

Cementacija proširivih zaštitnih cijevi

Mesarić, Pavao

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:721774>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**



Repository / Repozitorij:

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



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

CEMENTACIJA PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI

Diplomski rad

Pavao Mesarić

N 306

Zagreb, 2020.

ZAHVALA

Srdačno zahvaljujem svojoj mentorici Prof. dr. sc. Nediljki Gaurini-Međimurec na strpljenju i pomoći kod pisanja ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem i svojoj obitelji na podršci za vrijeme mojeg studiranja.

CEMENTACIJA PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI

PAVAO MESARIĆ

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

Sažetak

Ovaj rad obrađuje tehnologiju proširivih zaštitnih cijevi, točnije proces njihove cementacije. Na početku je dan kratki povijesni pregled razvoja ove tehnologije od idejnih začetaka do tehnologije koja se u posljednjih dvadesetak godina naveliko koristi u naftnoj industriji. Opisane su vrste proširivih zaštitnih cijevi kao i područja njihove primjene. Cementacija proširivih zaštitnih cijevi u određenoj se mjeri razlikuje od cementacije klasičnih zaštitnih cijevi stoga su izazovi, specifičnosti i alternativna rješenja vezana uz njihovu cementaciju glavni predmet ovog rada. Sve teoretske tvrdnje i razmatranja te preporuke za obavljanje cementacije proširivih zaštitnih cijevi potkrjepljenje su s nekoliko primjera iz prakse.

Ključne riječi: proširive zaštitne cijevi, proširivi lajner, cementacija, cementna kaša, vrijeme zguščivanja, statička čvrstoća gela, plastična viskoznost, naprezanje pri pokretanju

Diplomski rad sadrži: 88 stranica, 16 tablica, 19 slika i 25 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: 16.10.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

EXPANDABLE CASING CEMENTATION

PAVAO MESARIĆ

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

Abstract

This thesis explores the technology of expandable casings, especially the cementing of such tubulars. A brief historical overview regarding the development of this technology from its conceptual beginnings to the technology which is now widely used in the petroleum industry is provided. Different types of expandable casings are described along with their scope of application. The cementation process of expandable casings is somewhat different from the cementation process of regular casings, thus challenges, specifics and alternative solutions for cementing expandable casings will be the main focus of this thesis. The theoretical part of this paper is supported by several case studies.

Keywords: solid expandable tubulars, expandable casing, expandable liner, cement slurry, cementation, thickening time, static gel strength, plastic viscosity, yield point

Thesis contains: 88 pages, 16 tables, 19 figures and 25 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: October 16th, 2020., Faculty of Mining, Geology and Petroleum
Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	II
POPIS OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA	III
POPIS KRATICA	V
KONVERZIJSKI FAKTORI IZ ANGLOSAKSONSKIH U SI JEDINICE	VI
1. UVOD	1
2. OPĆENITO O ZAŠTITNIM CIJEVIMA I CEMENTACIJI	3
2.1. ULOGE ZAŠTITNIH CIJEVI.....	3
2.2. KONSTRUKCIJA BUŠOTINE I TELESKOPSKI UČINAK.....	3
2.3. ULOGE CEMENTACIJE I CEMENTNOG KAMENA.....	6
3. POVIJESNI RAZVOJ I PODRUČJA PRIMJENE PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI	9
4. PROCES UGRADNJE PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI	15
4.1. VRSTE PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI.....	15
4.2. PROCES UGRADNJE, PROŠIRIVANJA I CEMENTACIJE PROŠIRIVOG LAJNERA U OTVORENOM KANALU BUŠOTINE.....	18
4.3. ALTERNATIVNI NAČINI UGRADNJE I CEMENTACIJE PROŠIRIVIH LAJNERA.....	23
5. PREPORUKE ZA CEMENTACIJU PROŠIRIVIH LAJNERA	24
5.1. PRIPREMA BUŠOTINE ZA CEMENTACIJU.....	24
5.2. CENTRALIZACIJA KOLONE ZAŠTITNIH CIJEVI.....	25
5.3. UKLANJANJE ISPLAKE.....	27
5.4. DIZAJN CEMENTNE KAŠE.....	30
6. UPORABA PRETHODNO PRIPREMLJENE CEMENTNE KAŠE	36
6.1. PRETHODNO PRIPREMLJENA CEMENTNA KAŠA.....	36
6.2. POTREBNA SVOJSTVA PRETHODNO PRIPREMLJENE CEMENTNE KAŠE ZA CEMENTACIJU PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI.....	39
6.2.1. Ispitivanje klasične cementne kaše.....	40
6.2.2. Proračun smične brzine cementne kaše tijekom proširivanja cijevi.....	41
6.2.3. Laboratorijsko ispitivanje prethodno pripremljene cementne kaše.....	43

6.2.4.	Ispitivanje vremena zgušćivanja cementne kaše	43
6.3.	PRIMJERI KORIŠTENJA PRETHODNO PRIPREMLJENE CEMENTNE KAŠE ZA CEMENTIRANJE PROŠIRIVIH LAJNERA	45
7.	PRIMJERI IZ PRAKSE.....	53
7.1.	UGRADNJA PROŠIRIVOG LAJNERA U HP/HT BUŠOTINI U MALEZIJI.....	53
7.1.1.	Podaci o bušotini.....	53
7.1.2.	Podaci o bušenju	56
7.1.3.	Ugradnja proširivog lajnera	56
7.1.4.	Daljnje operacije.....	58
7.1.5.	Cementna kaša	59
7.2.	UGRADNJA NAJDUBLJEG PROŠIRIVOG LAJNERA U BUŠOTINU EKSTREMNO VISOKOG TLAKA I TEMPERATURE U SREDOZEMNOM MORU U ODOBALJU EGIPTA	63
7.2.1.	Podaci o bušotini.....	64
7.2.2.	Ciljevi i izazovi ugradnje i cementacije proširivog lajnera	66
7.2.3.	Dizajn cementne kaše i razdjeljivača	69
7.2.4.	Ispitivanje cementne kaše	72
7.2.5.	Provedba ugradnje, proširivanja i cementacije lajnera.....	80
7.3.	USPOREDBA PODATAKA IZ PRETHODNO PRIKAZANIH PRIMJERA	81
8.	ZAKLJUČAK.....	84
9.	LITERATURA.....	86

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Tipična konstrukcija bušotine s jasno izraženim teleskopskim učinkom	4
Slika 2-2. Usporedba konstrukcija bušotina korištenjem konvencionalnih zaštitnih cijevi (lijevo), kombinacije konvencionalnih i proširivih zaštitnih cijevi (sredina) i proširivih zaštitnih cijevi (desno).....	5
Slika 3-1. Neki od mogućih načina ugradnji i primjena proširivih lajnera nekoliko vrsta..	11
Slika 3-2. U gornjem dijelu bušotine ugradnja proširive zaštitne cijevi predstavlja priliku, a u donjem dijelu potrebu.....	13
Slika 3-3. Ukupna duljina ugrađenih proširivih zaštitnih cijevi u razdoblju od kraja 1999. do kraja 2006. godine	14
Slika 4-1. Proširivi lajner u otvorenom kanalu (lijevo) i proširivi lajner u zacijevljenom kanalu bušotine (desno).....	16
Slika 4-2. Broj ugradnji proširivih lajnera u bušotine s obzirom na njihov promjer u periodu od 1999. do 2006. godine	18
Slika 4-3. Proces ugradnje proširivog lajnera u otvoreni kanal bušotine	19
Slika 5-1. Profili brzina kroz prstenasti prostor s obzirom na različite stupnjeve centralizacije.....	26
Slika 6-1. Postrojenje za pripremu cementne kaše izvan lokacije bušotine	37
Slika 7-1. Shematski prikaz konstrukcije bušotine Bergading Deep-3	55
Slika 7-2. Pretpostavljeni odnos gradijenata slojnog tlaka i tlaka frakturiranja izraženih preko gustoće isplake.....	64
Slika 7-3. Konstrukcija bušotine	66
Slika 7-4. Rezultati hidrauličke simulacije kretanja tlakova tijekom cementacije na dubini pete proširivog lajnera	67
Slika 7-5. Utjecaj volumena razdjeljivača na učinkovitost istiskivanja	70
Slika 7-6. Profili tlakova u intervalu u koji se ugrađuje proširivi lajner za vrijeme cementacije	72
Slika 7-7. Grafički prikaz testa vremena zgušćivanja s vrijednostima temperature, tlaka i konzistencije	75
Slika 7-8. Razvoj čvrstoće gela cementne kaše s obzirom na vrijeme, tlak i temperaturu..	76
Slika 7-9. Dijagram razvoja tlačne čvrstoće cementnog kamena dobiven pomoću ultrazvučnog analizatora.....	77

POPIS TABLICA

Tablica 6-1. Podaci o bušotini, cementnoj kaši i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u južnom Teksasu	46
Tablica 6-2. Podaci o bušotini, cementnoj kaši i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u dubokom moru Meksičkog Zaljeva	47
Tablica 6-3. Podaci o bušotini, cementnoj kaši i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u jugoistočnom Teksasu	48
Tablica 6-4. Podaci o cementnoj kaši, bušotini i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u jugoistočnom Teksasu	49
Tablica 6-5. Podaci o cementnoj kaši, bušotini i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u južnom Teksasu	50
Tablica 6-6. Podaci o bušotini, cementnoj kaši i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u Meksičkom Zaljevu	51
Tablica 7-1. Svojstva cementne kaše korištene za cementiranje proširivog lajnera u bušotini Bergading Deep-3	60
Tablica 7-2. Očitavanja smičnog naprežanja na Fann viskozimetru	60
Tablica 7-3. Razvoj čvrstoće gela cementne kaše s vremenom	61
Tablica 7-4. Konzistencija cementne kaše kroz vrijeme fluidnosti	62
Tablica 7-5. Tlačne čvrstoće cementnog kamena	63
Tablica 7-6. Potrebna svojstva cementne kaše i kamena za cementiranje proširivog lajnera	69
Tablica 7-7. Proces utiskivanja fluida i proširenja lajnera s navedenim karakteristikama pojedinih fluida i vremenom trajanja svakog koraka	74
Tablica 7-8. Rezultati ispitivanja kompatibilnosti fluida	79
Tablica 7-9. Rezultati ispitivanja cementne kaše primijenjene za cementaciju proširivog lajnera	80
Tablica 7-10. Usporedba karakteristika bušotina, lajnera i fluida za cementaciju proširivih lajnera u Maleziji i Egiptu	81

POPIS OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

OZNAKA	ZNAČENJE	SI MJERNA JEDINICA
γ_{EF}	Efektivna smična brzina	s^{-1}
v	Brzina protjecanja kaše kroz prstenasti prostor	m/s
D_{EF}	Efektivni promjer	m
Q	Dobava	m^3/s
G	Koeficijent za lakše računanje	-
Z	Koeficijent za lakše računanje	-
y	Koeficijent za lakše računanje	-
n	Indeks toka	-
D_B	Promjer kanala bušotine	m
D_{dl}	Promjer dlijeta	m
D_l	Vanjski promjer klasičnog lajnera	m
H_b	Dubina bušotine	m
D_{zc}	Vanjski promjer zaštitnih cijevi	m
H_{pzc}	Dubina ugradnje pete zaštitnih cijevi	m
H_{vl}	Dubina ugradnje vješalice lajnera	m

D_{pl}	Vanjski promjer proširivog lajnera	m
H_{vpl}	Dubina ugradnje vješalice proširivog lajnera	m
H_{ppl}	Dubina ugradnje pete proširivog lajnera	m
H_{pl}	Dubina ugradnje pete klasičnog lajnera	m
l_{zc}	Duljina kolone zaštitnih cijevi	m
$D_{bš}$	Vanjski promjer bušačih šipki	m
$q_{bš}$	Jedinična težina bušačih šipki	N/m
$l_{bš}$	Duljina bušačih šipki	m
l_l	Duljina klasičnog lajnera	m
D_{vpl}	Vanjski promjer vješalice proširivog lajnera	m
q_{vpl}	Jedinična težina vješalice proširivog lajnera	N/m
l_{vpl}	Duljina vješalice proširivog lajnera	m
l_{ok}	Duljina otvorenog kanala bušotine	m
D_{pl}	Vanjski promjer proširivog lajnera	m
q_{pl}	Jedinična težina proširivog lajnera	N/m
l_{pl}	Duljina proširivog lajnera	m

POPIS KRATICA

- API – Američki naftni institut (engl. *American Petroleum Institute*)
- BHCT – Temperatura na dnu bušotine u cirkulaciji (engl. *Bottom Hole Circulation Temperature*)
- BHP – Tlak na dnu bušotine (engl. *bottom hole pressure*)
- BHST – Statička temperatura na dnu bušotine (engl. *Bottom Hole Static Temperature*)
- BOP – preventerski sklop (engl. *blowout preventer*)
- BWOC – na masu cementa (engl. *by weight of cement*)
- CBL – karotažno mjerenje kvalitete cementne veze (engl. *cement bond log*)
- CFD – računalna simulacija dinamike fluida (engl. *computational fluid dynamics*)
- CHL – proširivi lajner u zacijevljenom dijelu kanala bušotine (engl. *cased hole liner*)
- CS – tlačna čvrstoća (engl. *compressive strength*)
- ECD – ekvivalentna gustoća fluida u cirkulaciji (engl. *equivalent circulating density*)
- eHP/HT – uvjeti ekstremno visokog tlaka i temperature (engl. *extreme high pressure/high temperature*)
- HP/HT – uvjeti visokog tlaka i temperature (engl. *high pressure/high temperature*)
- LCM – materijal za zatvaranje mjesta gubljenja isplake (engl. *lost circulation material*)
- LCP – prethodno pripremljena cementna kaša (engl. *liquid cement premix*)
- LOT – test primanja naslaga (engl. *leakoff test*)
- LWA – tekući oteživači (engl. *liquid weighting agents*)
- MMF – faktor mobilnosti isplake (engl. *mud mobility factor*)
- MPD – bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *managed pressure drilling*)
- OD – vanjski promjer (engl. *outside diameter*)
- OHC – proširivi lajner koji se ugrađuje u otvoreni kanal bušotine, ali se ne cementira, već se u kanal učvršćuje brtvenicama (engl. *open hole clad*)
- OHL – proširivi lajner u otvorenom dijelu kanala bušotine (engl. *open hole liner*)
- PAT – površinski aktivne tvari (sufraktanti) (engl. *sufractants*)
- PEI – polietilenimin (engl. *polyethylenimine*)
- PNS – polinaftalen sulfonat (engl. *polynaphthalene sulfonate*)
- SET – naziv za proširive zaštitne cijevi (engl. *solid expandable tubulars*)
- SGS – statička čvrstoća gela (engl. *static gel strenght*)
- UCA - ultrazvučni analizator razvoja tlačne čvrstoće cementnog kamena (engl. *ultrasonic cement analyzer*)
- WOC – vrijeme čekanja na stvrdnjavanje cementnog kamena (engl. *wait-on-cement*)

KONVERZIJSKI FAKTORI IZ ANGLOSAKSONSKIH U SI JEDINICE

ANGLOSAKSONSKA JEDINICA	KONVERZIJSKI FAKTOR	SI JEDINICA
in	0,02540	m
ft	0,30480	m
gal	0,00379	m ³
lb _f /100 ft ²	0,47880	Pa
bb1	0,15899	m ³
ppg	119,82643	kg/m ³
cP	0,00100	Pa·s
psi	6 894,75729	Pa
psi/ft	22 620,59478	Pa/m
kip	4 448,22162	N
lb _m	0,45359	kg
lb _f /ft	14,59390	N/m
°F	([°F] – 32)/1,8	°C

1. UVOD

Ideja i potreba za proširivanjem zaštitnih cijevi nakon njihovog spuštanja u bušotinu već dugo vremena postoji u naftnoj industriji, gotovo od samog njenog začetka. Takve cijevi uvelike bi smanjile troškove rješavanja problema u bušotinama kao što su trošenje i korozija kolona zaštitnih cijevi, izolacija problematičnih slojeva, prekrivanje perforacija i slično, ali i troškove same izrade bušotina. Međutim, zbog tehnoloških izazova, tehnologija proširivih zaštitnih cijevi (engl. *solid expandable tubulars – SET*) zaživjela je, u komercijalnom smislu, tek u posljednjih dvadesetak godina (Dupal et al., 2000; Stringer i Farley, 2013).

Prethodnik ove tehnologije bile su proširive zakrpe zaštitnih cijevi (engl. *expandable casing patches*) (Heathman et al., 2007). Te zakrpe koriste se u naftnoj industriji već desetljećima, no za razliku od proširivih zaštitnih cijevi, one ne mogu samostalno funkcionirati kao zaštitne cijevi ili lajneri i odolijevati tlakovima bez prisustva prave kolone zaštitnih cijevi iza njih te ne mogu biti cementirane u bušotinu kao konvencionalne zaštitne cijevi ili lajneri (Heathman et al., 2007).

Proširive zaštitne cijevi u biti funkcioniraju i imaju potpuno jednake zadaće kao i konvencionalne zaštitne cijevi ili lajneri. Radi se o cijevima koje se u bušotinu spuštaju kao lajneri određenog početnog vanjskog promjera, te se, obično nakon protiskivanja cementne kaše u izacijevni prstenasti prostor, proširuju vretenom ili rotirajućom alatkom na njihov konačni promjer. Alatka za proširivanje napreže cijev iznad njene granice tečenja, ali ispod njene tlačne čvrstoće, što uzrokuje plastičnu deformaciju cijevi, proširujući cijev na konačan promjer. Cijev u tom procesu minimalno gubi na debljini stijenke, ali se skraćuje. Uz to cijev ne gubi na otpornosti na rasprskavanje, no smanjuje joj se otpornost na gnječenje, ali u prihvatljivim granicama prema zahtjevima API standarda (Dupal et al., 2000; Filippov et al., 1999). Zbog ovih mogućnosti, tehnologija proširivih zaštitnih cijevi postala je važan dio naftne industrije.

Nova i inovativna tehnologija često značajno utječe na povezane proizvode i procese. To u nekoj mjeri vrijedi i u slučaju proširivih zaštitnih cijevi i njihovog utjecaja na proces cementacije. U ranoj fazi implementacije ove tehnologije, velika se pažnja posvećivala razvoju dizajna, pripreme, sastava i svojstava cementnih kaša. Tako se za cementaciju proširivih zaštitnih cijevi razmatralo sve od modificiranih konvencionalnih cementnih kaša do visoko specijaliziranih kaša koje nisu bile bazirane na portland cementu kao što su

smole. Saznanja stečena korištenjem i ispitivanjem takvih visoko specijaliziranih kaša pokazala su da većina tih kaša nije primjerena za cementiranje proširivih zaštitnih cijevi te da bi njihova primjena trebala ostati ograničena na vrlo specifične situacije.

Umjesto da se koriste atipične i visoko specijalizirane cementne kaše i tehnike cementiranja, zaključeno je da se puno učinkovitiji pristup cementiranju proširivih zaštitnih cijevi sastoji od prilagođenih procedura pripreme, ispitivanja i utiskivanja cementne kaše, logistike i treniranja osoblja za obavljanje cementacije (Heathman et al., 2007). Tako se cementacija proširivih zaštitnih cijevi zbog specifičnosti njihove ugradnje, u određenoj mjeri razlikuje od cementacije klasičnih zaštitnih cijevi. Specifičnosti, problematika i alternativna rješenja izvođenja cementacije proširivih zaštitnih cijevi predmet su ovog diplomskog rada.

2. OPĆENITO O ZAŠTITNIM CIJEVIMA I CEMENTACIJI

U ovom će poglavlju ukratko biti iznesene zadaće zaštitnih cijevi i razlozi za njihovo cementiranje u bušotinu.

2.1. ULOGE ZAŠTITNIH CIJEVI

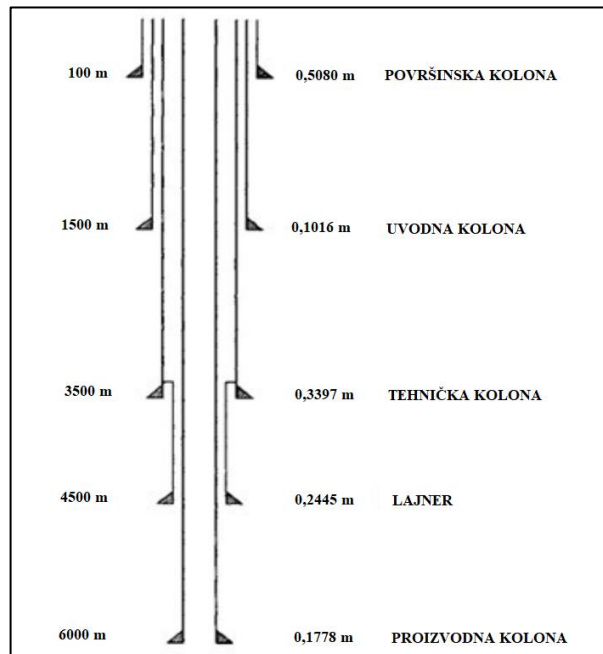
Zaštitne cijevi neizbježan su element konstrukcije svake bušotine. One obavljaju mnoštvo zadaća, među kojima su najvažnije (Matanović, 2013):

- ostvarivanje nepropusne veze površine i ležišta,
- sprječavanje urušavanja i ispiranja dijelova kanala bušotine,
- onemogućavanje zagađivanja plitkih vodonosnih slojeva fluidima iz dublje zaliježućih slojeva,
- odjeljivanje podinskih voda od ugljikovodika u ležištu,
- ograničavanje prostora za pridobivanje ugljikovodika unutar samog kanala bušotine,
- omogućavanje kontrole tlaka u bušotini,
- omogućavanje ugradnje proizvodne i druge opreme,
- zaštita plićih slojeva od velikih tlakova stupca isplake potrebnih za nadvladavanje slojnih tlakova tijekom bušenja dubljih slojeva itd.

