A36

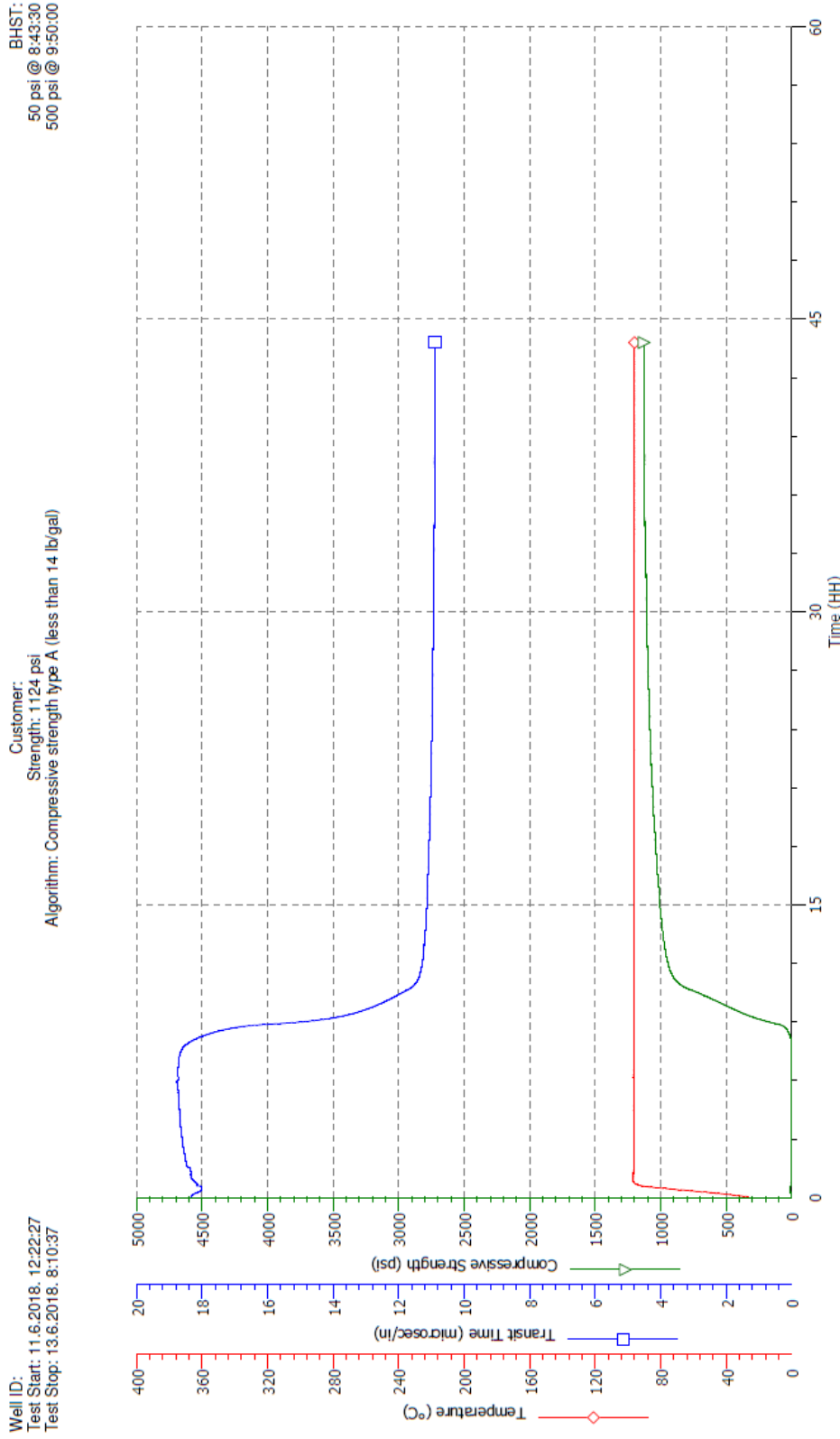
BHST:  
50 psi @ 28:51:00  
500 psi @ 32:13:30

Customer: Crocco  
Strength: 2325 psi  
Algorithm: Compressive strength type A (less than 14 lb/gal)