2.2. KONSTRUKCIJA BUŠOTINE I TELESKOPSKI UČINAK

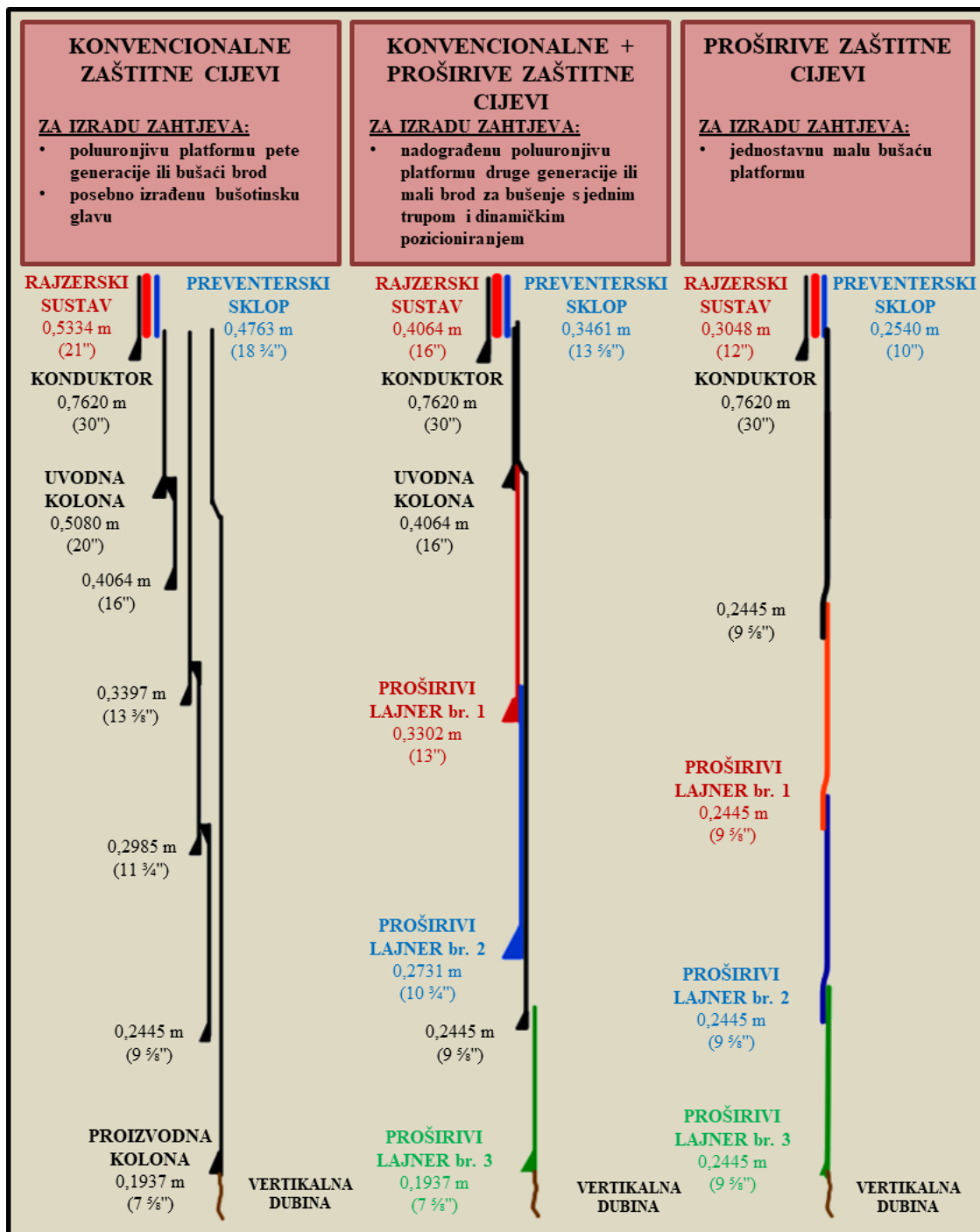
U bušotinu se obično ugrađuje nekoliko kolona zaštitnih cijevi. Obično su to: konduktor (vodeća) ili "šoder" kolona (engl. *conductor pipe*), uvodna (površinska) kolona (engl. *surface casing*), tehnička kolona (engl. *intermediate casing*) (može ih biti i više) te proizvodna (eksploatacijska) kolona (engl. *production casing*), a ponekad se ugrađuje i lajner (engl. *liner*) (kolona koja se ne ugrađuje od ušća do dna, već se vješa unutar prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi) (Krištafor, 2009). Pod pojmom konstrukcije bušotine podrazumijeva se definiranje do koje će se dubine ugraditi pojedina kolona zaštitnih cijevi određenog promjera. U klasičnoj konstrukciji bušotine, promjer kanala bušotine smanjuje se s povećanjem njene dubine zbog tzv. teleskopskog učinka. To u praksi predstavlja problem, jer ograničava dubinski doseg bušotine i ograničava promjer dubinske proizvodne opreme koju je po završetku izrade bušotine u nju moguće ugraditi. Dodatni problem nastaje kada se bušotinom prolazi kroz neočekivano problematične slojeve što iziskuje ugradnju dodatne kolone, a to za posljedicu ima još veće smanjenje

promjera kanala bušotine. Na slici 2-1. prikazana je tipična konstrukcija bušotine gdje je jasno vidljiv teleskopski učinak koji nastaje kao posljedica ugradnje svake sljedeće kolone zaštitnih cijevi manjeg nominalnog promjera od promjera prethodno ugrađene kolone.



Slika 2-1. Tipična konstrukcija bušotine s jasno izraženim teleskopskim učinkom (Rahman i Chilingarian, 1995)

Veliki potencijal tehnologije proširivih zaštitnih cijevi najbolje se vidi na slici 2-2. koja prikazuje usporedbu konstrukcije triju teoretskih bušotina u odobalju (Dupal et al., 2000). Za konstrukciju prve bušotine korištene su samo konvencionalne zaštitne cijevi i lajneri. Druga bušotina u svojem dizajnu sadrži i konvencionalne, ali i proširive zaštitne cijevi, odnosno lajnere, dok se u konstrukciji treće bušotine nalaze samo proširivi lajneri. Treća bušotina zapravo je od površine do dna izbušena dlijetima jednakog promjera uz pomoć proširivača te ona ima jedinstven promjer od ušća do dna (engl. *monobore well*). Pravu prednost proširivih zaštitnih cijevi najbolje pokazuje činjenica da sve ove bušotine imaju jednaku konačnu (vertikalnu) dubinu. Promjeri zadnje ugrađene kolone u prvoj i drugoj bušotini su jednaki i iznose 0,1937 m (7 5/8"), dok je promjer posljednje ugrađene kolone u trećoj bušotini čak i veći i iznosi 0,2445 m (9 5/8"). U drugom i trećem slučaju se ne radi o proizvodnim kolonama, no ugradnja proizvodne kolone promjera 0,1937 m (7 5/8") u trećem slučaju sasvim je moguća. U prvom slučaju upravo je takva proizvodna kolona ugrađena u prijašnju kolonu od 0,2445 m (9 5/8"), dok se u drugom slučaju može ugraditi proizvodna kolona nešto manjeg promjera.



Slika 2-2. Usporedba konstrukcija bušotina korištenjem konvencionalnih zaštitnih cijevi (lijevo), kombinacije konvencionalnih i proširivih zaštitnih cijevi (sredina) i proširivih zaštitnih cijevi (desno) (Dupal et al., 2000)

Budući da se u ovim primjerima radi o odobalnim bušotinama, za izradu prve bušotine koja ima klasični dizajn kolona zaštitnih cijevi potreban je rajzerski sustav promjera čak 0,5334 m (21") te preventerski sklop (engl. *blowout preventer* – BOP) promjera 0,4763 m (18 ¾"). Uvodna kolona u ovom slučaju promjera je 0,5080 m (20").

U drugom se slučaju već vidi značajno smanjenje potrebnih promjera cijevi na površini. Tako je potrební promjer rajzerskog sustava 0,4064 (16"), preventerskog sklopa 0,3461 m (13 5/8") te uvodne kolone 0,4064 m (16").

U trećoj bušotini potrebni promjeri na površini još su manji. Za dostizanje iste konačne dubine uz mogućnost ugradnje proizvodne kolone jednakog promjera kao u prvom slučaju, potreban je rajzerski sustav promjera svega 0,3048 m (12") te preventerski sklop promjera 0,2540 (10").

Na vrhu slike 2-2. također su navedena postrojenja i oprema koja bi bila potrebna da bi se ovakve bušotine izradile. Za izradu prve bušotine bila bi potrebna poluuronjiva platforma pete generacije ili bušaći brod i posebno izrađena bušotinska glava. Za izradu druge bušotine potrebna je nadograđena poluuronjiva platforma druge generacije ili mali brod za bušenje s jednim trupom i dinamičkim pozicioniranjem (engl. *small DP monohull*). Za izradu treće bušotine u koju se ugrađuju samo proširive zaštitne cijevi potrebna je jednostavna mala bušaća platforma (Dupal et al., 2000). Temeljem ovih činjenica, lako se može zaključiti da se korištenjem proširivih zaštitnih cijevi za dobivanje istih rezultata (izrada bušotina do određene dubine određenog promjera proizvodne kolone) uvelike može uštedjeti ne samo na materijalu, odnosno cijevima, nego i na unajmljivanju manjih bušaćih postrojenja. Proširive zaštitne cijevi uvelike smanjuju problem teleskopskog učinka.

2.3. ULOGE CEMENTACIJE I CEMENTNOG KAMENA

Kako bi zaštitne cijevi mogle obavljati sve zadatke, potrebno ih je cementirati u bušotinu. Cementaciji se pristupa nakon spuštanja kolone zaštitnih cijevi u bušotinu. Kroz kolonu (ili kroz niz bušaćih alatki ukoliko se radi o cementaciji lajnera) utiskuje se cementna kaša te se nakon toga protiskuje u izacijevni prstenasti prostor do željene visine. Da bi cementacija bila uspješna, cementna kaša mora posjedovati svojstva koja omogućuju (Gaurina-Međimurec, 1995):

- njeno uspješno protiskivanje kroz kolonu zaštitnih cijevi (ili bušaćih alatki) i podizanje prstenastim prostorom na željenu visinu s raspoloživom opremom;
- nakon protiskivanja, pravovremeno očvršćivanje u cementni kamen zadovoljavajuće tlačne čvrstoće;
- postojanost svojstava cementnog kamena potrebnih za izoliranje naslaga i učvršćenje kolone zaštitnih cijevi.

Na dizajn cementne kaše utječu: dubina bušotine, temperatura na dnu bušotine, tip isplake, potrebna gustoća, vrijeme protiskivanja, kvaliteta vode za pripremu kaše, veličina filtracije, tip protjecanja, taloženje čestica i količina slobodne vode, kvaliteta cementa, praškasti i tekući aditivi, razvoj čvrstoće, kvaliteta laboratorijskih ispitivanja cementa, kvaliteta laboratorijske opreme te kemijsko-fizikalna svojstva naslaga stijena u koje se cementiraju zaštitne cijevi (Gaurina-Međimurec, 1995).

Kod dizajna cementne kaše potrebno je koristiti točne vrijednosti: statičke temperature na dnu bušotine (engl. *Bottom Hole Static Temperature – BHST*), temperature u optoku na dnu (engl. *Bottom Hole Circulation Temperature – BHCT*) i temperature tijekom proizvodnje. Temperaturni uvjeti cementiranja posebno su važni, jer temperatura u optoku na dnu bušotine djeluje na: vrijeme zgušćivanja, reološka svojstva, vrijeme vezivanja i razvoj tlačne čvrstoće (Gaurina-Međimurec, 1995).

Komponente koje obično ulaze u sastav cementne kaše su: cement, voda, usporivač ili ubrzivač, aditiv za smanjenje filtracije, dispergator, kvarcni pijesak te olakšivač ili oteživač (Gaurina-Međimurec, 1995).

API odbor za standardizaciju bušotinskih cementa (engl. *API Committee on Standardisation of Well Cements*) publicirao je API Spec 10 koji obuhvaća cimente, materijale koji se dodaju cementu (npr. bentonit, lebdeći pepeo i sl.), način uzimanja uzoraka cementa, način pripreme cementne kaše, postupke pri određivanju svojstava cementne kaše i cementnog kamena te instrumente potrebne za njihovo određivanje. Osnovna komponenta za pripremu cementne kaše je portland cement. Prema API Spec 10, bušotinski cementi svrstani su u devet klasa koje zadovoljavaju propisane kemijske i fizikalne zahtjeve. Te klase označene su slovima: A, B, C, D, E, F, G, H i J. Unutar pojedine klase postoje tipovi ovisno o otpornosti cementa prema djelovanju sulfata. Klase se međusobno razlikuju prema tome za koju su dubinu te uvjete tlaka i temperature primjerene (Gaurina-Međimurec, 1995). Sve ovo odnosi se na cementiranje konvencionalnih zaštitnih cijevi. Posebnosti koje dolaze s uporabom proširivih zaštitnih cijevi bit će objašnjene u kasnijim poglavljima, ali većina onoga što vrijedi za cementaciju konvencionalnih zaštitnih cijevi, vrijedi i za cementaciju proširivih zaštitnih cijevi.

Glavna uloga cementacije jest potpuna i trajna zonalna izolacija. Uz to, uspješna cementacija pretpostavlja: učvršćivanje zaštitnih cijevi u bušotini i podržavanje njihove težine, zaštitu zaštitnih cijevi od korozivnih fluida, onemogućavanje migracije slojnih

fluida iza kolone zaštitnih cijevi te osiguravanje tlačnog i mehaničkog integriteta bušotine dobrom, hidraulički nepropusnom vezom između formacije, cementnog kamena i kolone zaštitnih cijevi (Kuprešan, 2014).

Proširive zaštitne cijevi moraju obavljati sve zadatke spomenute u prvom dijelu ovog poglavlja. Odgovarajuće dizajnirana cementna kaša te pravilno obavljena cementacija osigurat će obavljanje svih spomenutih zadataka cementnog kamena i zaštitnih cijevi te će spriječiti nastajanje kanalića (engl. *microannuli*) i pukotina u cementnom kamenu. Sve te uloge moraju biti obavljane u uvjetima različitih naprezanja u bušotini kroz njen životni vijek (Kuprešan, 2014).

3. POVIJESNI RAZVOJ I PODRUČJA PRIMJENE PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI

Ideja o korištenju proširivih zaštitnih cijevi u naftnoj industriji nije nova. Već 1863. godine patentiran je koncept proširivih zaštitnih cijevi, a 1934. godine patentirane su proširive cijevne alatke (engl. *expandable shaped-OD (outside diameter) system*) (Stringer i Farley, 2013). Već je davno, dakle, u naftnoj industriji postalo jasno da se sve dubljim bušenjem javlja problem ugrađivanja sve više kolona zaštitnih cijevi. Ugrađivanje novih kolona izravno uzrokuje smanjenje promjera bušotine, s obzirom da se nova kolona mora spustiti do dna kroz prethodno ugrađenu kolonu. Naiđe li se, tijekom bušenja, na problematične slojeve, koji iziskuju dodatno i prethodno neplanirano ugrađivanje još jedne kolone, promjer se dodatno smanjuje. Nekad to može biti vrlo izraženo te se promjer smanji do te mjere da se bušotina više ne može upotrebljavati. Promjer može postati premalen za: ugradnju potrebne opreme za proizvodnju ugljikovodika, održivo crpljenje fluida iz podzemlja, nastavak bušenja i posljedično tome, dosezanje potrebne dubine bušotine (Stringer i Farley, 2013).

Ispočetka, ideja o proširivanju zaštitnih cijevi u svrhu smanjivanja neproduktivnog vremena bušenja pokrivanjem nestabilnih slojeva i slojeva s visokim slojnim tlakom ili niskim tlakom frakturiranja uz ostvarivanje što manjeg teleskopskog učinka, odnosno smanjenja promjera bušotine, smatrala se velikim preokretom u bušačkoj praksi. Međutim, ono što je potaknulo brži razvoj i komercijalizaciju ove tehnologije jesu veće proizvodne mogućnosti koje je omogućila naprednija konstrukcija bušotine i optimiranje promjera dubinske proizvodne opreme (Stringer i Farley, 2013).

Iako su ideje o proširivim cijevima postojale još u 19. stoljeću, same cijevi se nisu primjenjivale sve dok nije došlo do razvoja spojnice koje se također mogu proširivati kao i ostatak cijevi (engl. *expandable connections*) čije su stjenke s vremenom postale deblje. Takav napredak omogućio je ugradnju proširivih zaštitnih cijevi većih duljina (Stringer i Farley, 2013).

Prvi put tehnologija proširivih zaštitnih cijevi na terenu je isprobana tek 1993. godine. To je ponajprije bio dokaz koncepta, a ne sama primjena, a operaciju je izvršila kompanija Royal Dutch Shell. Cijev je bila napravljena od posebnog automobilskeg čelika koji se koristi za pojačavanje rešetkaste konstrukcije u automobilima koja služi za amortiziranje sudara (engl. *crumple zones*). Cijev je bila proširena za 22%, s 0,1016 m (4") na 0,1240 m

(4,88"). Umjesto spojnice, za spajanje cijevi koristili su se varovi. To, dakako, nije moglo predstavljati rješenje za komercijalnu upotrebu budući da varenje zaštitnih cijevi na terenu ne dolazi u obzir, koliko zbog nepraktičnosti, potrebnih preinaka na postrojenju i u procesu ugradnje te sigurnosnih razloga, toliko i zbog nedostižnosti potrebnog mehaničkog i tlačnog integriteta kolone prije, za vrijeme i nakon ekspanzije (Filipov et al., 1999).

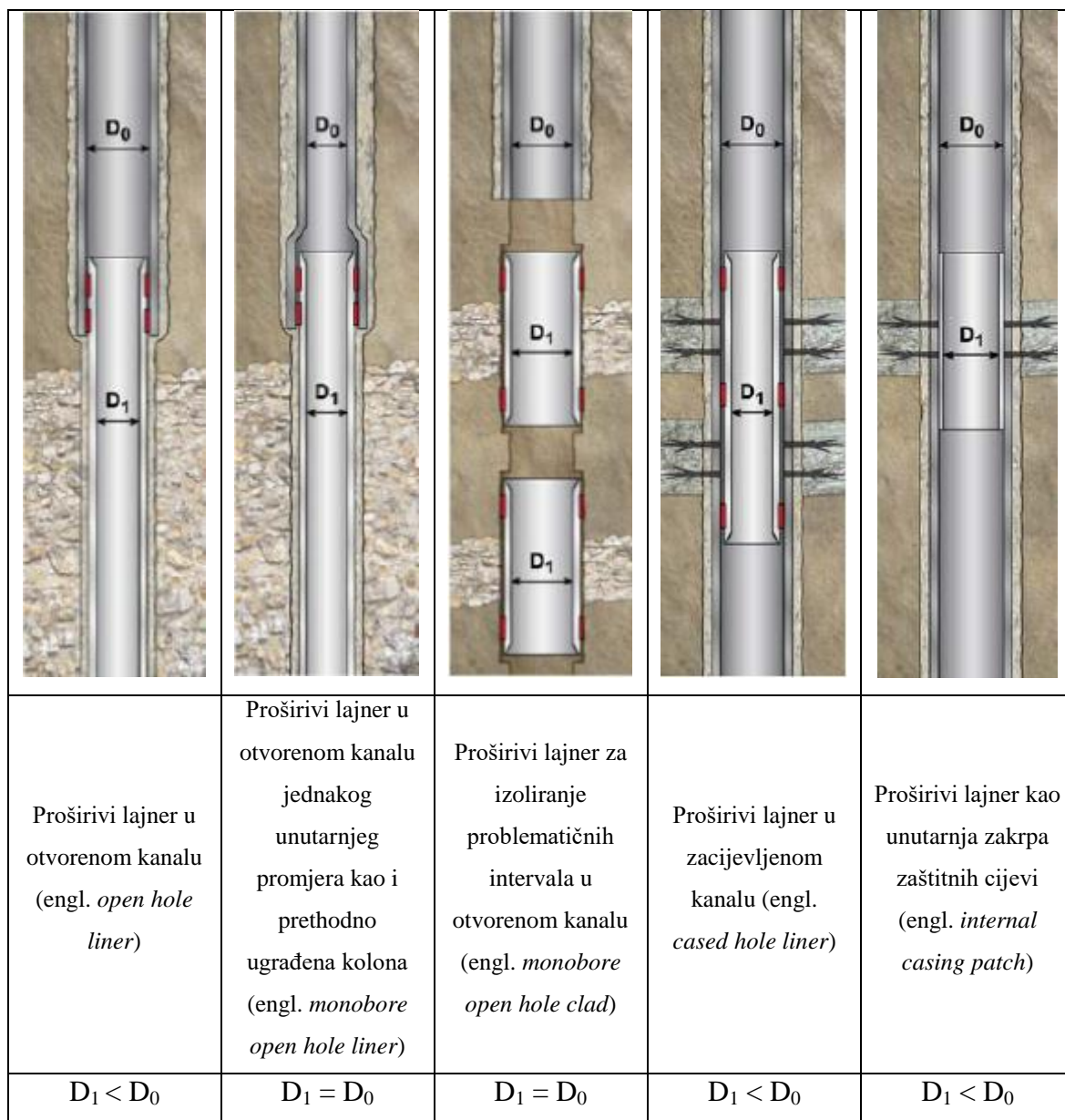
U srpnju 1998. godine postignut je značajan napredak u tehnologiji proširivih navojnih spojeva, odnosno, bilo je konačno omogućeno spajanje proširivih zaštitnih cijevi pomoću navojnih spojeva, koji su se prilikom ugradnje zajedno s cijevi proširili na konačan promjer. Taj veliki napredak omogućio je kompanijama da bušotinama dosežu ležišta koja prije nisu mogla biti dosegnuta (Filipov et al., 1999).

Prva komercijalna ugradnja kolone proširivih zaštitnih cijevi izvedena je u plitkim vodama Meksičkog Zaljeva u studenom 1999. godine (Grant i Bullock, 2005). Svrha ove ugradnje bila je smanjiti cijenu izrade bušotine korištenjem zaštitnih cijevi manjeg promjera. Tijekom sljedećih pet godina zabilježena je ugradnja proširivih zaštitnih cijevi u preko 300 bušotina (Grant i Bullock, 2005). Općenito, jedna od važnijih prednosti korištenja proširivih zaštitnih cijevi jest smanjenje početnog promjera bušotine (zbog smanjenog teleskopskog učinka uslijed korištenja proširivih cijevi to postaje moguće) i smanjenje broja zaštitnih cijevi koje se ugrađuju. Zahvaljujući tome, s manje se cijevi manjeg promjera mogu izbušiti bušotine istih dubina. To u prvom redu smanjuje cijenu nabave cijevi, ali uz to, smanjuje se i cijena najma bušačkih postrojenja, s obzirom da zbog manjeg promjera i broja zaštitnih cijevi, istu bušotinu može izbušiti manje i jeftinije postrojenje (Dupal et al., 2000).

U laboratorijskim uvjetima postignuta su uspješna proširenja cijevi i do 25% (odnos vanjskog promjera proširive zaštitne cijevi prije i nakon proširivanja), no u praktičnim primjenama proširivih zaštitnih cijevi početnog promjera od 0,0889 m (3 ½") do 0,4064 m (16"), zahtijevano proširenje obično ne prelazi 20% (Dupal et al., 2000).

U počecima, proširive zaštitne cijevi bile su korištene uglavnom kao sredstvo rješavanja problema prilikom bušenja ili opremanja bušotine za proizvodnju kako bi se ublažilo neplanirano smanjivanje promjera kanala. Mnogi su smatrali primjenu proširivih lajnara krajnjom nuždom, te su radije koristili konvencionalne cijevi i procedure dokle god je to bilo moguće. Proširive su zaštitne cijevi, dakle, bile gledane kao rješenje u nepredviđenim situacijama nailaska na problematične slojeve, u slučaju kada su prethodne

kolone bile ugrađene preplitko, za prekrivanje nestabilnih zona i zona gubljenja isplake, ili za povećanje margina bušenja. U to vrijeme, proširivi lajneri su se uglavnom ugrađivali u visoko rizičnim situacijama kad su operatori pokušavali spasiti bušotinu (Stringer i Farley, 2013). Neki od mogućih načina ugradnji i primjena proširivih lajnera nekoliko vrsta prikazani su na slici 3-1.



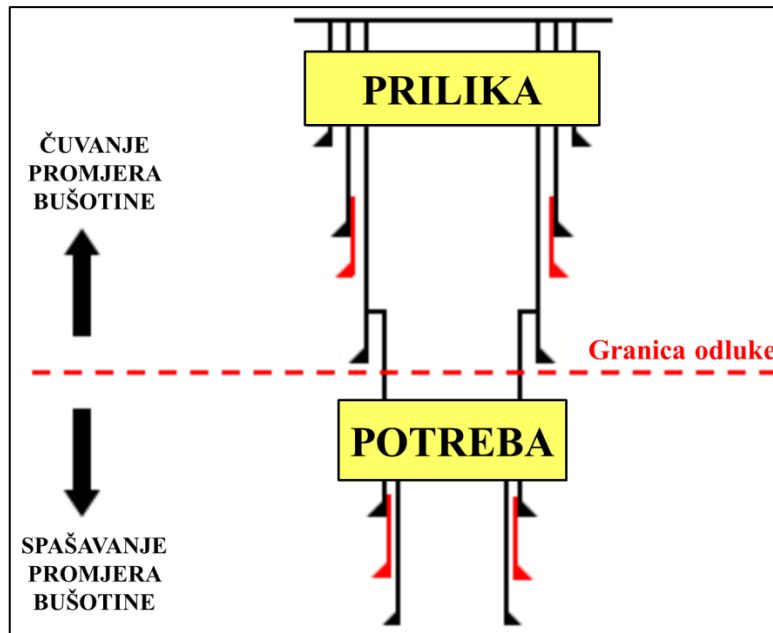
Slika 3-1. Neki od mogućih načina ugradnji i primjena proširivih lajnera nekoliko vrsta (Stringer i Farley, 2013)

Premda se nekad za tehnologiju proširivih zaštitnih cijevi smatralo da ima vrlo usku i specifičnu primjenu, tijekom godina, područje njene primjene se proširuje i ona dobiva na značaju diljem svijeta. Ova tehnologija se tako počela primjenjivati kako bi se smanjili

troškovi i poboljšale značajke bušotina na više fronta: povećanje prstenastog prostora prije proširenja za efikasniju cementaciju, olakšavanje remontnih radova u bušotini (engl. *well intervention*), izoliranje dotoka, izoliranje slojeva malog tlaka u koje se gubi isplaka te prekrivanje nestabilnih formacija kako bi se spriječila zaglava i lom alatki zbog njihova uvijanja (engl. *twist-off*) koje je posljedica prevelike torzije. Zbog zaglave ili loma alatki došlo bi do neželjenog bušenja novog kanala (engl. *sidetrack*) iz postojećeg, kojim bi se zaobišao dio kanala u kojem je došlo zaglave ili loma alatki (Stringer i Farley, 2013).

Osim toga, proširive se zaštitne cijevi danas koriste i za optimiranje proizvodnje iz starijih ležišta te za rješavanje problema vezanih uz povećanu proizvodnju vode. Zbog česte potrebe za sekundarnim frakturiranjem, proširive su zaštitne cijevi također dobro rješenje za izolaciju slabijih slojeva koje treba trajno izolirati, radi njihove zaštite od frakturiranja, uz minimalan gubitak promjera dubinske proizvodne opreme (Stringer i Farley, 2013).

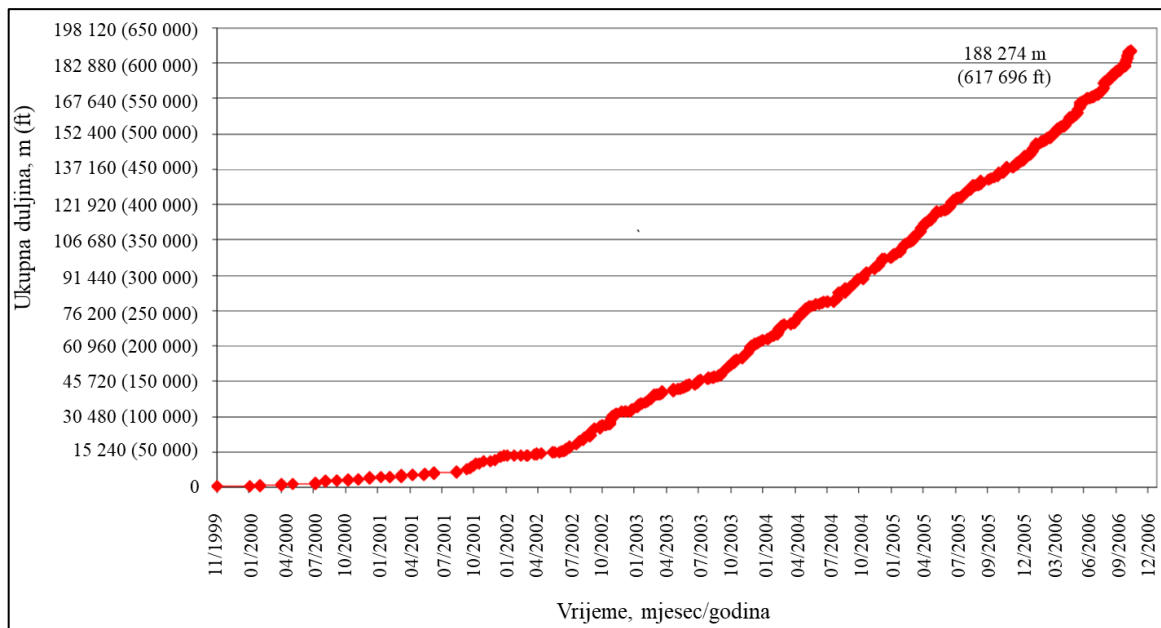
Slika 3-2. na jednostavan način prikazuje promjenu paradigme u pogledu korištenja proširivih zaštitnih cijevi. Nekad se je na proširive zaštitne cijevi gledalo kao na rješenje u krajnjoj nuždi za spašavanje bušotina, a sada se na njih gleda kao i na priliku za smanjenje troškova izrade bušotina. Kada se proširiva zaštitna cijev ugrađuje u gornjem dijelu kanala bušotine, ona uglavnom predstavlja priliku za koju se operater odlučio sa svrhom postizanja boljih performansi bušotine i manjih troškova njene izrade. Kada pak se proširiva zaštitna cijev ugrađuje u dublje dijelove kanala bušotine, to u većini slučajeva znači da je došlo do nepredviđenih situacija tijekom bušenja i da operater pokušava spasiti bušotinu. Razvojem ove tehnologije i sve širom primjenom proširivih zaštitnih cijevi, došlo je do svojevrsne promjene paradigme i stava prema proširivim zaštitnim cijevima te se na njih sve više gleda kao na priliku umjesto da se na njih gleda samo kao na rješenje u krajnjoj nuždi (Stringer i Farley, 2013; Shaikh et al., 2013).



Slika 3-2. U gornjem dijelu bušotine ugradnja proširive zaštitne cijevi predstavlja priliku, a u donjem dijelu potrebu (Shaikh et al., 2013)

Na kraju, vjerojatno najradikalnija implikacija tehnologije proširivih zaštitnih cijevi jest izrada bušotine jedinstvenog (konstantnog) promjera (engl. *monobore well*). S obzirom da sve dublje bušotine zahtijevaju sve više kolona zaštitnih cijevi, cijena takvih projekata raste kao i njihova kompleksnost. Zbog toga primjena tehnologije proširivih zaštitnih cijevi predstavlja logično rješenje za umanjivanje navedenog problema.

Na slici 3-3. prikazana je kumulativna duljina ugrađenih proširivih zaštitnih cijevi svih vrsta u preko 600 bušotina od početka korištenja ove tehnologije u studenom 1999. godine do kraja 2006. godine (Heathman et al., 2007). Bez obzira što su podaci nešto stariji, jasno se vidi da se ovdje radi o tehnologiji koja se jako brzo razvija. Do kraja 2006. godine ugrađeno je preko 188 km proširivih zaštitnih cijevi, a do kraja 2013. godine zabilježeno je više od 1 450 ugradnji, odnosno ugrađeno je preko 380 km proširivih zaštitnih cijevi u bušotine diljem svijeta (Heathman et al., 2007; Shaikh et al., 2013). Primjena proširivih zaštitnih cijevi isprva je bila ograničena na popravne radove, no s vremenom, proširive su zaštitne cijevi postale sastavni dio dizajna konstrukcija bušotina (Grant i Bullock, 2005; Heathman et al., 2007). U nastavku će biti objašnjene osnovne vrste proširivih zaštitnih cijevi te proces njihove ugradnje, proširivanja i cementacije.



Slika 3-3. Ukupna duljina ugrađenih proširivih zaštitnih cijevi u razdoblju od kraja 1999. do kraja 2006. godine (Heathman et al., 2007)

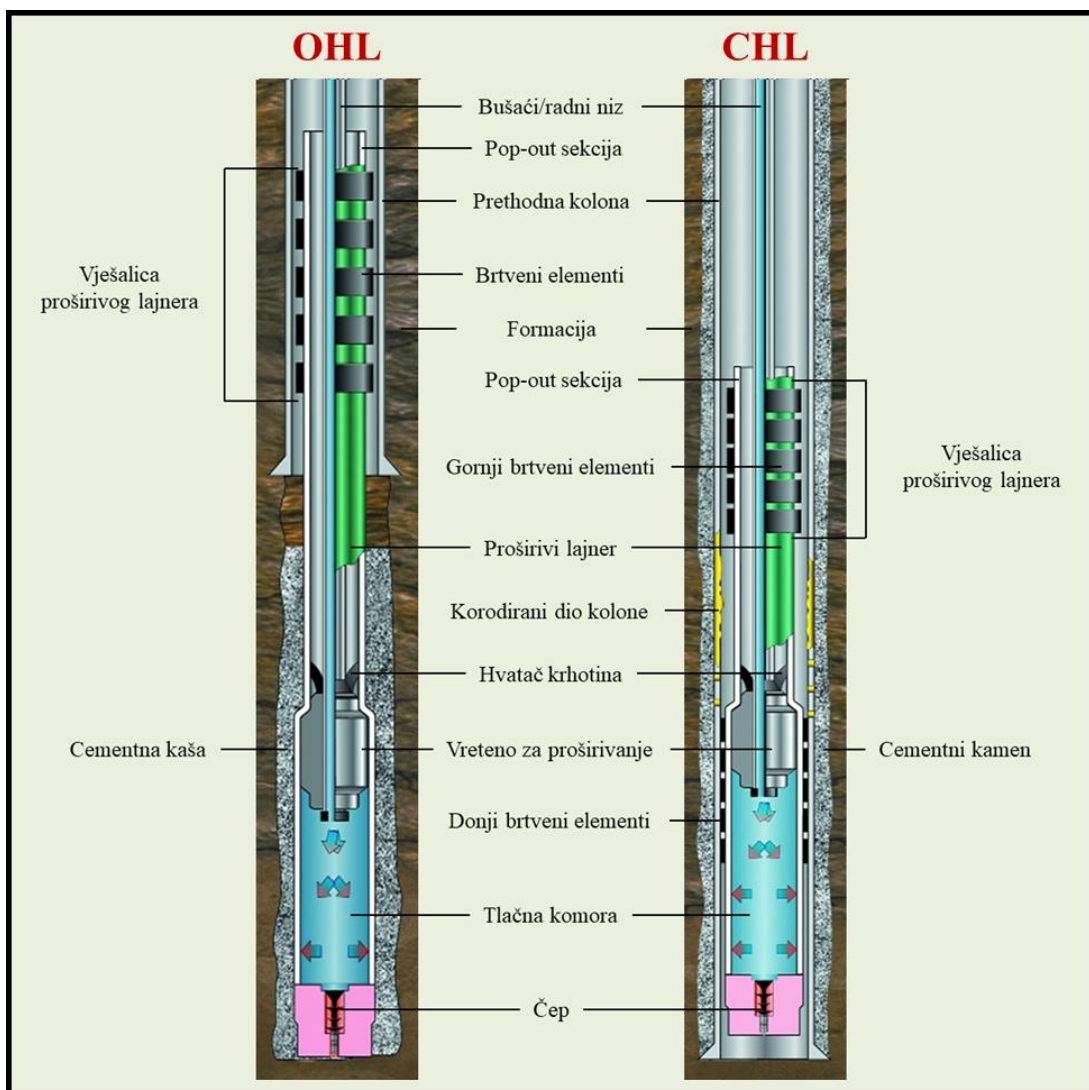
4. PROCES UGRADNJE PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI

Prije nego što bude detaljno objašnjen postupak pripreme kanala bušotine, spuštanja proširivog lajnera te njegovo proširenje i cementacija, potrebno je prvo razmotriti kakve sve vrste proširivih lajnera postoje, koje se vrste najčešće koriste u praksi i od čega se jedan tipični proširivi lajner sastoji. Osim samih proširivih lajnera koji obavljaju iste funkcije kao i klasične zaštitne cijevi, postoje i neke druge izvedenice proširivih cijevi, koje proizlaze iz istih tehnoloških korijena, no imaju druge uloge u bušotini. One će biti spomenute, no neće biti predmet daljnjeg rada.

4.1. VRSTE PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI

Postoji više vrsta proširivih zaštitnih cijevi i načina njihove ugradnje, no najčešće se koriste dvije vrste: proširivi lajner u otvorenom kanalu bušotine (engl. *open hole liner – OHL*) i proširivi lajner u zacijevljenom kanalu bušotine (engl. *cased hole liner – CHL*). Na slici 4-1. prikazane su te dvije vrste proširivih lajnera i njihovi dijelovi. Proširive zaštitne cijevi najčešće su izrađene od čelika, ali moguće ih je izraditi i od aluminijske ili titanijске (Heathman et al., 2007; Kuprešan, 2014).

Uloge pojedinih dijelova lajnera postat će jasnije kod opisa procesa spuštanja, proširivanja i cementacije proširivog lajnera u otvorenom kanalu bušotine u nastavku poglavlja.



Slika 4-1. Proširivi lajner u otvorenom kanalu (lijevo) i proširivi lajner u zacijevljenom kanalu bušotine (desno) (Aissa i Benabdelhafid, 2017)

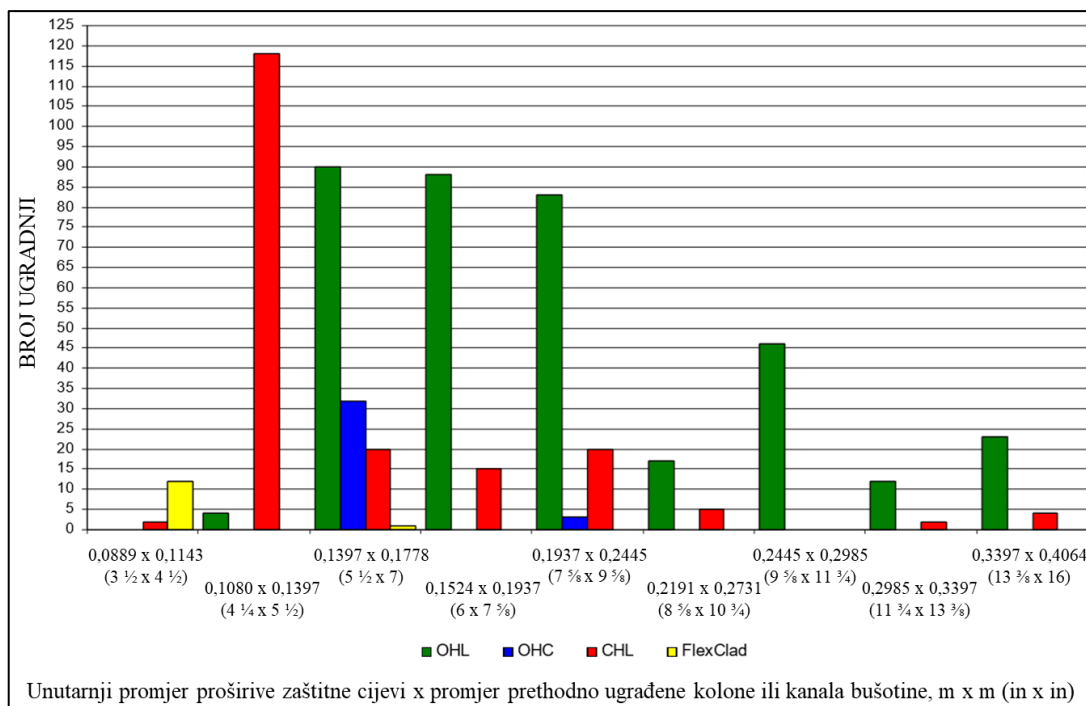
Još neke izvedbe proširivih cijevi koje se koriste su (Treščec, 2004):

- proširivi lajneri koji se ugrađuju u otvoreni kanal bušotine, ali se ne cementiraju, već se u kanal učvršćuju brtvenicama (engl. *open hole clad – OHC*);
- proširivi lajner u zacijevljenom kanalu bušotine kod kojeg se proširuju samo donja i gornja vješalica, a sami lajner je standardni API tubing (npr. FlexClad™ sustav tvrtke Enventure Global Technology);
- proširiva vješalica lajnera koja služi za vješanje proširive ili konvencionalne kolone zaštitnih cijevi (npr. VersaFlex™ sustav tvrtke Enventure Global Technology);

- proširivi pješčani filter (npr. PoroFlex™ sustav tvrtke Enventure Global Technology ili ESS tvrtke Weatherford);
- proširivi prorezani lajner itd.

Osim ovih postoje i druge izvedbe proširivih zaštitnih cijevi nekoliko tvrtki, ali se sve više-manje svode na isti princip. Može se reći i da neke od gore navedenih izvedbi ne bi trebalo smatrati proširivim zaštitnim cijevima u pravom smislu. Na primjer, FlexClad™ sustav predstavlja samo dvije proširive vješalice lajnera, a ne sami proširivi lajner. Isto vrijedi i za VersaFlex™ sustav. Proširivi dijelovi cijevi tih sustava ne vrše ni jedan zadatak zaštitnih cijevi (kao što su izolacija slojeva ili korodiranih dijelova prethodno ugrađene kolone), već služe kao vješalica, za vješanje same kolone te osiguravanje tlačnog i mehaničkog integriteta kolone. Proširivi pješčani filteri pak imaju neke druge zadatke, koje zaštitne cijevi inače ne obavljaju.

Slika 4-2. prikazuje broj ugradnji četiriju vrsta proširivih cijevi (oznake: OHL, OHC, CHL i FlexClad) ugrađenih u bušotine od studenog 1999. do studenog 2006. godine (Heathman et al., 2007). Prema podacima prikazanim na slici 4-2. može se zaključiti da su u navedenom periodu najčešće ugrađivani proširivi lajner u zacijevljenom kanalu (CHL – označen crvenom bojom) promjera 0,1080 m (4 ¼") (u 118 slučajeva) te proširivi lajneri u otvorenom kanalu bušotine (OHL – označen zelenom bojom) promjera 0,1397 m (5 ½") (u 90 slučajeva), 0,1524 (6") (u 88 slučajeva) i 0,1937 m (7 ⅝") (u 83 slučaja). Puno manji dio ugradnji predstavljaju OHC (označen plavom bojom), s 35 ugradnji i FlexClad (označen žutom bojom), sa svega 13 ugradnji.