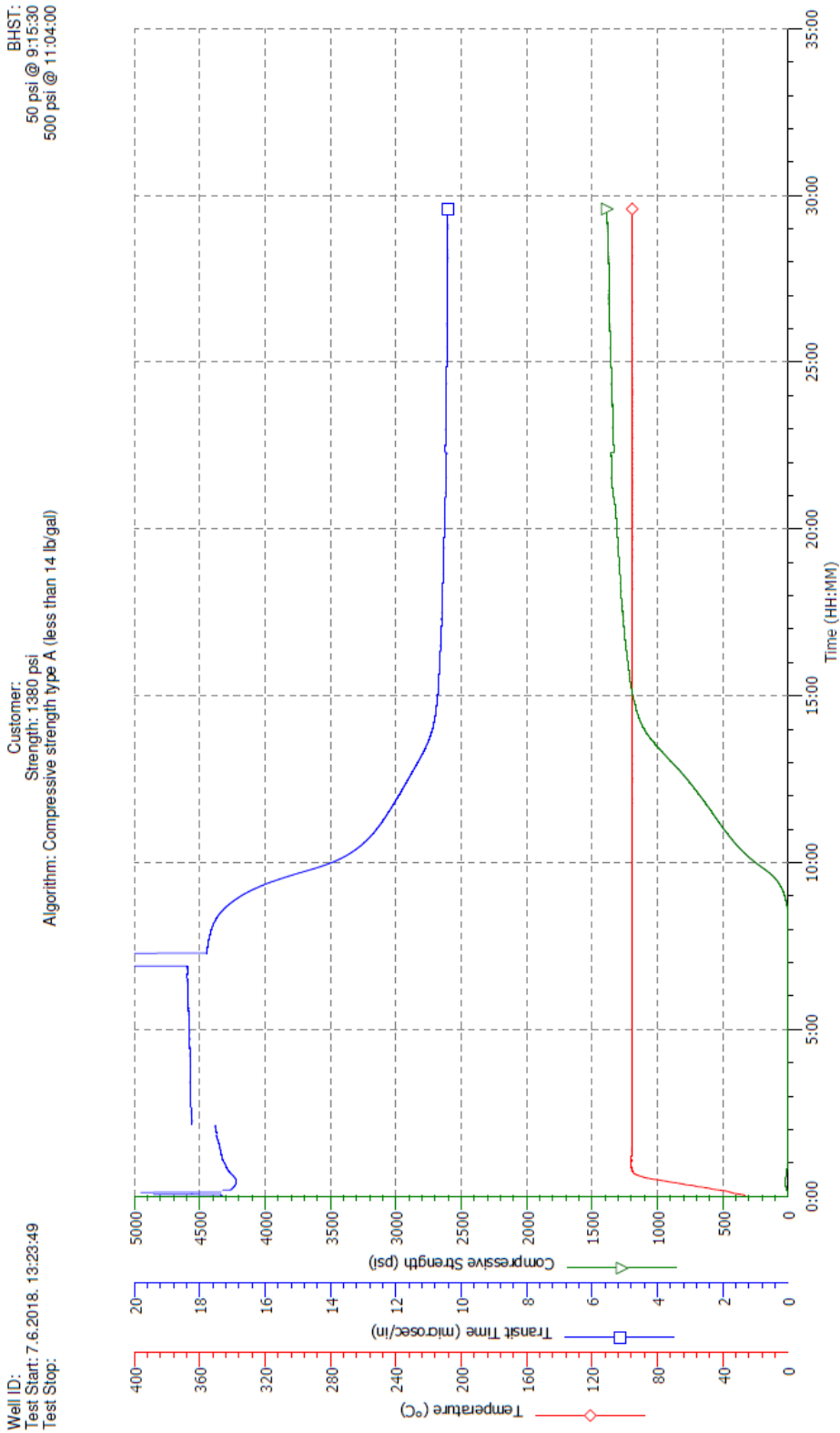
Well ID:  
Test Start: 2.5.2018, 13:31:56  
Test Stop: 7.5.2018, 7:14:55