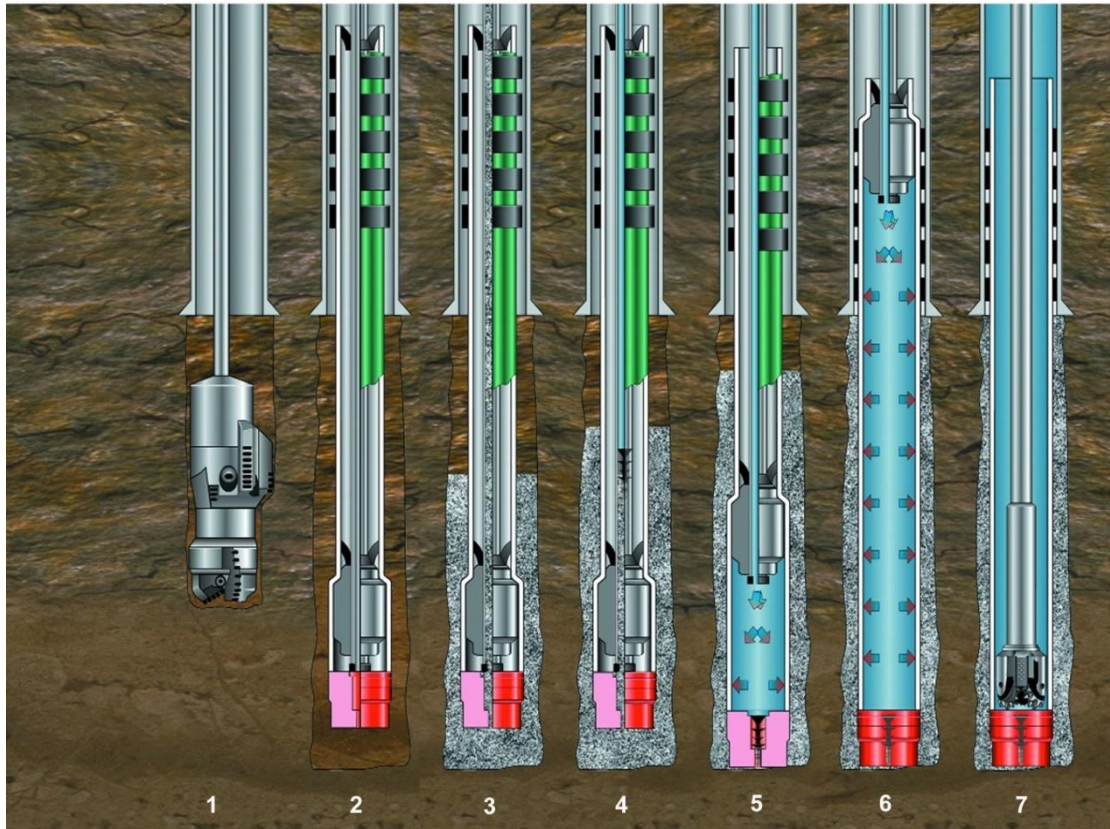


Slika 4-2. Broj ugradnji proširivih lajnera u bušotine s obzirom na njihov promjer u periodu od 1999. do 2006. godine (Heathman et al., 2007)

S obzirom da se većina ovih vrsta lajnera ne cementiraju u bušotinu (CHL, OHC, FlexClad, VersaFlex itd.), u nastavku teksta pod pojmom proširivih zaštitnih cijevi smatrat će se samo proširivi lajner u otvorenom kanalu bušotine (OHL), budući da je predmet ovog rada cementacija proširivih zaštitnih cijevi.

4.2. PROCES UGRADNJE, PROŠIRIVANJA I CEMENTACIJE PROŠIRIVOG LAJNERA U OTVORENOM KANALU BUŠOTINE

Proces ugradnje proširivog lajnera u otvorenom kanalu bušotine odvija se u nekoliko koraka (slika 4-3.), a uključuje spuštanje lajnera u bušotinu, utiskivanje cementne kaše u izacijevni prstenasti prostor te proširivanje lajnera.



Slika 4-3. Proces ugradnje proširivog lajnera u otvoreni kanal bušotine (Aissa i Benabdelhafid, 2017)

Na slici 4-3. proces ugradnje proširivog lajnera u otvoreni kanal bušotine prikazan je u sedam koraka. Ti koraci su (Aissa i Benabdelhafid, 2017; DeMong i Rivenbark, 2003):

1) Bušenje dijela bušotine u koji se planira ugraditi proširivi lajner

Kako bi se omogućila dobra cementacija lajnera, otvoreni kanal mora imati približno jednak, ili čak veći promjer od promjera prethodno ugrađene kolone. Da bi se to postiglo, bušenje se uobičajeno odvija u dva dijela. Prvo se buši običnim dlijetom manjeg promjera od promjera prethodno ugrađene kolone, a nakon toga se bušotina proširuje proširivačem. Alternativa ovom pristupu jest korištenje dlijeta s integriranim sustavom proširivača. Mogu se koristiti proširivači ugrađeni iznad dlijeta (engl. *near bit reamers*) ili bicentrično dlijeto s upravljivim proširivačem (engl. *bi-center and steerable reaming tools*).

2) Sastavljanje niza na površini i njegovo spuštanje

Donji dio niza, odnosno kućište, stavlja se u vrtaći stol. Na njega se navrću proširive zaštitne cijevi sve dok nije postignuta odgovarajuća duljina. Uobičajena duljina pojedinih cijevi je oko 12 metara. Nakon navrtanja proširivih zaštitnih cijevi, cijeli je niz ovješten u vrtaćem stolu. Kućište sačinjavaju peta kolone i vreteno za proširivanje cijevi. S donje strane kućišta nalazi se peta kolone s protupovratnim ventilom i prijelazom za odlaganje čepa, a s gornje strane nalazi se aluminijski prijelaz, koji je sa svoje donje strane navrnut na petu kolone, a na njegov gornji kraj pričvršćuje se vreteno za proširivanje cijevi. Na vreteno se spajaju bušaće šipke pomoću sigurnosne spojnice koja služi za oslobađanje niza bušaćih šipki u izvanrednim okolnostima. Bušaće šipke služe za spuštanje lajnera u bušotinu i za komunikaciju između kućišta i površine. Vanjski promjer kućišta manji je ili jednak kalibru prethodne kolone čime je osigurana prolaznost niza. Spajanjem bušaćih šipki, niz zaštitnih cijevi, odnosno lajner, spušta se na potrebnu dubinu.

3) Cirkulacija isplake za čišćenje bušotine i utiskivanje cementne kaše u izacijevni prstenasti prostor

Prije nego se pristupi utiskivanju cementne kaše i proširivanju zaštitnih cijevi vretenom, bušotinom je potrebno procirkulirati isplaku kako bi se kanal očistio od krhotina. Nakon toga slijedi utiskivanje cementne kaše. Cirkulacija isplake i utiskivanje cementne kaše odvija se kroz niz bušaćih šipki. Volumen cementne kaše koji se protiskuje mora biti dostatan kako bi nakon proširenja ispunjavao cijeli otvoreni kanal i dio zacijevljenog kanala unutar prethodnog niza sve do brtvenica proširivog lajnera, odnosno do vješalice lajnera, no cementna kaša ne smije doći u kontakt s brtvenicama, već njena razina mora prestati rasti nešto ispod njih. Zbog toga, kao što se vidi na slici 4-3., cementna kaša prije proširenja ne ispunjava cijeli taj dio, no njena će se razina podići proširenjem cijevi, a brtvenice će se zbog proširivanja spuštati. Treba voditi računa o sastavu cementne kaše koja mora ostati dovoljno dugo u tekućem stanju kako bi ostalo dovoljno vremena za proširivanje cijevi. Osim toga, u konačnom prstenastom prostoru između vanjske stjenke proširivog lajnera i kanala bušotine postoji manji zazor nego zazor koji se javlja kod konvencionalnog zacijevljenja te i na to treba obratiti pažnju kako bi se osigurala kvalitetna zonalna izolacija.

4) Ubacivanje čepa nakon utiskivanja cementne kaše

Nakon utiskivanja cementne kaše, u niz bušaćih šipki ubacuje se čep (engl. *latching dart*) koji će do kraja istisnuti cementnu kašu u bušaćim šipkama te će na posljétku odsjesti u prijelaz za odlaganje čepa. Fluid kojim je čep protisnut i koji se sada nalazi u bušaćim šipkama služít će za proširivanje lajnera.

5) Stvaranje tlačne komore i proširivanje lajnera vretenom

Nasjedanjem čepa u prijelaz za odlaganje omogućeno je stvaranje tlačne komore. Tlak u bušaćim šipkama raste do vrijednosti od 100 do 125 bar (ovisno o promjeru zaštitnih cijevi) te lomi diskove (ili spona) (engl. *burst discs*) između vretena za proširivanje i ostatka kućišta gdje se počinje stvarati tlačna komora. Tlak potreban za napredak vretena i niza bušaćih šipki prema gore uz proširivanje cijevi obično iznosi oko 275 bar. Dva su glavna razloga zašto se proširivi lajneri obično proširuju odozdo prema gore.

Prvi razlog je činjenica da se cijevi uslijed proširivanja skraćuju. Sidrenjem cijevi u prethodnoj koloni i njihovim proširivanjem prema dolje, cijevi bi se skraćivale na svojem donjem kraju, što bi na kraju rezultiralo nezacijevljenim dijelom kanala bušotine ispod pete lajnera. Nastavkom bušenja u ovakvoj bi se situaciji javila opasnost od frakturiranja slojeva u tom nezacijevljenom intervalu, s obzirom da se za nastavak bušenja obično koristi isplaka veće gustoće. Proširivanjem cijevi odozdo prema gore ovaj problem nestaje. Cijevi se skraćuju unutar prethodne kolone. Iz tog razloga treba postojati veće preklapanje lajnera s prethodnom kolonom kako proširivanje, odnosno skraćivanje, ne bi izbacilo vješalicu lajnera izvan prethodne kolone.

Drugi razlog proširivanja cijevi odozdo prema gore vezan je uz ostvarivanje dodatne sile na vreteno za proširivanje. Budući da se prilikom proširivanja čítav niz bušaćih šipki kreće prema gore, moguće je, radi ostvarivanja dodatne sile, ostvariti nateg na šipke. Ukoliko bi se proširivanje odvijalo odozgo prema dolje, za dodatnu silu na vreteno bilo bi potrebno ostvariti nasjedanje na šipke, što bi moglo rezultirati njihovim izvijanjem, a sila možda i tada ne bi bila dovoljna za proširivanje. U tom bi slučaju rješenje moglo biti ugradnja teških šipki u niz, no to iziskuje dodatno vrijeme ugradnje opreme. Osim toga, nategom je moguće ostvariti puno veću silu nego

nasjedanjem. Bez obzira na ove činjenice, neke su se tvrtke opredijelile za metodu proširivanja odozgo prema dolje, no uz neke dodatne metodološke razlike.

Nakon što pas bušačkih šipki prilikom proširivanja dosegne krajnju visinu u bušačem tornju, tlak iz šipki se ispušta te se pristupa odvajanju pasa šipki iz niza. Nastavak radova podrazumijeva ponovno spajanje isplačnog crijeva i uspostavu cirkulacije, odnosno ponovno tlačenje fluida i tlačne komore za daljnje proširenje lajnera.

6) *Vješanje lajnera unutar prethodno ugrađene kolone*

Dio proširivog lajnera nakon proširivanja ostaje unutar prethodno ugrađene kolone. Na stjenkama proširivog lajnera s vanjske strane u toj zoni preklapanja nalaze se brtvenice od elastomera. Na koloni je obično instalirano do pet elastomernih brtvenica (Heathman et al., 2007). Proširivanjem cijevi, te brtvenice učvršćuju lajner unutar prethodno ugrađene kolone te osiguravaju mehanički i tlačni integritet bušotine. Ta sekcija postaje vješalica proširivog lajnera. Elastomer se koristi iz razloga što prethodno ugrađena kolona često nije savršeno kružnog presjeka pa bi brtvljenjem metal na metal moglo doći do nastajanja praznina koje smanjuju otpornost sustava na vlačna naprezanja i narušavaju integritet. Korištenjem elastomernih brtvenica, otpornost na vlačna naprezanja povećava se s oko $0,62 \text{ MN/m}^2$ na oko $10,77 \text{ MN/m}^2$ (s $13\ 000 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$ na $225\ 000 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$), gotovo 18 puta (Filippov et al., 1999).

Na vrhu proširivog lajnera, odnosno vješalice, nalazi se kratki strojno obrađeni dio stožastog oblika zvan pop-out sekcija. Pop-out sekcija omogućava vretenu da postepeno izađe iz zaštitnih cijevi nakon proširivanja amortizirajući nagli pad tlaka (Wright et al., 2003).

Unutrašnji promjer zaštitnih cijevi nakon proširenja jednak je vanjskom promjeru vretena, dok je zbog razlike u debljini stjenke između kućišta i ostatka proširivog lajnera, vanjski promjer proširene zaštitne cijevi različit vanjskom promjeru kućišta, koji je najčešće nešto veći.

Radovi završavaju ispitivanjem hermetičnosti zaštitnih cijevi na propisanu vrijednost tlaka. Ispitivanje je uspješno ukoliko u kraćem vremenskom razdoblju ne dolazi do pada tlaka.

7) *Nastavak bušaćih operacija*

Nakon ispitivanja hermetičnosti, nastavljaju se uobičajene bušaće operacije. Dlijetom se probuši kroz aluminijski prijelaz i petu lajnera te se nastavlja s bušenjem formacije.

Kada se probuše aluminijski prijelaz i peta lajnera te se dlijetom uđe u dublju formaciju, obično se provodi test primanja naslaga (engl. *leakoff test – LOT*).

4.3. ALTERNATIVNI NAČINI UGRADNJE I CEMENTACIJE PROŠIRIVIH LAJNERA

Na slici 4-3. prikazana je i u sedam koraka objašnjena tipična i najčešće korištena metoda ugradnje proširivog lajnera, no to nije jedina metoda kojom se proširivi lajner može ugraditi u bušotinu. Osim već prije spomenutog proširivanja lajnera odozgo prema dolje pomoću vretena za proširivanje, lajner se može proširivati rotacijom posebno dizajnirane alatke umjesto hidrauličkim protiskivanjem vretena. Kod ovog načina ugradnje, cijev se proširuje prema dolje, no proširivanje ostvaruje hidromehanička alatka koja u sebi ima dva kompleta valjaka koji rotiraju neovisno jedan o drugome, a pokreće ih uronjeni motor pogonjen isplakom. Valjci su povezani s klipovima te kombinacijom rotacije alatke, valjaka i sile klipa koja djeluje na valjke, lajner se proširuje (Offshore 2020; Treščec, 2004).

Cementna se kaša obično postavlja u izacijevni prstenasti prostor prije proširivanja lajnera, no to ne mora nužno biti slučaj. Cementnu kašu se može protisnuti kroz petu lajnera nakon njegova proširenja (engl. *shoe squeeze*). Ta metoda je obično poželjna kod ugradnje proširivih lajnera manjih duljina. Cementna kaša se također može utisnuti u praznu bušotinu, te se tek nakon toga u bušotinu na predviđenu dubinu spušta kolona proširivih zaštitnih cijevi (engl. *puddle job*). Kada se cementna kaša utiskuje u prstenasti prostor prije proširivanja cijevi, u nekim je slučajevima cijev moguće rotirati i/ili naizmjenice spuštati-zadizati. Kretanje i rotacija kolone olakšava čišćenje bušotine i uklanjanje isplake. To predstavlja prednost pred mnogim konvencionalnim sustavima lajnera te do neke mjere kompenzira nedostatak centralizera na koloni (Heathman et al., 2007).

5. PREPORUKE ZA CEMENTACIJU PROŠIRIVIH LAJNERA

Na temelju desetljeća iskustva u cementiranju, naftna industrija stekla je dobru praksu i donijela preporuke za zadovoljenje svih postavljenih ciljeva, odnosno za postizanje uspješne cementacije. U ovom poglavlju bit će izneseno nekoliko praktičnih preporuka koje su bitne za cementiranje proširivih lajnera u otvorenom kanalu bušotine, a obuhvaćaju: pripremu bušotine za cementaciju (engl. *well conditioning*), centralizaciju kolone zaštitnih cijevi, uklanjanje isplake (engl. *mud removal*) i dizajniranje cementne kaše.

5.1. PRIPREMA BUŠOTINE ZA CEMENTACIJU

Prva stvar o kojoj treba voditi računa jest geometrija kanala bušotine. Uz pretpostavku da je učinjeno sve kako bi duž kanala bušotine bilo što manje proširenja tj. ispranih zona (engl. *washouts*) i kako bi promjer kanala bušotine bio što bliži nominalnom promjeru, važno je precizno izmjeriti promjer kanala bušotine. Za mjerenje promjera obično se koristi kaliper s četiri papuče (engl. *4-arm open hole mechanical caliper*), a u bušotinu se može utisnuti i fluorescentno bojilo kako bi se dodatno potvrdili izmjereni podaci (Rahman i Zulkafly, 2004).

Sljedeći korak je kondicioniranje isplake (engl. *mud conditioning*) te njeno cirkuliranje prije vađenja niza bušaćih alatki i spuštanja lajnera u bušotinu. Isplaka koja se koristi za ispiranje bušotine prije ugradnje proširivog lajnera mora biti posebno kondicionirana, jer bi u suprotnom imala dovoljno vremena za geliranje tijekom vađenja bušaćih alatki, mjerenja promjera bušotine i ugradnje zaštitnih cijevi. Nakon spuštanja zaštitnih cijevi, odnosno proširivog lajnera do konačne dubine, isplaku je potrebno ponovno procirkulirati kako bi se uklonile eventualne krhotine razrušenih stijena ili mjehurići dospjelog plina ili drugih slojnih fluida te kako bi se "razbila" gelirana isplaka te smanjila čvrstoća gela, naprezanje pri pokretanju i plastična viskoznost isplake. Mjerenje čvrstoće 10-minutnog gela isplake trebalo bi se kontinuirano obavljati kako bi se potvrdila njegova niska vrijednost koja omogućuje efikasno protiskivanje isplake. Zajedno s volumenom filtrata isplake, čvrstoća 10-minutnog gela uvelike utječe na faktor mobilnosti isplake (engl. *mud mobility factor – MMF*) koji značajno utječe na postotak isplake koju je moguće ukloniti iz prstenastog prostora. Volumen filtrata isplake i čvrstoća 10-minutnog gela moraju biti smanjeni kako bi se povećao faktor mobilnosti isplake (Rahman i Zulkafly, 2004).

Bušotina, dakle, treba biti očišćena od svih krhotina razrušenih stijena, pogotovo u sekciji porasta kuta otklona kanala (engl. *build section*) i u horizontalnom dijelu kanala. Utvrđeno je da bi za odstranjivanje krhotina razrušenih stijena minimalna brzina isplake u prstenastom prostoru trebala iznositi 81 m/min (265,5 ft/min), odnosno dobava bi trebala iznositi barem 1,89 m³/min (500 gal/min) (Rahman i Zulkafly, 2004). Također je utvrđeno da postoji granična vrijednost naprezanja pri pokretanju ispod koje dolazi do stvaranja kontinuiranog sloja krhotina na donjoj stijenci kanala bušotine. Minimalna vrijednost naprezanja pri pokretanju isplake za kvalitetno čišćenje ukošenog dijela kanala bušotine iznosi 9,58 Pa (20 lb_f/100 ft²) za kanal pod kutom otklona od 60° te 13,41 Pa (28 lb_f/100 ft²) za kanal pod kutom otklona od 85° (Rahman i Zulkafly, 2004). Neka istraživanja pokazuju da bi za efikasno uklanjanje krhotina u jako otklonjenim dijelovima kanala, vrijednost naprezanja pri pokretanju trebala iznositi minimalno 23,95 Pa (50 lb_f/100 ft²). U svakom slučaju, za zadovoljenje navedenih kriterija, vrlo je bitno pratiti i podešavati svojstva isplake prije cementacije (Rahman i Zulkafly, 2004).

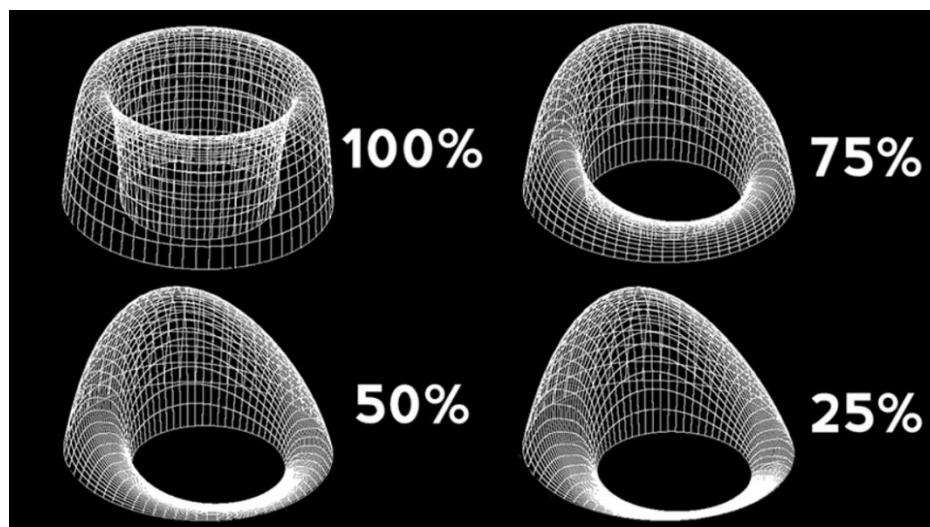
Na kraju, još je važno spomenuti da bi cirkuliranje isplake trebalo obaviti barem jednom od dna do vrha bušotine (engl. *bottoms up*), ali preporučuje se da se iscirkuliraju dva cijela volumena bušotine. Cirkuliranje treba nastaviti sve dok se ne ukloni najmanje 95% pokretne isplake (engl. *circulatable mud*). Turbulentni protok je preporučljiv ukoliko ne predstavlja rizik za razvoj tlakova u bušotini koji bi mogli prouzrokovati frakturiranje raskrivenih stijena (Rahman i Zulkafly, 2004).

Sve preporuke iz ovog odjeljka vrijede i za klasične i za proširive zaštitne cijevi.

5.2. CENTRALIZACIJA KOLONE ZAŠTITNIH CIJEVI

Kod cementacije klasičnih zaštitnih cijevi, obavezno je korištenje centralizera kako bi cijevi bile centrirane u kanalu bušotine. Ukoliko cijevi ne bi bile dovoljno centrirane, isplaka bi ostala zarobljena na onoj strani na kojoj je zazor vrlo mali ili je zaštitna cijev naslonjena na stijenku kanala bušotine. Cirkulacijom se ta isplaka ne bi mogla ukloniti, jer su otpori protjecanju veći u području manjeg zazora između kolone zaštitnih cijevi i stijenske kanala bušotine. Na slici 5-1. prikazani su profili brzina protjecanja za četiri slučaja koji se razlikuju po stupnju centralizacije. Prvi profil predstavlja slučaj kada su zaštitne cijevi savršeno centrirane u kanalu bušotine, odnosno os zaštitne cijevi u najudaljenijem je položaju od stijenki kanala sa svih strana. Suosnost (engl. *standoff*) tada iznosi 100%, jer se os cijevi poklapa s osi kanala bušotine. Kada je cijev potpuno

naslonjena na stjenku kanala bušotine, udaljenost osi cijevi od stjenke kanala u jednom je smjeru najmanja moguća te se suosnost označava s 0%. Iz slike 5-1. jasno se vidi da se najujednačeniji profil brzina ostvaruje kad je suosnost 100%. To je gotovo nemoguće postići u praksi, no prema tome valja težiti kod svake cementacije, odnosno cirkulacije koja joj prethodi. Kako se suosnost smanjuje sa 100% prema 0% profili brzina ukazuju na to da, zbog otpora protjecanju, sa strane na kojoj je zazor manji, cementna kaša neće adekvatno istisnuti isplaku i zauzeti njeno mjesto te će u tim dijelovima izacijevnog prstenastog prostora ostati gelirana isplaka (Rahman i Zulkafly, 2004; Pegasus Vertex, Inc. Blog, 2020).



Slika 5-1. Profili brzina kroz prstenasti prostor s obzirom na različite stupnjeve centralizacije (Pegasus Vertex, Inc. Blog, 2020)

Istraživanja su pokazala da suosnost manja od 60% uzrokuje slabu efikasnost istiskivanja isplake, bez obzira koliko su dobro dizajnirana svojstva isplake, fluida za ispiranje (engl. *preflush*) i cementne kaše.

Iako API preporučuje da suosnost zaštitnih cijevi u kanalu bušotine bude veća od 67%, preporučljivo je ostvariti suosnost od minimalno 80%, jer će se suosnost u stvarnim bušotinskim uvjetima dodatno smanjiti zbog utiskivanja centralizera u stijenu ili zbog njihovog deformiranja (Rahman i Zulkafly, 2004; Pegasus Vertex, Inc. Blog, 2020).

Međutim, rješavanje ovog problema postavljanjem centralizera na zaštitne cijevi u većini slučajeva nije moguće kada se radi o cementaciji proširivih zaštitnih cijevi ili lajnera (Heathman et al., 2007). Uzak prstenasti prostor između pete prethodno ugrađene kolone i

proširivog lajnera u pravilu onemogućava korištenje centralizera. U jako otklonjenim bušotinama, centriranje cijevi je teško postići, jer one imaju tendenciju oslanjanja na donju stranu kanala bušotine. To u pravilu rezultira lošom cementacijom kolone. Problem se može donekle ublažiti odgovarajućim reološkim svojstvima fluida (Rahman i Zulkafly, 2004).

5.3. UKLANJANJE ISPLAKE

Za postizanje uspješne cementacije, odnosno potpuno popunjavanje željene duljine prstenastog prostora cementnom kašom i postizanje kvalitetne cementne veze, neophodno je potpuno uklanjanje isplake (engl. *mud removal*) iz kanala bušotine kako bi njeno mjesto zauzela cementna kaša.

Također, bitno je spriječiti direktni kontakt cementne kaše i isplake, jer su one obično nekompatibilne. Nekompatibilnost se može očitovati u ubrzanju hidratacije i kraćem vremenu zgušćivanja mješavine isplaka/cementna kaša nego što je vrijeme zgušćivanja same cementne kaše što nije prihvatljivo, ili u znatnom povećanju viskoznosti mješavine isplake i cementne kaše u odnosu na viskoznost čiste isplake i cementne kaše što je štetno za proces istiskivanja isplake zbog većih otpora protjecanju.

Za uspješnu cementaciju neophodno je spriječiti direktni kontakt i miješanje cementne kaše i isplake. To se postiže utiskivanjem u bušotinu, ispred cementne kaše, odgovarajuće dizajnirane prethodnice (engl. *preflushes*) i razdjeljivača (engl. *spacer*). Prethodnica je u pravilu fluid male gustoće i male viskoznosti. Kao prethodnica koriste se: voda, ulje ili kemijski ispirać (engl. *chemical wash*), a razdjeljivač se najčešće sastoji od vode, viskozifera i oteživača.

Kemijski ispirać je obično voda obrađena s izrazito vodomogućivim sufraktantom, a protiskuje se prstenastim prostorom u turbulentnom režimu protjecanja da razrijedi isplaku i/ili razbije isplačni kolač. S obzirom da se kemijski ispirać ponaša kao Newtonov fluid, on se lako protiskuje u turbulentnom režimu protjecanja. U slučaju korištenja uljne isplake, umjesto kemijskog ispirača protiskuje se određeni volumen ulja (engl. *base oil*) prije protiskivanja otežanog razdjeljivača u svrhu razrjeđivanja uljne isplake i mekšanja isplačnog obloga. U praksi su dobri rezultati postignuti protiskivanjem 1,59 do 3,18 m³ (10 do 20 bbl) ulja prije protiskivanja otežanog razdjeljivača (Rahman i Zulkafly, 2004).

Otežani razdjeljivač koji se protiskuje nakon kemijskog ispiraća ili ulja ima funkciju istiskivanja već razrijeđene isplake iz prstenastog prostora po principu združenih učinaka razlike u gustoći i naprezanja pri pokretanju. Gustoća razdjeljivača trebala bi biti za 60 kg/m^3 (0,5 ppg) veća od gustoće isplake kako bi se ostvario uzgon dostatan za istiskivanje isplake iz prstenastog prostora kanala bušotine. Da bi se povećala gustoća razdjeljivača, u vodu se, osim oteživača dodaje i polimerni aditiv koji potiče geliranje razdjeljivača radi zadržavanja čestica oteživača u suspenziji.

Razlika u vrijednostima naprezanja pri pokretanju razdjeljivača i razrijeđene isplake dizajnira se tako da granica između ta dva fluida bude plosnata (engl. *flat interface*). Na taj način postiže se efikasnije istiskivanje isplake iz prstenastog prostora. Također je bitno spriječiti prodor tj. braždenje (engl. *channeling*) razdjeljivača kroz isplaku ili njihovo miješanje, jer se na taj način smanjuje učinkovitost istiskivanja isplake. Uz navedeno, otežani razdjeljivač sadrži barit koji pojačava djelovanje turbulentnih naprezanja (engl. *turbulent stresses*) i erozije na isplaku što dodatno pospješuje učinkovitost istiskivanja isplake i priprema prstenasti prostor za smještanje cementne kaše (Rahman i Zulkafly, 2004).

Praksa je pokazala da u nizu slučajeva čak i odgovarajuće dizajnirane prethodnice nisu bile uspješne kako se očekivalo pa ih treba koristiti s oprezom i zamijeniti s otežanim razdjeljivačima u slučajevima kad je obvezna dobra kvaliteta cementne kaše duž cijelog prstenastog prostora.

Idealno bi bilo kad bi se moglo ostvariti turbulentno protjecanje svih fluida u prstenastom prostoru (kemijskog ispiraća, razdjeljivača i cementne kaše), no to je uglavnom vrlo teško postići s cementnom kašom i otežanim razdjeljivačem, ali se postiže turbulentno protjecanje kemijskog ispiraća (spljošten profil brzina) koji je u direktnom kontaktu s isplakom tijekom njenog istiskivanja iz prstenastog prostora.

Osim turbulentnog protjecanja, pozornost treba posvetiti i volumenu tih fluida i njihovim kemijskim svojstvima. Volumen razdjeljivača (m^3), u turbulentnom režimu protjecanja, predstavlja umnožak protoka (m^3/min) i vremena kontakta razdjeljivača sa stijenkama kanala (min) u razmatranoj točki. Volumen ne ovisi o promjeru kanala ili zaštitnih cijevi sve dok sav fluid prolazi razmatranu točku. Prema tome, na temelju samo dva poznata podatka (protoka i vremena kontakta) lako se izračuna volumen fluida. Većina studija je pokazala da vrijeme kontakta od 10 minuta ili dulje osigurava efikasno

istiskivanje različitih isplaka iako neki autori navode da je dovoljno 4 ili 8 minuta. Rahman i Zulkafly (2004.) navode da je prema njihovu iskustvu dovoljno koristiti 3,18 m³ (20 bbl) kemijskog ispiraća i 12,72 m³ (80 bbl) otežanog razdjeljivača tijekom cementiranja kolone zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8") i lajnera promjera 0,1778 m (7") u usmjerenim bušotinama. U svakom slučaju, kompatibilnost kemijskog ispiraća i razdjeljivača s isplakom i cementnom kašom mora biti testirana i potvrđena prije njihove primjene u bušotini.

Sve ovdje navedeno vrijedi i za klasične i za proširive zaštitne cijevi. Razlike se javljaju kod dobave cementne kaše te rotacije i kretanja niza zaštitnih cijevi. Kod cementiranja klasične kolone zaštitnih cijevi preporučuje se protiskivanje cementne kaše velikom dobavom, čak i kada nije moguće postići turbulentni protok, jer velike brzine protjecanja ostvaruju efikasnije istiskivanje isplake nego što je to slučaj kod čepolikog protjecanja.

Međutim, kod cementacije proširivih lajnera, u slučaju nedovoljno očišćenog kanala bušotine, velike brzine protiskivanja cementne kaše u prstenastom prostoru mogu podići geliranu isplaku i krhotine razrušenih stijena u sekciju preklapanja proširivog lajnera s prethodno ugrađenom kolonom zaštitnih cijevi. U toj nepoželjnoj situaciji, krhotine razrušenih stijena, gelirana isplaka te čestice isplačnog kolača mogu upasti u proširivi lajner. To bi moglo otežati ili čak onemogućiti daljnje napredovanje niza za proširivanje prema gore. Uz to, krhotine koje bi se mogle naći u sekciji preklapanja, mogle bi onemogućiti ispravno proširenje lajnera i tako ugroziti tlačni i mehanički integritet bušotine. Male dobave također sprječavaju da u sekciji preklapanja dođe do oštećenja elastomera uslijed abrazivnog djelovanja fluida.

Dobro uklanjanje isplake je posebice teško kada se radi o cementaciji proširivih lajnera zbog malog zazora između kanala bušotine i lajnera. Kombinacija malih dobava i malog zazora u prstenastom prostoru obično rezultira lošom cementacijom, ali se taj problem može ublažiti odgovarajućim dizajnom reoloških svojstava protiskivanih fluida (Rahman i Zulkafly, 2004).

Što se tiče postupno-povratnog kretanja i rotacije zaštitnih cijevi u bušotini, ono se preporučuje kod cementacije klasičnih kolona zaštitnih cijevi. Kolonu zaštitnih cijevi bi za vrijeme protiskivanja prethodnice i razdjeljivača trebalo rotirati brzinom od 10 do 30 o/min ili naizmjenice spuštati i zadizati brzinom (engl. *reciprocated rate*) od 6 do 12 m (od 20 do

40 ft) u razdoblju od jedne do pet minuta. Na taj način postupno-povratno kretanje i rotacija cijevi pospješuju razbijanje gelirane isplake i uklanjanje isplačnog kolača.

Međutim, kod ugradnje proširivog lajnera, postupno-povratno kretanje i rotiranje proširivog lajnera često nije moguće zbog mogućnosti njegova oštećenja u zoni preklapanja s prethodnom kolonom. Također, tijekom postupno-povratnog kretanja i rotiranja proširivog lajnera mogle bi se oštetiti elastomerne brtvenice ukoliko bi došle u kontakt s prethodno ugrađenom kolonom.

U slučaju cementacije proširivog lajnera, kad nije moguće njegovo postupno-povratno kretanje i rotiranje, razbijanje gelirane isplake i uklanjanje isplačnog kolača također se može pospješiti odgovarajućim dizajnom reoloških svojstava protiskivanih fluida (Rahman i Zulkafly, 2004).

5.4. DIZAJN CEMENTNE KAŠE

Razlike u procesu cementacije između klasičnih kolona i proširivih lajnera najviše dolaze do izražaja kod samog dizajna cementne kaše pa će se u nastavku navesti bitni parametri o kojima treba voditi računa pri dizajniranju cementne kaše za cementaciju proširivog lajnera.

a) Vrijeme zgušćivanja cementne kaše

Za uspješnu cementaciju proširivih zaštitnih cijevi potrebno je koristiti cementnu kašu značajnije duljeg vremena zgušćivanja (fluidnosti ili pumpabilnosti) (engl. *thickening time, fluidity time ili pumpability time*) jer ona mora ostati u tekućem stanju tijekom ugradnje i proširivanja zaštitnih cijevi. Vrijeme zgušćivanja cementne kaše predstavlja vrijeme tijekom kojeg je cementna kaša fluidna i može se protiskivati. Određuje se u simuliranim bušotinskim uvjetima korištenjem konzistometra koji mjeri i bilježi promjenu konzistencije cementne kaše s vremenom pri odabranim uvjetima tlaka i temperature. Za većinu cementacija krajem vremena zgušćivanja smatra se vrijeme u kojem kaša postigne konzistenciju od 50 ili 70 Bc (engl. *Bearden units of consistency*).

Uobičajeno vrijeme zgušćivanja koje je potrebno za ugradnju proširivog lajnera iznosi oko 10 do 12 sati (Rahman i Zulkafly, 2004). Potrebno vrijeme zgušćivanja otprilike je dvostruko dulje od vremena koje je potrebno za obavljanje operacija proširenja kako bi se osiguralo dovoljno vremena za obavljanje proširenja lajnera i vađenja alatki za proširivanje

iz lajnara dođe li do bilo kakvih operativnih poteškoća koje bi usporile proces (Rahman i Zulkafly, 2004).

Osim toga, cementna kaša, nakon protiskivanja u izacijevni prstenasti prostor, mora ostati stabilna sve dok se proširivanje cijevi ne završi da ne bi došlo do taloženja čestica veće gustoće uslijed djelovanja gravitacije, a time i do promjene gustoće cementne kaše duž njenog stupca. Ukoliko cementna kaša ne bi ostala tekuća i stabilna, moglo bi doći do neuspješnog proširivanja cijevi, a uslijed taloženja čestica veće gustoće i do povećanja tlaka u kanalu uz posljedicu frakturiranja dubljih slojeva raskrivenih stijena (Fanguy et al., 2004).

b) Reološka svojstva cementne kaše

Cementna kaša mora imati dobra reološka svojstva koja će omogućiti njeno protjecanje kroz uski dio prstenastog prostora oko pete kolone proširivih zaštitnih cijevi. To za cementnu kašu, koja se ponaša kao Binghamov plastični fluid, znači da ona ne bi trebala imati visoke vrijednosti naprezanja pri pokretanju i plastične viskoznosti. Viskoznost cementne kaše trebala bi biti manja od $0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (100 cP), a vrijednost naprezanja pri pokretanju ne bi trebala prelaziti $14,37 \text{ Pa}$ ($30 \text{ lb}_f/100 \text{ ft}^2$) (Rahman i Zulkafly, 2004). Prije se smatralo da bi cementna kaša trebala imati vrlo nisku viskoznost s ciljem uspostavljanja turbulentnog režima protjecanja koji bi pospješio istiskivanje isplake. No, mnoga istraživanja su pokazala da je gotovo nemoguće postići turbulentno protjecanje cementne kaše u većini bušotina. Umjesto da se cementna kaša dizajnira tako da se postigne turbulentno protjecanje, istiskivanje isplake postiže se razlikom u vrijednostima plastične viskoznosti i naprezanja pri pokretanju cementne kaše i isplake. Uočeno je da do lošeg istiskivanja isplake dolazi u ekscentričnom prstenastom prostoru kada se isplaka istiskuje cementnom kašom koja ima ista reološka svojstva kao i isplaka. Za bolje istiskivanje isplake, cementna kaša trebala bi imati veće vrijednosti viskoznosti i naprezanja pri pokretanju od isplake, s time da razlika u naprezanju pri pokretanju ima izraženiji učinak. Zbog toga se preporučuje da, kad god je to moguće, vrijednost naprezanja pri pokretanju cementne kaše bude najmanje $4,79 \text{ Pa}$ ($10 \text{ lb}_f/100 \text{ ft}^2$) veća od vrijednosti naprezanja pri pokretanju isplake. Navedena razlika rezultira plosnatim profilom brzina (engl. *velocity profile*) cementne kaše te pospješuje istiskivanje isplake prema površini, čak i kad je suosnost cijevi u kanalu samo 46% (Silva et al., 1996). Međutim, naprezanje pri pokretanju cementne kaše ne bi smjelo prelaziti vrijednost od $14,37 \text{ Pa}$ ($30 \text{ lb}_f/100 \text{ ft}^2$), jer visoke

vrijednosti naprezanja pri pokretanju mogu značajno povisiti prosječnu vrijednost brzine potrebne za pokretanje toka cementne kaše u najužem dijelu ekscentričnog prstenastog prostora. U tom bi slučaju cementna kaša mogla zaobići taj uski dio te bi on ostao nezacementiran (Rahman i Zulkafly, 2004).

c) Čvrstoća gela cementne kaše

Geliranje cementne kaše nakon protiskivanja u izacijevni prstenasti prostor odvija se uslijed međusobnog privlačenja čestica koje su u njoj prisutne (Fanguy et al., 2004). Tijekom proširivanja lajnera jako gelirana cementna kaša može prouzročiti njeno gubljenje u okolne stijene. Umjesto da se razina cementne kaše u prstenastom prostoru za vrijeme proširenja lajnera diže, može ostati na istoj razini na kojoj je bila prije proširivanja cijevi zbog toga što se visoko gelirana cementna kaša pretežno utiskuje u sloj i tako dijelovi kanala ostaju nezacementirani (Rahman i Zulkafly, 2004).

Čvrstoća gela cementne kaše nakon njenog protiskivanja u izacijevni prstenasti prostor (engl. *static gel strenght – SGS*) je bitna za uspješnu cementaciju proširivih cijevi. Smanjenjem međusobnog privlačenja čestica (geliranja) smanjuje se i vjerojatnost nastajanja šupljina i kanalića (mikro-anulara) u cementnom kamenu koji mogu ugroziti učinkovitost zonalne izolacije, najvažniju zadaću svake cementacije. Razvoj čvrstoće gela cementne kaše nakon protiskivanja može se promatrati kroz dva perioda. Prvi je period u kojem je kaša potpuno fluidna i vrijednost čvrstoće gela je mala (engl. *long zero gel time*), a drugi je prijelazni period koji bi u pravilu trebao biti kraći od 45 minuta (engl. *short transition time*) (Bhaisora et al., 2015). U klasičnim cementacijama, za sprječavanje migracije slojnog plina ili fluida, presudno je vrijeme u kojem cementna kaša postigne čvrstoću gela od 48 Pa (100 lb_f/100ft²) (Heathman et al., 2007). Međutim, kaše za cementaciju proširivog lajnera, a ovisno o njihovom dizajnu, mogu postići i veću vrijednost od ove granične te ju zadržati, jer je bitno da razvoj čvrstoće gela nije progresivan. O tome će više riječi biti u 7. poglavlju u studiji slučaja koju iznosi Bhaisora sa suradnicima (2015.).

d) Izdvajanje slobodne vode iz cementne kaše

Iz cementne kaša ne bi se smjela izdvajati slobodna voda tijekom dvosatnog statičkog ispitivanja u menzurama pod kutovima od 45° i 90°. Na taj se način onemogućava nastajanje kanalića u gornjem dijelu stupca cementne kaše nakon očvršćivanja cementne

kaše koji bi omogućili migraciju fluida. Izdvajane slobodne vode iz cementne kaše za cementiranje proširivog lajnera treba biti jednako nuli te ne smije dolaziti do taloženja čestica iz cementne kaše (Heathman et al., 2007).

e) Filtracija cementne kaše

Cementna kaša mora imati malu filtraciju, među ostalim razlozima, zbog sprječavanja prijevremene dehidracije za vrijeme protjecanja područjem raskrivenih propusnih zona. Ovo je osobito važno kod cementiranja jako otklonjenih ili horizontalnih sekcija kanala bušotine s obzirom da su u tim slučajevima cementnoj kaši izloženi dulji intervali propusnih stijena. Zbog toga, preporučena vrijednost filtracije iznosi maksimalno $50 \text{ cm}^3/30 \text{ min}/70 \text{ bar}$ ($50 \text{ cc}/30 \text{ min}/1000 \text{ psi}$). Prekomjerna filtracija promijenit će svojstva cementne kaše i ona će se razlikovati od dizajniranih, odnosno poželjnih svojstava. U tom slučaju, stvarno vrijeme zgušćivanja (engl. *thickening time*) i reološka svojstva cementne kaše, te mehanička čvrstoća i plinotjesnost (engl. *gas tightness*) cementnog kamena ne bi bili dovoljni za ostvarivanje uspješne zonalne izolacije. Za postizanje cementne kaše kroz koju neće doći do migracije plina uslijed smanjenja hidrostatičkog tlaka u prstenastom prostoru tijekom njene hidratacije i očvršćivanja u cementni kamen vrijednost filtracije cementne kaše ne smije biti veća od $50 \text{ cm}^3/30 \text{ min}/70 \text{ bar}$. Sprječavanjem smanjenja hidrostatičkog tlaka stupca cementne kaše u prstenastom prostoru prije nego što započne njena hidratacija sprječava se dotok slojne vode ili ugljikovodika u kanal bušotine i njihovo migriranje kroz stupac cementne kaše prema površini (Rahman i Zulkafly, 2004).

f) Volumen cementne kaše

Proširivanje lajnera, kao što je već bilo navedeno, najčešće slijedi nakon utiskivanja cementne kaše u izacijevni prstenasti prostor. S obzirom da lajner nakon proširenja obično ima vanjski promjer 11 do 16% veći od promjera prije proširenja, volumen cementne kaše koja će se koristiti za cementaciju proširivog lajnera mora biti proračunat na temelju promjera koji će cijev imati nakon proširenja (Rahman i Zulkafly, 2004). Tako će razina cementne kaše u prstenastom prostoru prije proširenja biti niža, a s proširivanjem lajnera cementna kaša će se dizati sve do pete prethodno ugrađene kolone. Posebnu pažnju treba posvetiti točnom proračunu volumena cementne kaše koji je potreban i to na temelju točnih podataka o volumenu kanala dobivenih pomoću kalipera. Cementna kaša ne smije ući u prethodnu kolonu do brtvenica niti smije doći do njenog prelijevanja u proširivi lajner. Ako

se to dogodi, posljedice mogu biti katastrofalne, jer cementna kaša može stvrdnuti u cementni kamen prije nego se sustav za proširivanje (engl. *expansion assembly*) izvadi iz bušotine (Rahman i Zulkafly, 2004).

g) Dodatna razmatranja

Za postizanje dobre cementacije proširivih lajnera, nužno je potpuno se pridržavati svih preporuka za cementiranje proširivih lajnera, ali je potrebno pridržavati se i svih preporuka koje vrijede za cementaciju klasičnih zaštitnih cijevi dokle god se jedno ne kosi s drugim.