Prilog 4: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena 3B10

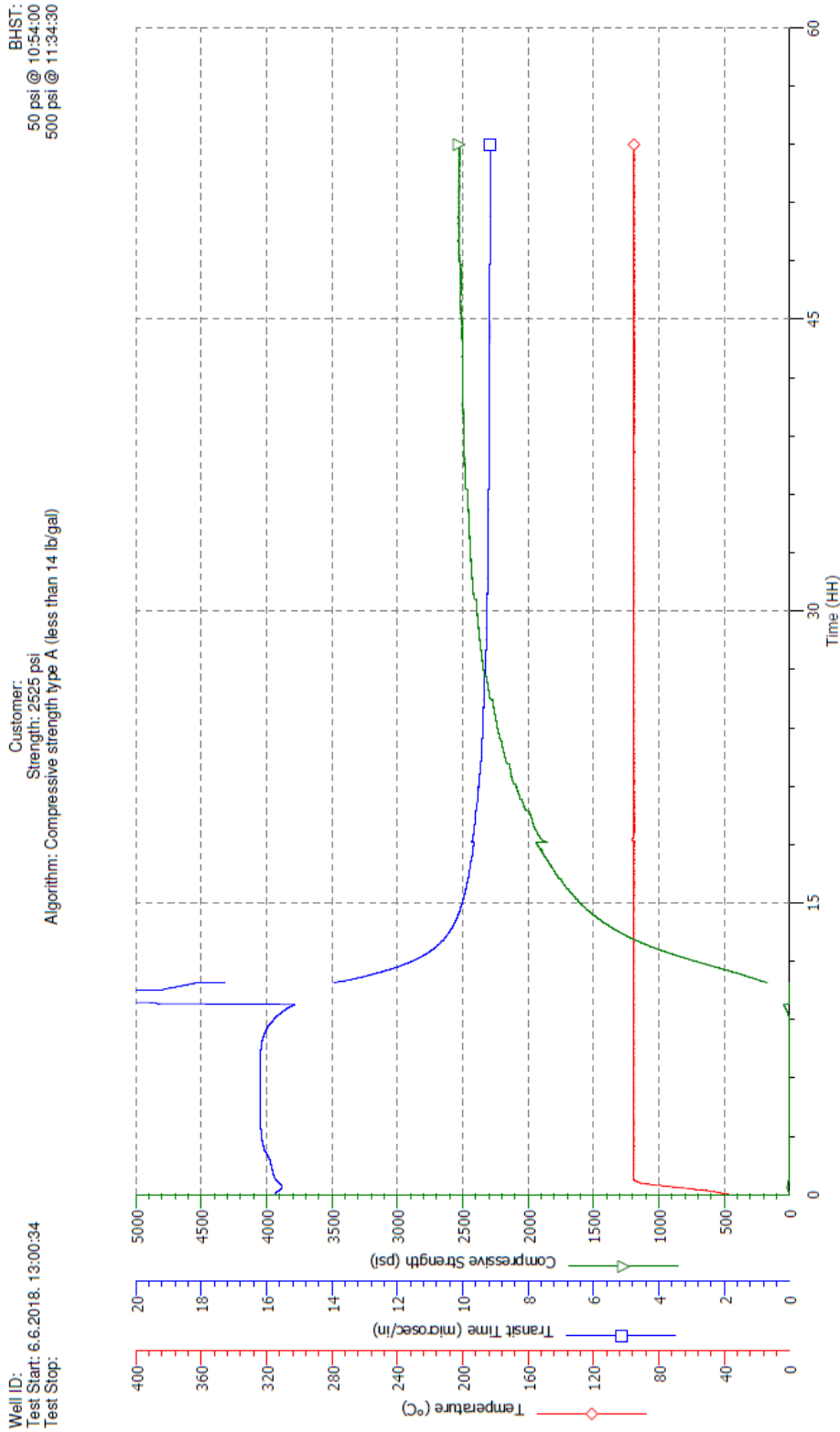


Prilog 5: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena 3D8





Prilog 6: Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena 3E2



## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom „Dizajn cementne kaše za geotermalnu bušotinu Draškovec-3“ izradila samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu i uz korištenje navedene literature.

---

Carla Ključarić