Zbog kompleksnosti cementacije proširivih zaštitnih cijevi i opisanih problema, mnogi ugrađeni proširivi lajneri cementirani su "skviziranjem" cementne kaše nakon proširenja, umjesto da se cementna kaša utisne u prstenasti prostor prije proširivanja lajnera (Fanguy et al., 2004). Nekad se uglavnom smatralo da cementiranje zone iznad pete lajnera nije od kritičnog značaja, no napredovanjem tehnologije i sve širom primjenom proširivih lajnera, sve se više pozornosti posvećuje potpunoj zonalnoj izolaciji u cijelom prstenastom prostoru (Fanguy et al., 2004).

Metoda koja se inače koristi za ispitivanje svojstava konvencionalne cementne kaše u očekivanom vremenu proširenja cijevi opisana je u API RP-10B preporuci u obliku modificirane simulacije "skviziranja" s prekidima (engl. *modified hesitation squeeze simulation*). Ova metoda, nažalost, ne simulira dovoljno dobro uvjete u kojima će se cementna kaša nalaziti prilikom ugradnje i proširivanja cijevi. Primjerice, test ne ostavlja dovoljno vremena da bi se promotriale tendencije geliranja kaše. Gel koji se počinje razvijati, razbija se svaki put kada se motor konzistometra pokrene. Tako se bilježe vrijednosti čvrstoće gela koje su se razvijale manje od 10 minuta. Ova metoda, nadalje, ne pruža nikakav uvid u stanje cementne kaše koje bi moglo nastati dođe li do bilo kakvih odgoda ili produživanja vremena postupka proširivanja zaštitnih cijevi ili lajnera (Fanguy et al., 2004).

Zbog prethodno navedenog, za određivanje čvrstoće gela cementnih kaša za cementiranje proširivih lajnera poželjna je upotreba HP/HT uređaja za određivanje statičke čvrstoće gela (engl. *HP/HT static gel-strength device*), jer on omogućuje bolje simuliranje perioda protiskivanja cementne kaše (visoke smične brzine cementne kaše), a nakon toga perioda proširenja lajnera (male smične brzine cementne kaše) (Heathman et al., 2007).

Priprema potpuno homogene cementne kaše točno određenih svojstava težak je zadatak. Kod cementiranja klasičnih kolona takva preciznost uglavnom nije presudna, no kod cementiranja kolona proširivih zaštitnih cijevi površnost kod pripreme cementne kaše predstavlja puno veći rizik. Zbog toga je razvijena inovativna metoda pripreme cementne kaše, izvan same lokacije bušotine, koju je moguće skladištiti u tekućem stanju na duže vrijeme. Radi se o prethodno pripremljenoj cementnoj kaši, čija će priprema, ispitivanje i korištenje biti detaljno objašnjeni u sljedećem poglavlju.

6. UPORABA PRETHODNO PRIPREMLJENE CEMENTNE KAŠE

U ovom poglavlju bit će riječi o prethodno pripremljenoj cementnoj kaši te će biti navedene njene prednosti i razlozi za njeno korištenje kod cementacije proširivih zaštitnih cijevi.

6.1. PRETHODNO PRIPREMLJENA CEMENTNA KAŠA

Primjenom klasičnih cementnih kaša (engl. *conventional cement slurries*) teško je postići njihovu fluidnost i stabilnost u bušotinskim uvjetima kroz dulji period mirovanja, jer u takvim uvjetima dolazi do taloženja čestica veće gustoće (čestice cementa i oteživača) prema dnu kanala bušotine. Zbog toga se za cementaciju proširivih zaštitnih cijevi može koristiti prethodno pripremljena cementna kaša (engl. *premixed cement slurry/liquid cement premix – LCP*) koju je moguće skladištiti na duže vrijeme. Takva cementna kaša miješa se u posebnom postrojenju prije transporta na lokaciju same bušotine (Rae i Johnston, 1996; Fanguy et al., 2004).

Tehnologija cementiranja puno je napredovala od kada je praksa cementacije bušotina započela početkom 20. stoljeća. Aditivi su se s vremenom razvijali s obzirom na sve zahtjevnije bušotinske uvjete, no sam proces pripreme cementne kaše ostao je uglavnom nepromijenjen. Iako je proces ostao nepromijenjen, tehnologija i oprema za pripremu kaše, primjerice kontrola miješanja i gustoće cementne kaše preko računala, je napredovala. Međutim, postoji granica do koje je moguće unaprijediti homogenost cementne kaše kod pripreme kaše na terenu neposredno prije utiskivanja u bušotinu (engl. *mixing on the fly*), bez obzira na tehnološka unapređenja opreme. Miješanje manjih obroka cementne kaše (engl. *batch mixing cement*) često je korištena metoda za smanjivanje nehomogenosti cementne kaše koja je svojstvena cementnoj kaši pripremljenoj na terenu. Tako pripremljena cementna kaša, mora se odmah utisnuti u bušotinu, jer ubrzo započinje proces hidratacije i nema vremena za ispitivanje i podešavanje svojstava pripremljene kaše prije utiskivanja (Merritt, 2005).

Nedavni razvoj tehnologije cementiranja omogućio je miješanje kaše prije njenog dopremanja na teren i držanje te kaše u tekućem stanju na duže vrijeme. To znači da je moguće odrediti i prema specifičnim potrebama podesiti svojstva cementne kaše prije njenog utiskivanja u bušotinu (Merritt, 2005).

Tehnologija prethodnog pripremanja cementne kaše, dakle, uključuje miješanje cementne kaše u postrojenju za pripremu cementne kaše (engl. *mixing facility*) (slika 6-1.), transport pripremljene cementne kaše u fluidnom stanju na lokaciju bušotine, temeljito ispitivanje njenih svojstava prije utiskivanja te utiskivanje kroz bušaće šipke i proširivi lajner u izacijevni prstenasti prostor. Moraju se poduzeti određeni koraci koji će odgoditi zgušćivanje cementne kaše, koje se pojavljuje odmah nakon što suhi cement dođe u kontakt s vodom, a s obzirom da bi kaša mogla biti skladištena na duže vrijeme, uobičajeni usporivači (engl. *retarders*) neće biti prikladni za taj zadatak. Nakon miješanja cementne kaše u postrojenju, ispituju se njena svojstva da bi se utvrdilo udovoljavaju li zahtjevima za konkretnu cementaciju. Prema zahtjevima projekta podešavaju se sljedeća svojstva: gustoća, vrijeme zgušćivanja, filtracija, slobodna voda i reološka svojstva. Testiranja se provode u svakom koraku, počevši od trenutka dodavanja vode u postrojenje (Merritt, 2005). Cementna kaša se periodično miješa (svakih sat vremena) i ispituje.



Slika 6-1. Postrojenje za pripremu cementne kaše izvan lokacije bušotine (Merritt, 2005)

Nakon završetka pripreme cementne kaše, uzima se uzorak kaše koji se otprema u laboratorij gdje mu se po potrebi dodaju aditivi koji bi mogli biti dodani u cementnu kašu na lokaciji bušotine prije utiskivanja, te se ponovo ispituju svojstva kaše (Merritt, 2005).

Za vrijeme skladištenja, kaša se periodično miješa i testira kako bi se osigurala njena kvaliteta i provjerilo njeno stanje. Miješanje sprječava stvaranja gela držeći čestice u disperziranom stanju. Temperatura, reološka svojstva i pH vrijednost kaše stalno se mjere.

Izmjerene se vrijednosti uspoređuju s vrijednostima prethodnih mjerenja te se tako utvrđuje gubi li kaša na kakvoći. Utvrđi li se pogoršanje svojstava, poduzimaju se popravne mjere kako bi se kaša vratila u željeno stanje.

Prije transporta pripremljene cementne kaše na lokaciju bušotine, obavlja se posljednja serija mjerenja njenih svojstava da se potvrdi da ona udovoljava tehničkim specifikacijama dizajna (Merritt, 2005). Provode se standardni testovi: vrijeme zgušćivanja, filtracija i izdvajanje slobodne vode. Ukoliko je to značajno za konkretni projekt mogu se još ispitati reološka svojstva cementne kaše i tlačna čvrstoća cementnog kamena (engl. *compressive strength* – CS). S obzirom da se ispituje uzorak homogene prethodno pripremljene kaše, rezultati ispitivanja točno pokazuju svojstva kaše koja će se utiskivati. To nije slučaj kod primjene klasične kaše gdje se u laboratoriju ispituje mali uzorak "terenske" mješavine suhih aditiva kojem se dodaje voda, a ne cementna kaša koja će se utiskivati.

Prethodno pripremljena cementna kaša obično se sastoji od standardnog portland cementa, različitih aditiva (usporivača i aditiva za kondicioniranje) i vode. Sastav cementne kaše se može podesiti tako da može biti uskladištena od nekoliko dana do preko šest mjeseci. Može se pripremiti s API klasama cementa G, H, C i A (Rae i Johnston, 1996). Također ju je moguće pripremiti s kvarcnim pijeskom, lebdećim pepelom i drugim aditivima. Kad je potrebno, cementna kaša se može aktivirati i/ili, prema potrebi, drugačije modificirati kako bi se postigla cementna kaša odgovarajućih svojstava potrebnih za konkretnu primjenu. Za to je potreban poseban aditiv, aktivator, koji se dodaje neposredno prije početka procesa cementacije, odnosno utiskivanja kaše u bušotinu. Aktivator ponovno omogućava kemijsku hidrataciju cementne kaše te omogućava kaši da se stvrdne nakon prethodno određenog, odnosno izračunatog, vremena koje zahtijeva projekt (Rae i Johnston, 1996).

Prethodno pripremljenu cementnu kašu se može koristiti u bušotinama u kojima su temperature do 230° C (450° F), a vrijeme zgušćivanja se može podesiti od 1 do 72 sata dodavanjem aktivatora ili klasičnog usporivača. Dodavanjem olakšivača (ekstendera) ili tekućih oteživača, postiže se gustoća cementne kaše u rasponu od 1 320 do 2 880 kg/m³. Vrijednosti reoloških svojstava i filtracije, mogu se podesiti uporabom konvencionalnih cementnih aditiva (Rae i Johnston, 1996).

Korištenje prethodno pripremljene cementne kaše ima mnogo prednosti u odnosu na korištenje klasične cementne kaše. Kao prvo, smanjuje se količina potrebne opreme za

obavljanje cementacije. Nisu potrebni silosi za cement i ostale materijale potrebne za izradu kaše ni ostala glomazna oprema. Zapravo, jedino što je potrebno je spremnik s prethodno pripremljenom cementnom kašom te jedna pumpa. To je velika prednost pri radovima na udaljenim lokacijama, u zahtjevnim uvjetima te na odobalnim lokacijama. Osim toga, mogućnost spremanja cementne kaše u spremniku uklanja potrebu za miješanjem kaše na terenu, što ujedno smanjuje i potreban broj radnika na bušačem postrojenju. Na ovaj se način, također, osigurava homogena smjesa, čija se svojstva jednostavno mogu mjeriti i po potrebi mijenjati. Zbog toga je osigurana i lakša kontrola dobave pumpe kod utiskivanja. Također, prethodno pripremljena cementna kaša posjeduje bolja reološka svojstva i otpornija je na mogućnost zagađenja isplakom za vrijeme cementacije. Zbog odsutnosti cementa u vrećama (ili silosima) i ostalih praškastih aditiva, na terenu više nema problema s prašinom. Na kraju, cementacija primjenom prethodno pripremljene cementne kaše predstavlja i bolje ekološko rješenje nego li klasična cementacija i to upravo zbog manjeg bušotinskog radnog prostora (zbog manje opreme), odsutnosti prašine te manje otpada i buke koji se povezuju s klasičnim cementiranjem. U načelu, kod klasičnog cementiranja, odnosno pripreme cementne kaše na lokaciji bušotine, puno je teže dobro homogenizirati kašu, pripremiti kašu točno određenih svojstava i teže je tu kašu dobro i reprezentativno ispitati (Rae i Johnston, 1996).

Aditivi koji se koriste uglavnom su u tekućem stanju, što dodatno pojednostavljuje proces miješanja, a pojednostavljuje i proračune gustoće. Za povećanje gustoće cementne kaše koriste se tekući oteživači (engl. *liquid weighting agents – LWA*) pa se mijenjanjem omjera kaše i tekućeg oteživača na lokaciji vrlo brzo može postići željena gustoća što je bitno u slučajevima postavljanja cementnih čepova radi skretanja ili napuštanja kanala bušotine.

Prethodno pripremljena cementna kaša se obično koristi kod remontnih i popravnih operacija, održavanja bušotina, napuštanja bušotina, na udaljenim i odobalnim postrojenjima te, naravno, kod ugradnje kolona proširivih zaštitnih cijevi ili lajnera, o čemu će više riječi biti u nastavku (Rae i Johnston, 1996).

6.2. POTREBNA SVOJSTVA PRETHODNO PRIPREMLJENE CEMENTNE KAŠE ZA CEMENTACIJU PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI

Prethodno pripremljena cementna kaša za cementiranje proširivih lajnera ima sljedeće karakteristike (Fanguy et al., 2004):

- nema izdvajanja slobodne vode pri nagibu menzure od 45°,
- nema gravitacijskog odvajanja i/ili taloženja čvrstih čestica u stupcu cementne kaše,
- adekvatno vrijeme zgušćivanja za utiskivanje cementne kaše,
- adekvatno vrijeme zgušćivanja (tj. fluidnosti) za proširenje lajnera,
- brz razvoj tlačne čvrstoće cementnog kamena (Rahman i Zulkafly (2004.) preporučuju minimalnu tlačnu čvrstoću od 3,45 MPa (500 psi) nakon 24 sata, kako bi se smanjilo vrijeme čekanja (engl. *wait-on-cement* – *WOC*) i nastavilo s bušenjem).

Potrebni volumen razdjelnog fluida (engl. *spacer*) i cementne kaše ovisi o (Fanguy et al., 2004):

- promjeru cijevi nakon proširenja (engl. *post expansion diameter*),
- dubini vrha cementne kaše ispod brtvi u području preklapanja proširivog lajnera i prethodno ugrađene kolone zaštitnih cijevi,
- rezultatima ispitivanja kompatibilnosti razdjelnog fluida s isplakom,
- rezultatima ispitivanja taloženja razdjelnog fluida pri statičkim uvjetima,
- rezultatima ispitivanja taloženja razdjelnog fluida i cementne kaše.

Prije ispitivanja cementne kaše provodi se računalna analiza ekvivalentnih gustoća fluida (isplake, razdjelnog fluida i cementne kaše) u cirkulaciji te djelotvornosti istiskivanja isplake pri planiranim dobavama. Kaša se dizajnira tako da njeno vrijeme zgušćivanja (engl. *thickening time*) bude za jedan sat dulje od stvarno potrebnog vremena protiskivanja cementne kaše, a vrijeme u kojem je kaša fluidna (engl. *fluidity time*) treba biti dvostruko dulje od vremena potrebnog za proširivanje cijevi (Fanguy et al., 2004).

6.2.1. Ispitivanje klasične cementne kaše

Metoda ispitivanja cementne kaše pod povećanim tlakom uz prekide (engl. *hesitation squeeze test method*) uobičajena je za ispitivanja klasične cementne kaše tijekom procesa proširivanja cijevi. Metoda se temelji na određenom vremenu zgušćivanja nakon čega slijede naizmjenični ciklusi uključivanja/isključivanja konzistometra (engl. *on/off cycles*). Ciklusi naizmjeničnog uključivanja/isključivanja konzistometra koriste se za smanjenje vremena u kojem je kaša izložena smičnom naprezanju u simuliranim bušotinskim uvjetima koji se pojavljuju tijekom proširivanja ugrađenih cijevi.

Iako se ovaj test često koristi, on ima svoje nedostatke, jer ne uzima u obzir nekoliko važnih faktora. Izračunate vrijednosti smičnih brzina cementne kaše tijekom proširivanja cijevi znatno su manje od izračunatih vrijednosti tijekom ovog testa kad je konzistometar uključen (engl. *on cycle*). Zbog toga, visoke vrijednosti smičnih brzina tijekom ispitivanja cementne kaše neće odgovarati stvarnim smičnim brzinama kaše u prstenastom prostoru tijekom proširenja cijevi (lajnera) (Fanguy et al., 2004).

Za vrijeme kada je konzistometar uključen odvija se miješanje i homogeniziranje cementne kaše čime se sprječava preveliko povećanje čvrstoće gela. Međutim, u stvarnim bušotinskim uvjetima kaša može dulje vrijeme mirovati u prstenastom prostoru i razviti velike čvrstoće gela. Ispitivanje cementne kaše pod povećanim tlakom uz prekide stvara uvjete u kojima naizmjenično uključivanje/isključivanje konzistometra sprječava duža razdoblja segregacije cementne kaše u kojima, uslijed djelovanja gravitacije, dolazi do taloženja čestica prema donjem dijelu stupca cementne kaše odnosno dnu kanala bušotine. Računanjem smične brzine cementne kaše utvrđeno je da tijekom proširivanja cijevi postoje produljeni periodi malih smičnih brzina pa rezultati ispitivanja cementne kaše pri većim smičnim brzinama nisu primjereni niti reprezentativni (Fanguy et al., 2004).

6.2.2. Proračun smične brzine cementne kaše tijekom proširivanja cijevi

Uobičajena brzina proširivanja (engl. *expansion rate*) cijevi je oko 2,4 m/min (7,8 ft/min). Stvarna smična brzina cementne kaše tijekom proširenja cijevi ovisi o nekoliko čimbenika: brzina proširenja cijevi (lajnera), viskoznost cementne kaše, promjeru cijevi, veličini prstenastog prostora i količini kaše koja se istisne tijekom proširenja cijevi.

Pojava malih smičnih brzina cementne kaše u prstenastom prostoru tijekom proširivanja lajnera može se ilustrirati sljedećim primjerom: lajner promjera 0,2445 m (9 5/8") se proširuje na promjer od 0,2707 m (10,657") što uzrokuje istiskivanje prisutne cementne kaše, iz prstenastog prostora u područje iznad konusa za proširivanje cijevi, protokom (engl. *displacement rate, pump rate*) od 0,14 m³/min (0,86 bbl/min). Ova vrijednost protoka odgovara izračunatoj smičnoj brzini manjoj od 50 s⁻¹. Da bi smična brzina cementne kaše u ćeliji konzistometra odgovarala ovoj maloj vrijednosti stvarne smične brzine cementne kaše u prstenastom prostoru iza lajnera, lopatice konzistometra trebale bi u ispitivanoj kaši rotirati brzinom od 11,75 o/min (Fanguy et al., 2004).

Efektivna smična brzina cementne kaše u prstenastom prostoru izračunava se prema jednadžbi (6-1). Varijable potrebne za izračunavanje jednadžbe (6-1) nalaze se u jednadžbama (6-2) – (6-6) (Fanguy et al., 2004).

$$\gamma_{EF} = \frac{8v}{D_{EF}} \quad (6-1)$$

$$v = \frac{4Q}{\pi(D_B^2 - D_l^2)} \quad (6-2)$$

$$D_{EF} = \frac{D_B - D_l}{G} \quad (6-3)$$

$$G = \frac{\left(1 + \frac{Z}{2}\right) [n(3 - Z) + 1]}{n(4 - Z)} \quad (6-4)$$

$$Z = 1 - \left[1 - \left(\frac{D_l}{D_B}\right)^y\right]^{\frac{1}{y}} \quad (6-5)$$

$$y = 0,37n^{-0,14} \quad (6-6)$$

Gdje su:

γ_{EF} – efektivna smična brzina (s^{-1});

v – brzina protjecanja kaše kroz prstenasti prostor (m/s);

D_{EF} – efektivni promjer (m);

Q – dobava (m^3/s);

D_B – promjer kanala bušotine (m);

D_l – vanjski promjer lajnera (m);

G – koeficijent za lakše računanje G (-);

Z – koeficijent za lakše računanje Z (-);

y – koeficijent za lakše računanje y (-);

n – indeks toka (-).

Efektivna smična brzina smanjuje se kako se omjer prstenastog prostora (engl. *annular area*) i proširenog promjera (engl. *expanded diameter*) povećava. Ukoliko korištena cementna kaša nije odgovarajuće pripravljena i ispitana, smične brzine mogu biti premale da bi se spriječilo privlačenje čestica i geliranje kaše. Male vrijednosti smične brzine cementne kaše tijekom proširivanja cijevi bi također mogle omogućiti gravitacijsko odjeljivanje i taloženje čestica u donjem dijelu stupca cementne kaše te u načelu nisu poželjne, jer prije proširenja cijevi, onemogućuju učinkovito protiskivanje isplake iznad vrha cementne kaše. Ti problemi postaju još izraženiji pri uvjetima viših temperatura, koje pogoduju bržem zgušćivanju cementne kaše (Fanguy et al., 2004).

6.2.3. Laboratorijsko ispitivanje prethodno pripravljene cementne kaše

Laboratorijsko ispitivanje počinje ispitivanjem dugovječnosti bazne cementne kaše (engl. *base slurry longevity*). Cilj ovog ispitivanja je osigurati stabilnost prethodno pripravljene cementne kaše tijekom perioda skladištenja te u uvjetima transporta na lokaciju. Vrijeme skladištenja (engl. *storage time*) za cementiranje na odobalnim lokacijama može biti i do 28 dana (Fanguy et al., 2004).

Nakon što je bazna kaša dizajnirana i ispitana njena dugovječnost, započinje pilot testiranje. Pilot testiranje je u biti testiranje malog uzorka podvrgnutog očekivanim terenskim uvjetima, gdje je uzorak identičnog sastava kao i proizvod koji će se koristiti za samu operaciju na terenu. Pilot testovi provode se s cementom i aditivima, nadodanim baznom fluidu, koji će se koristiti na terenu. Ispitivanje slobodne vode i filtracije se provodi prema API specifikacijama i preporukama. Kad su postignuta željena svojstva, pristupa se ispitivanju vremena zgušćivanja (Fanguy et al., 2004).

6.2.4. Ispitivanje vremena zgušćivanja cementne kaše

Za ispitivanje vremena zgušćivanja prethodno pripravljene cementne kaše koristi se HP/HT konzistometar (engl. *high pressure/high temperature consistometer*). Konzistometar radi prema programu u kojem su učitane krivulje tlaka i temperature za specifične bušotinske uvjete. Tempo povećanja vrijednosti tlaka i temperature od početnih do konačnih, odnosno vrijeme, u kojem se postignu tlak (engl. *Bottom Hole Pressure – BHP*) i temperatura u cirkulaciji na dnu bušotine (engl. *Bottom Hole Circulation Temperature – BHCT*), dobije se tako da se unutarnji volumen cijevi podijeli s dobavom pumpe (Fanguy et al., 2004).

Brzina rotacije lopatica u ćeliji konzistometra koja je ispunjena cementnom kašom iznosi 150 o/min pri temperaturi u cirkulaciji na dnu bušotine kako bi se postiglo željeno vrijeme zgušćivanja. Kada se dosegne željeno vrijeme zgušćivanja, isključi se motor konzistometra te počinje ispitivanje vremena fluidnosti. Vrijeme fluidnosti odnosi se na vrijeme u kojem se cementna kaša nalazi u izacijevnom prstenastom prostoru nakon utiskivanja i za vrijeme proširenja lajnera (cementna kaša nalazi se u statičkim uvjetima). Pod vremenom zgušćivanja obično se misli na vrijeme koje je potrebno za utiskivanje cementne kaše u bušotinu, odnosno u izacijevni prstenasti prostor (cementna kaša je u cirkulaciji). Ta dva termina ponekad se koriste odvojeno, a ponekad se pod vremenom zgušćivanja misli i na vrijeme zgušćivanja i na vrijeme fluidnosti zajedno.

Početak ispitivanja vremena fluidnosti, vrijednost temperature se, drugačijim tempom, povećava od temperature u cirkulaciji na dnu bušotine (BHCT) na vrijednost statičke temperature na dnu bušotine (engl. *Bottom Hole Static Temperature – BHST*). Tempo povećanja temperature (još se naziva sekundarnom krivuljom porasta temperature) učitava se u program konzistometra, a rezultat je računalnog programa za modeliranje temperature. Tijekom određivanja vremena fluidnosti, motor konzistometra je cijelo vrijeme isključen, osim na dvije sekunde svakih sat vremena. Uključivanje motora na dvije sekunde svakih sat vremena omogućava mjerenje konzistencije kaše u jedinicama konzistencije (engl. *Bearden units of consistency – Bc*). Taj podatak pruža prvobitni uvid u stanje kaše. Ukoliko se u sat vremena konzistencija kaše poveća za 10 Bc, potrebno je redizajnirati kašu i ponovno je ispitati (Fanguy et al., 2004).

Još jedna metoda kojom se može odrediti vrijeme zgušćivanja uključuje instalaciju potenciometra, tahometra i sklopku na standardnom HP/HT konzistometru. Dodatna oprema omogućuje odabir brzine rotacije lopatica od 150 o/min, ali i druge brzine rotacije koje bolje odgovaraju ispitivanoj cementnoj kaši. Izračunata smična brzina, temeljena na brzini proširenja cijevi i promjeru, može se preračunati u brzinu rotacije lopatica konzistometra. Metoda bolje simulira uvjete smicanja cementne kaše u bušotini te nema potrebe da se motor konzistometra uključuje svakih sat vremena na dvije sekunde (Fanguy et al., 2004).

Nakon završetka ispitivanja vremena zgušćivanja, ćelija s cementnom kašom se izvadi iz konzistometra te se kaša dalje koristi za ispitivanje geliranja i gravitacijskog odjeljivanja i taloženja. Kada se potvrdi da je kaša stabilna, bez geliranja, taloženja i odjeljivanja,

ulijeva se u ćeliju ultrazvučnog analizatora (engl. *ultrasonic cement analyzer – UCA*) koji omogućuje praćenje očvršćivanja cementne kaše u cementni kamen odnosno razvoj tlačne čvrstoće s vremenom. Nakon ovog nedestruktivnog ispitivanja tlačne čvrstoće, ponovno se ispituju svi početni parametri kaše kako bi se provjerila ponovljivost rezultata testa. Važno je napomenuti da prilikom ponovnog testiranja vremena zgušćivanja, motor konzistometra ostaje isključen tijekom cijelog testa (Fanguy et al., 2004).

Završetkom svih ispitivanja, podaci se potvrđuju i pristupa se pripremi baznog fluida u potrebnoj količini za obavljanje cementacije. Bazni fluid sastoji se od vode, aditiva za održavanje čvrstih čestica u suspenziji, aditiva za sprječavanje zgušćivanja i dispergatora. Bazni fluid se provjerava na sadržaj klora, pH vrijednost, temperaturu i viskoznost. Prije nego se u bazni fluid dodaju cement i eventualno potrebni praškasti aditivi, bazni fluid se određeno vrijeme miješa i homogenizira. Nakon dodavanja cementa i potrebnih aditiva, nastaje cementna kaša koja se miješa i homogenizira najmanje 30 minuta te se određuje njena gustoća. Uz to, ispituju se i reološka svojstva te se uspoređuju s rezultatima pilot testiranja (Fanguy et al., 2004).

Kada se kaša napokon pripremi, odnosno promiješa i homogenizira te se potvrde reološka svojstva, tekući uzorak te kaše šalje se još jednom i zadnji put u laboratorij. To zadnje testiranje od kritične je važnosti za uspješnost cementacije. Kada ti zadnji testovi završe, kaša se šalje na lokaciju i cementacija može započeti (Fanguy et al., 2004).

Kao što je već prije rečeno, kod prethodno pripremljene cementne kaše problemi s homogenošću i gustoćom potpuno su eliminirani, što nije slučaj kod konvencionalno miješane kaše. Prethodno pripremljena cementna kaša zapravo odvaja proces miješanja, odnosno pripreme kaše, od pumpanja, odnosno utiskivanja kaše u bušotinu, dok su kod konvencionalne metode ta dva procesa vezana jedan za drugi. To i jest jedna od najvećih prednosti ovog pristupa.

6.3. PRIMJERI KORIŠTENJA PRETHODNO PRIPREMLJENE CEMENTNE KAŠE ZA CEMENTIRANJE PROŠIRIVIH LAJNERA

U nastavku bit će izloženo šest primjera iz prakse uporabe prethodno pripremljene cementne kaše za cementaciju proširivih lajnera u bušotinu, a koje je u svom radu opisao Fanguy sa suradnicima (2004.). U tim primjerima je bila korištena prethodno opisana metoda ispitivanja vremena zgušćivanja.

PRIMJER 1:

Proširivi lajner početnog vanjskog promjera 0,1524 m (6") ugrađen je u više sekcija u bušotinu u južnom Teksasu i cementiran. Cementacija je uspješno obavljena s 8,59 m³ (54 barela) prethodno pripremljene cementne kaše. Vrijeme zgušćivanja cementne kaše iznosilo je 13 sati što je dvostruko duže vrijeme od vremena potrebnog za proširenje lajnera. Cementna kaša je očvrstnula u cementni kamen koji je, 24 sata nakon isteka vremena zgušćivanja, postigao tlačnu čvrstoću od 18,96 MPa (2 750 psi). Zonalna izolacija uspješno je postignuta bez potrebe za popravnim operacijama. U tablici 6-1. prikazani su podaci o bušotini, lajneru i cementnoj kaši (Fanguy et al., 2004).

Tablica 6-1. Podaci o bušotini, cementnoj kaši i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u južnom Teksasu (Fanguy et al., 2004)

Mjerena dubina bušotine, m (ft)	3 083,97	(10 118)
Promjer lajnera prije proširenja, m (in)	0,1524	(6)
Promjer lajnera nakon proširenja, m (in)	0,1692	(6,663)
Duljina lajnera, m (ft)	488,59	(1 603)
Promjer sekcije bušotine br. 1, m (in)	0,2159	(8 ½)
Promjer sekcije bušotine br. 2, m (in)	0,1905	(7 ½)
Promjer sekcije bušotine br. 3, m (in)	0,3112	(12 ¼)
Promjer sekcije bušotine br. 4, m (in)	0,2350	(9 ¼)
Gustoća cementne kaše, kg/m ³ (ppg)	1 941	(16.2)
Vrijeme zgušćivanja, h	13	
Volumen cementne kaše, m ³ (bbl)	8,59	(54)

PRIMJER 2:

Proširivi lajner početnog vanjskog promjera 0,2445 m (9 ⅝") ugrađen je u bušotinu u dubokom moru Meksičkog Zaljeva i cementiran utiskivanjem prethodno pripremljene

cementne kaše. Prije cementacije, u bušotini se je nalazila isplaka (tip NovaPlus™) gustoće 1 917 kg/m³ (16 ppg). Cementna kaša je protisnuta u prstenasti prostor iza lajnera te je on nakon toga proširen bez poteškoća. Cementna kaša je očvrtnula u cementni kamen koji je nakon 24 sata imao tlačnu čvrstoću od 13,10 MPa (1 900 psi). Procjena kvalitete cementacije nije bila moguća, jer je došlo do velikih gubitaka nakon bušenja pete kolone, iako gubitaka tijekom same cementacije nije bilo. U tablici 6-2. prikazani su podaci o bušotini, lajneru i cementnoj kaši (Fanguy et al., 2004).

Tablica 6-2. Podaci o bušotini, cementnoj kaši i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u dubokom moru Meksičkog Zaljeva (Fanguy et al., 2004)

Mjerena dubina bušotine, m (ft)	5 204,46	(17 075)
Promjer lajnera prije proširenja, m (in)	0,2445	(9 5/8)
Promjer lajnera nakon proširenja, m (in)	0,2707	(10,657)
Duljina lajnera, m (ft)	211,23	(693)
Promjer bušotine, m (in)	0,3112	(12 1/4)
Gustoća cementne kaše, kg/m ³ (ppg)	1 965	(16,4)
Vrijeme zgušćivanja, h	10	
Volumen cementne kaše, m ³ (bbl)	2,94	(18,5)

PRIMJER 3:

Proširivi lajner početnog vanjskog promjera 0,1524 m (6") ugrađen je u bušotinu u jugoistočnom Teksasu i cementiran protiskivanjem 2,07 m³ (13 barela) prethodno pripremljene cementne kaše s aditivom protiv migracije plina (engl. *gas migration pre-mixed cement slurry*) gustoće 1 845 kg/m³ (15,4 ppg). Cementna kaša je utisnuta planiranom dobavom, a lajner je proširen bez problema. Uspješan test primanja (engl. *leakoff test – LOT*) proveden je utiskivanjem fluida gustoće 2 337 kg/m³ (19,5 ppg). U tablici 6-3. prikazani su podaci o bušotini, lajneru i cementnoj kaši (Fanguy et al., 2004).

Tablica 6-3. Podaci o bušotini, cementnoj kaši i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u jugoistočnom Teksasu (Fanguy et al., 2004)

Mjerena dubina bušotine, m (ft)	4 578,10	(15 020)
Promjer lajnera prije proširenja, m (in)	0,1524	(6)
Promjer lajnera nakon proširenja, m (in)	0,1651	(6,5)
Duljina lajnera, m (ft)	354,48	(1 163)
Promjer bušotine, m (in)	0,1778	(7)
Gustoća cementne kaše, kg/m ³ (ppg)	2 097	(17,5)
Vrijeme zgušćivanja, h	8	
Volumen cementne kaše, m ³ (bbl)	2,07	(13)

PRIMJER 4:

Proširivi lajner početnog vanjskog promjera 0,1524 m (6") ugrađen je u bušotinu u jugoistočnom Teksasu i cementiran utiskivanjem 0,95 m³ (6 barela) prethodno pripremljene cementne kaše s aditivom protiv migracije plina dobavom od 0,64 m³/min (4 bpm).

Posao je obavljen bez poteškoća i bez odstupanja od plana. Cementna kaša je očvrstnula u cementni kamen koji je, 24 sata nakon završetka vremena zgušćivanja, imao tlačnu čvrstoću od 13,10 MPa (1 900 psi). Nakon bušenja pete, uspješno je proveden test primanja (engl. *casing shoe test*) kako bi se utvrdio maksimalni tlak koji stijene mogu izdržati. Također je ispitana i kvaliteta cementne veze (engl. *cement bond log – CBL*) te je potvrđena potpuna veza duž cijelog cementiranog intervala. U tablici 6-4. prikazani su podaci o bušotini, lajneru i cementnoj kaši (Fanguy et al., 2004).

Tablica 6-4. Podaci o cementnoj kaši, bušotini i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u jugoistočnom Teksasu (Fanguy et al., 2004)

Mjerena dubina bušotine, m (ft)	3 962,10	(12 999)
Promjer lajnera prije proširenja, m (in)	0,1524	(6)
Promjer lajnera nakon proširenja, m (in)	0,1651	(6,5)
Duljina lajnera, m (ft)	178,61	(586)
Promjer bušotine, m (in)	0,1778	(7)
Gustoća kaše, kg/m ³ (ppg)	1 965	(16,4)
Vrijeme zgušćivanja, h	7	
Volumen cementne kaše, m ³ (bbl)	0,95	(6)

PRIMJER 5:

U jednoj bušotini u južnom Teksasu, sekcije ugrađenog proširivog lajnera početnog vanjskog promjera 0,1937 m (7 5/8") cementirane su na dva intervala počevši od mjerene dubine od 2 919,98 m. Korištena je prethodno pripremljena cementna kaša s aditivom protiv migracije plina (engl. *gas migration pre-mixed cement slurry*) gustoće 1 737 kg/m³ (14 ppg). Cementna kaša je utisnuta planiranom dobavom. Postignuta je željena zonalna izolacija, a nakon bušenja pete lajnera proveden je uspješan test primanja naslaga (engl. *leakoff test – LOT*) fluidom gustoće 2 133 kg/m³ (17,8 ppg). Tablica 6-5. sadrži podatke o bušotini, lajneru i cementnoj kaši korištenoj u ovoj operaciji (Fanguy et al., 2004).

Tablica 6-5. Podaci o cementnoj kaši, bušotini i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u južnom Teksasu (Fanguy et al., 2004)

Mjerena dubina bušotine, m (ft)	2 919,98	(9 580)
Promjer lajnera prije proširenja, m (in)	0,1937	(7 5/8)
Promjer lajnera nakon proširenja, m (in)	0,2137	(8,415)
Duljina lajnera, m (ft)	331,62	(1 088)
Promjer sekcije bušotine br. 1, m (in)	0,3112	(12 1/4)
Promjer sekcije bušotine br. 2, m (in)	0,2413	(9 1/2)
Gustoća cementne kaše, kg/m ³ (ppg)	1 737	(14,5)
Vrijeme zgušćivanja, h	11	
Volumen cementne kaše, m ³ (bbl)	5,41	(34)

PRIMJER 6:

Proširivi lajner početnog vanjskog promjera 0,2445 m (9 5/8") ugrađen je u bušotinu u Meksičkom Zaljevu i cementiran utiskivanjem prethodno pripremljene cementne kaše željenom dobavom. Uspješna tlačna proba (engl. *pressure test*) provedena je na vrhu ugrađenog lajnera, kao i uspješan test primanja naslaga (LOT) u području pete lajnera. Osim toga, otvoreni kanal bušotine ispod ugrađenog lajnera uspješno je začepljen te je donesena odluka da se probuši novi, koso usmjereni kanal bušotine. Provedeno je i ispitivanje kvalitete veze između kolone, cementnog kamena i stijena (CBL) koje je ukazalo na uspješnu zonalnu izolaciju. Nakon testa, izrezan je otvor na proširivom lajneru te je opet uspješno proveden test primanja (LOT). U tablici 6-6. navedeni su podaci o bušotini, cementnoj kaši i cementiranom proširivom lajneru (Fanguy et al., 2004).

Tablica 6-6. Podaci o bušotini, cementnoj kaši i proširivom lajneru ugrađenom u bušotinu u Meksičkom Zaljevu (Fanguy et al., 2004)

Mjerena dubina bušotine, m (ft)	4 328 (14 200)
Promjer lajnera prije proširenja, m (in)	0,2445 (9 5/8)
Promjer lajnera nakon proširenja, m (in)	0,2713 (10,682)
Duljina lajnera, m (ft)	770,23 (2 527)
Promjer bušotine, m (in)	0,3048 (12)
Gustoća cementne kaše, kg/m ³ (ppg)	2 121 (17,7)
Vrijeme zgušćivanja, h	11
Volumen cementne kaše, m ³ (bbl)	8,74 (55)

Ukratko, prema podacima iz tablica 6-1. do 6-6., može se istaknuti da su korišteni proširivi lajneri bili početnih vanjskih promjera 0,1524 m (6"), 0,1937 m (7 5/8") te 0,2445 (9 5/8"). Najviše je proširen lajner u prvom primjeru i to s 0,1524 m (6") na 0,1692 m (6,663"), odnosno za 11,05%. Najdublja bušotina u kojoj je ugrađen proširivi lajner iz ovih primjera imala je mjerenu dubinu od 5 204,46 m (17 075 ft), a najplića bušotina imala je mjerenu dubinu od 2 919,98 m (9 580 ft). Za cementaciju tih lajnera iskorišteno je od 0,95 m³ do 8,74 m³ (od 6 do 55 barela) prethodno pripremljene cementne kaše. Vrijeme zgušćivanja iznosilo je od 7 do 13 sati.

Promatrajući podatke iz tablica, također se može zaključiti da je najviše cementne kaše (8,74 m³ ili 55 bbl) iskorišteno u zadnjem primjeru, u kojem je zacementirana i najdulja kolona proširivog lajnera duljine 770,23 m (2 527 ft). U prvom primjeru iskorišteno je neznatno manje kaše (8,59 m³ ili 54 bbl) za cementiranje druge najdulje, ali gotovo upola kraće kolone duljine 488,59 m (1 603 ft). U tom primjeru bilo je najduže vrijeme zgušćivanja i iznosilo je 13 sati. Taj prvi primjer također je zanimljiv, jer autor navodi četiri različita promjera bušotine u rasponu od 0,1905 m (7 1/2") do 0,3112 m (12 1/4") u koje je ugrađen proširivi lajner proširenog promjera od 0,1692 m (6,663"). Iako autor ne objašnjava u koje sekcije i kako točno su cementirani ti dijelovi kanala, vjerojatno su cijevi istog promjera bile ugrađene i cementirane u različite dijelove kanala bušotine s navedenim promjerima. Do tog zaključka se može doći ukoliko se uzme u obzir činjenica da je u najveći navedeni promjer kanala od 0,3112 m (12 1/4") ugrađena puno manja cijev, konačnog promjera 0,1692 m (6,663"), što bi objasnilo toliko veliku potrošnju cementne

kaše (8,59 m³ ili 54 bbl) za duljinu proširivog lajnera od 488,59 m (1 603 ft), pogotovo ako tu duljinu i količinu iskorištene kaše usporedimo s zadnjim primjerom gdje je ugrađen gotovo dvostruko dulji lajner, a iskorišteno je samo 0,16 m³, odnosno samo jedan barel cementne kaše više. Slična situacija opisana je i u petom primjeru, gdje je lajner konačnog promjera 0,2137 m (8,415") cementiran u bušotinu u dvije različite sekcije promjera 0,3112 m (12 ¼") i 0,2413 m (9 ½"), što pokazuje da je cementiranje proširivog lajnera istog promjera u različitim dijelovima bušotine različitog promjera uobičajena praksa. Cementna kaša korištena u ovim cementacijama imala je gustoću od 1 737 kg/m³ (14,5 ppg) do 2 121 kg/m³ (17,7 ppg).

7. PRIMJERI IZ PRAKSE

Nakon šest jednostavnih primjera iz prakse navedenih u prethodnom poglavlju, u ovom poglavlju će biti iznesena i detaljno objašnjena još dva primjera ugradnje i cementacije proširivih lajnera. U prvom primjeru opisana je ugradnja proširivog lajnera u HP/HT bušotini u Maleziji u studenom 2002. godine (Rahman i Zulkafly, 2004). U drugom primjeru opisana je ugradnja proširivog lajnera u bušotinu s ekstremno visokim tlakom i temperaturom (engl. *extreme high pressure/high temperature – eHP/HT*) u Sredozemnom moru kod Egipta (Bhaisora et al., 2015). U oba slučaja, za pripremu i homogenizaciju cementne kaše korištena je već prije spomenuta metoda miješanja manjih obroka cementne kaše.

7.1. UGRADNJA PROŠIRIVOG LAJNERA U HP/HT BUŠOTINI U MALEZIJI

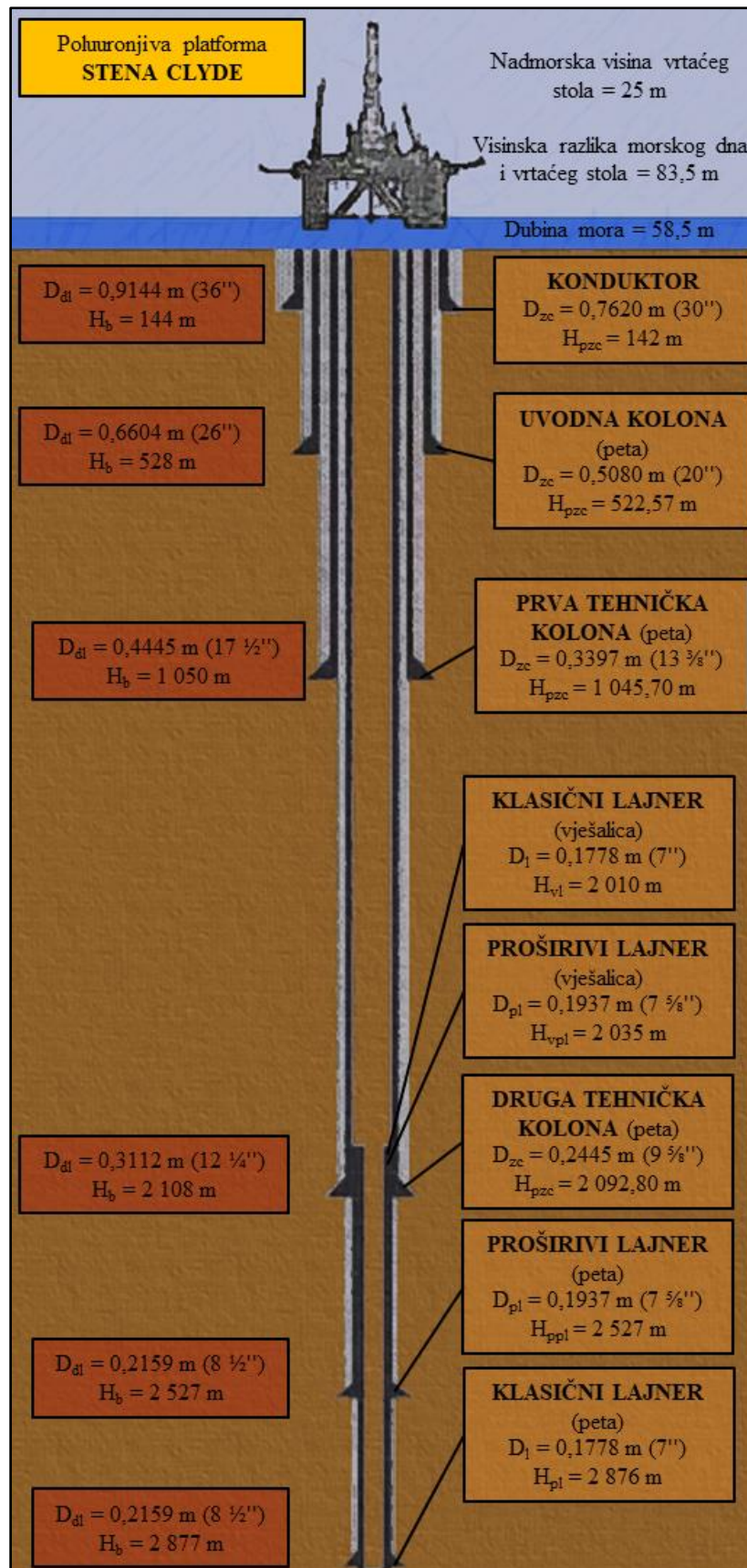
U nastavku se navode podaci o bušotini i njenoj izradi, ugradnji i cementaciji proširivog lajnera te svojstvima cementne kaše.

7.1.1. Podaci o bušotini

Istražna bušotina Bergading Deep-3 nalazi se u odobalju Malajskog poluotoka, oko 170 km sjeveroistočno od krajnjeg sjevera Malezijskog dijela poluotoka. Svrha izrade ove bušotine bila je ispitati proizvodne mogućnosti i povećati rezerve ugljikovodika u Malajskom bazenu. Za bušotinu se prije njene izrade pretpostavilo da će imati uvjete visokih tlakova i temperatura temeljem podataka dobivenih iz bušotina u blizini. Pretpostavljena statička temperatura netaknutog podzemlja na vertikalnoj dubini (mjerenoj od vrtaćeg stola) od 2 975 m iznosila je 165 °C (330 °F), a najveći očekivani slojni tlak iznosio je 610 bar (8 860 psi). Početak zone povećanog tlaka očekivan je na vertikalnoj dubini od 1 794 m. Od navedene dubine, očekivalo se povećanje gradijenta slojnog tlaka s 0,1294 na 0,1371 bar/m (s 0,572 na 0,606 psi/ft) tijekom bušenja sljedećih 391 m. Zbog ove pretpostavke, razmišljalo se o ugradnji klasičnog niza zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8") do vertikalne dubine od 2 225 m kako bi se prekrila cijela zona povećanog tlaka.

Međutim, bušenjem bušotine i karotažnim mjerenjima dobiveni su podaci koji se razlikuju od pretpostavljenih. Statička temperatura na dnu bušotine iznosila je 162 °C (323 °F), a izmjereni tlak iznosio je 470 bar (6 822 psi). Početak zone povećanog tlaka utvrđen je tek na vertikalnoj dubini od 1 820 m. S obzirom da je odlučeno da se klasična kolona promjera 0,2445 m (9 5/8") ugradi samo do vertikalne dubine od 2 092 m (133 m pliće nego

što je isprva planirano), odlučeno je da će sljedeća ugrađena kolona biti proširivi lajner početnog promjera 0,1937 m ($7 \frac{5}{8}$ "") kako bi se ublažilo smanjivanje promjera kanala bušotine zbog ugradnje dodatne kolone. Na slici 7-1. nalazi se shematski prikaz konstrukcije bušotine Bergading Deep-3. Proširivi lajner u ovom slučaju ponaša se kao čelični oblog koji izolira zonu gubljenja isplake. Probušeni interval sastoji se uglavnom od pješčenjaka s proslojcima glinovitih (engl. *claystone*) i siltoznih (engl. *siltstone*) stijena. Bušenjem se naišlo i na tanki sloj ugljena za koji se smatra da je bio glavni sloj u koji se gubila isplaka.



Slika 7-1. Shematski prikaz konstrukcije bušotine Bergading Deep-3 (Rahman i Zulkafly, 2004)

7.1.2. Podaci o bušenju

Nakon ugradnje druge tehničke kolone vanjskog promjera 0,2445 m (9 5/8") do 2 092,80 m nastavljeno je bušenje kanala bušotine kroz tvrde stijene dlijetom promjera 0,2159 m (8 1/2") za ugradnju proširivog lajnera početnog promjera 0,1937 m (7 5/8"). Nakon bušenja ovog intervala, provedeno je mjerenje promjera kanala te je utvrđeno da kanal nema dostatan promjer za ugradnju proširivog lajnera i da ga treba dodatno proširiti. Tijekom proširivanja navedenog dijela kanala bušotine (od 2 108 do 2 527 m) iskorištena su tri dlijeta iznad kojih su bili ugrađeni proširivači te je zabilježen blagi porast gradijenta slojnog tlaka. Bušenje je završeno na 2 527 m dubine zbog pojave velikih gubitaka isplake. Gubitak isplake gustoće 1 726 kg/m³ (14,4 ppg) iznosio je 9,54 m³/h (60 bbl/h) pri dohavi od 2,44 m³/min (645 gal/min), a 4,77 m³/h (30 bbl/h) pri 1,89 m³/min (500 gal/min). Gubljenje isplake zaustavljeno je utiskivanjem obroka isplake u koju je dodan materijal za zatvaranje mjesta gubljenja isplake (engl. *lost circulation material – LCM*) volumena 15,9 m³ (100 bbl) dobavom od 0,38 m³/min (100 gal/min). Temperatura u optoku na dnu (BHCT) iznosila je 130 °C (266 °F), a statička temperatura iznosila je 149 °C (300 °F).

7.1.3. Ugradnja proširivog lajnera

Proširivi lajner spušten je do vertikalne dubine od 2 527 m u svrhu prekrivanja zone gubljenja isplake uz minimalni gubitak promjera bušotine i kako bi se u nastavku bušenja mogla koristiti isplaka veće gustoće. Ugrađen je u dio kanala promjera 0,2159 m (8 1/2") koji je naknadno proširivačima povećan na 0,2540 m (10"). Proširivi lajner je ovješten u drugu tehničku kolonu vanjskog promjera 0,2445 m (9 5/8") i jedinične težine 68,6 daN/m (47 lb_f/ft). Peta druge tehničke kolone nalazi se na vertikalnoj dubini od 2 092 m, a sekcija preklapanja proširivog lajnera i druge tehničke kolone dugačka je 60 m. U sekciji preklapanja, na proširivom lajneru se nalaze elastomerne brtvenice (engl. *set of elastomers*) koje omogućuju potpuno hidrauličko brtvljenje i djeluju kao gornji paker lajnera (engl. *liner top packer*). Početni vanjski promjer proširivog lajnera je 0,1937 m (7 5/8"), a početni unutarnji promjer je 0,1746 m (6 7/8"). Konačni vanjski promjer proširivog lajnera (nakon proširenja) iznosi 0,2170 m (8,544"), a konačni unutarnji promjer iznosi 0,1989 m (7,830"). Prema tome, debljina stijenke lajnera smanjila se s 0,0095 m (0,375") na 0,0091 m (0,357"), dok je vanjski promjer lajnera povećan za 12%.

Prije utiskivanja cementne kaše u izacijevni prstenasti prostor, a u svrhu čišćenja kanala bušotine, procirkulirana je isplaka volumena koji je jednak dva volumena kanala

bušotine s dobavom od 1,82 m³/min (480 gal/min). To je nešto niže od preporuke koja je spomenuta u 5. poglavlju za dobavu isplake od 1,89 m³/min (500 gal/min), no dovoljno je blizu, a povećanje nije bilo moguće da ne bi došlo do povećanih gubitaka isplake. Plastična viskoznost isplake iznosila je 0,033 Pa·s (33 cP), naprezanje pri pokretanju iznosilo je 9,10 Pa (19 lb_f/100 ft²), a čvrstoća 10-minutnog gela isplake iznosila je od 5,27 do 6,23 Pa (od oko 11 do 13 lb_f/100 ft²). Te vrijednosti u skladu su s preporukama te je tako vrijednost naprezanja pri pokretanju isplake za 4,79 Pa (10 lb_f/100 ft²) manja od vrijednosti pri pokretanju cementne kaše. Uz to, vrijednost 10-minutnog gela isplake održavana je niskom.

Kaliperom je utvrđen prosječan promjer otvorenog kanala bušotine te on iznosi 0,2532 m (9,97"). Korištenjem ovog podatka izračunat je potreban volumen cementne kaše za cementaciju proširivog lajnera. Odlučeno je da će volumen biti jednak 75% volumena izacijevnog prstenastog prostora prije proširenja lajnera kako se proširivanjem lajnera i dizanjem razine cementne kaše ona ne bi podigla do brtvenica i prelila u proširivi lajner. Postupak utiskivanja cementne kaše u bušotinu izveden je dva puta, ali uzrok nije bila cementna kaša. Prvi je put cementna kaša utisnuta, ali je došlo do propuštanja lajnera pa je cementna kaše istisnuta iz bušotine, a proširivi lajner izvučen na površinu. To je napravljeno bez problema zahvaljujući stabilnosti cementne kaše. Utvrđeno je da je u aluminijsku petu lajnera bio ugrađen vijak (engl. *bolt*) koji je onemogućio potpuno brtvljenje između pete lajnera i nahodnog cementacijskog čepa (engl. *latching dart*). To je onemogućilo stvaranje tlačne komore i početak proširivanja lajnera.

Ponovni pokušaj ugradnje proširivog lajnera prošao je bez poteškoća. U svrhu istiskivanja uljne isplake gustoće 1 714 kg/m³ (14,3 ppg), protisnuto je 1,59 m³ (10 bbl) kemijskog ispiraća te 3,18 m³ (20 bbl) otežanog razdjeljivača gustoće 1 773 kg/m³ (14,8 ppg) dobavom od 0,48 m³/min (3 bbl/min). Plastična viskoznost otežanog razdjeljivača iznosila je 0,032 Pa·s (32 cP), a naprezanje pri pokretanju iznosilo je 11,02 Pa (23 lb_f/100 ft²). Te vrijednosti dizajnirane su tako da budu po iznosu između uljne isplake i cementne kaše. Tijekom protiskivanja ovih fluida, tlak na ušću kretao se između 41,37 i 48,23 bar (između 600 i 700 psi). Tlak na ušću za vrijeme utiskivanja cementne kaše koja je pripremljena i homogenizirana miješanjem manjih obroka gustoće 1 797 kg/m³ (15 ppg) dobavom od 0,48 m³/min (3 bbl/min) kretao se između istih vrijednosti, a utisnuto je ukupno 5,25 m³ (33 bbl) cementne kaše. Nakon utiskivanja cementne kaše, a prije ubacivanja cementacijskog čepa u bušaću šipke, utisnuto je još 0,56 m³ (3,5 bbl) kemijskog

ispiraća. Čep je protisnut s 20 m³ (125,8 bbl) uljne isplake gustoće 1 714 kg/m³ (14,3 ppg) dobavom od 0,64 m³/min (4 bbl/min) tlakom na ušću koji se kretao od 41,37 do 62,05 bar (od 600 do 900 psi). Na taj način je cementna kaša bila utisnuta u izacijevni prstenasti prostor. Kada je čep odsjeo u prijelaz za odsjedanje (dio cementacijske pete) (engl. *float equipment*), tlak se odmah povećao s 48,23 na 82,74 bar (s 700 na 1 200 psi). Taj tlak bio je konstantan otprilike jednu minutu, nakon čega je ponovno povećan na 206,84 bar (3 000 psi) u razdoblju od dvije minute. Utiskivanje je nastavljeno sljedećih 18 minuta te se tlak polako povećavao do 227,53 bar (3 300 psi) pri kojem su pukli diskovi (engl. *burst discs*) i tlak se smanjio na nulu. Na ušću je zabilježen potpuni povrat fluida, naravno, bez povrata cementne kaše. Od početka utiskivanja otežanog razdjeljivača do pucanja diskova prošlo je 90 minuta, a za ostatak operacija, prvenstveno proširivanja lajnera bilo je potrebno još 220 minuta.

Za proširenje lajnera potreban je tlak na ušću od 241,32 bar (3 500 psi) koji je postignut utiskivanjem fluida prosječnom dobavom od 0,12 do 0,16 m³/min (od 0,75 do 1 bbl/min). Lajner je proširen polako izvlačenjem bušaćih šipki iz bušotine uz opterećenje na kuki iznosa od 800 do 890 kN (od 180 do 200 kip). Tlak se morao ispustiti nakon izvlačenja svakog pasa bušaćih šipki kako bi se on odvojio iz niza. Kod proširivanja lajnera u sekciji preklapanja s prethodnom kolonom, nateg na kuki povećao se na otprilike 1 290 do 1 335 kN (290 do 300 kip). Nakon proširenja ovog proširivog lajnera, duljine 485 m (od 2 032 do 2 517 m vertikalne dubine), zagađena je isplaka uspješno istisnuta obrnutom cirkulacijom.

7.1.4. Daljnje operacije

Nakon ugradnje proširivog lajnera i postizanja dovoljne čvrstoće cementnog kamena, nastavljeno je s bušenjem kanala dlijetom s proširivačem promjera 0,2159 m (8 ½") do dubine od 2 877 m. U tu sekciju ugrađen je konvencionalni lajner promjera 0,1778 m (7") te je ovješeno u drugu tehničku kolonu promjera 0,2445 m (9 ⅝") iznad vješalice proširivog lajnera. Ovaj lajner zacementiran je tipičnom cementnom kašom s aditivom protiv migriranja plina gustoće 1 893 kg/m³ (15,8 ppg). Provedeno je snimanje kvalitete veze cementnog kamena (CBL) iza lajnera promjera 0,1778 m (7"). Rezultati ispitivanja nisu bili povoljni na nekim intervalima iza lajnera. Test je ponovljen nekoliko dana kasnije, ovaj put s tlakom u lajneru od 34,47 bar (500 psi). Ovaj test pokazao je kvalitetniju cementnu vezu te je operator odlučio započeti test proizvodnje (engl. *production test*) u 3

zone koje se nalaze iza konvencionalnog lajnera promjera 0,1778 m (7"), a ujedno i iza proširivog lajnera. Na taj način je ispitana i kvaliteta cementne veze iza proširivog lajnera. Testovi proizvodnje su prošli zadovoljavajuće te je utvrđeno da nije došlo do propuštanja i migriranja fluida iza te dvije kolone te da je ostvarena dobra cementna veza, iako rezultati CBL-a nisu bili optimalni.

7.1.5. Cementna kaša

Za cementaciju proširivog lajnera korištena je cementna kaša pripravljena od portland cementa klase G kojem je dodano:

- + 35% kvarcnog brašna na masu cementa (engl. *by weight of cement – BWOC*)
- + 2,66 ml/kg (0,03 gps) silikonskog antipjenušavca
- + 66,58 ml/kg (0,75 gps) fluida za smanjivanje filtracije PEI (polietileniminske) baze
- + 88,77 ml/kg (1,00 gps) usporivača na bazi organske kiseline
- + 26,63 ml/kg (0,30 gps) dispergatora na bazi PNS-a (polinaftalenskog sulfonata)
- + 31,07 ml/kg (0,35 gps) patentiranog višenamjenskog aditiva
- + 514,87 ml/kg (5,80 gps) slane vode.

Oznaka gps (engl. *gallon per sack*) označava koliko se galona aditiva dodaje na jednu vreću suhog cementa. Jedna vreća cementa ima masu od 42,64 kg (94 lb), pa je tako konverzijski faktor iz gps u ml/kg jednak 88,77. Vrijednost u ml/kg označava koliko se mililitara aditiva dodaje na jedan kilogram suhog cementa.

U tablici 7-1. prikazana su svojstva cementne kaše korištene za cementiranje proširivog lajnera.

Tablica 7-1. Svojstva cementne kaše korištene za cementiranje proširivog lagnera u bušotini Bergading Deep-3 (Rahman i Zulkafly, 2004)

SVOJSTVO	VRIJEDNOST
Gustoća, kg/m ³ (ppg)	1 797 (15)
Vrijeme zgušćivanja pri BHCT* do 100 Bc, min	210
Vrijeme fluidnosti pri BHST** do 100 Bc, min	615
API filtracija pri BHCT, cm ³ /30 min/70 bar	46
API filtracija pri BHST, cm ³ /30 min/70 bar	72
90° API slobodna voda pri BHST	0%
45° API slobodna voda pri BHST	0%
Tlačna čvrstoća nakon 24 sata, MPa (psi)	4,14 (600)
Tlačna čvrstoća nakon 36 sati, MPa (psi)	9,65 (1 400)
Plastična viskoznost pri BHCT, Pa·s (cP)	0,063 (63)
Naprezanje pri pokretanju pri BHCT, Pa (lb _f /100 ft ²)	13,89 (29)
*BHCT – temperatura na dnu Bušotine u cirkulaciji	
**BHST – temperatura na dnu bušotine u statičkim uvjetima	

U tablici 7-2. nalaze se vrijednosti smičnih naprezanja cementne kaše očitane na Fann viskozimetru pri temperaturi od 149 °C (300 °F) s obzirom na brzinu vrtnje boba viskozimetra.

Tablica 7-2. Očitavanja smičnog naprezanja na Fann viskozimetru (Rahman i Zulkafly, 2004)

Brzina rotacije, o/min	600	300	200	100	6	3
Smično naprezanje, Pa (lb _f /100 ft ²)	67,03 (140)	44,05 (92)	34,95 (73)	23,94 (50)	4,31 (9)	2,87 (6)

U tablici 7-3. Nalaze se vrijednosti čvrstoće gela pri temperaturi od 149 °C (300 °F) tijekom 10 sati. Za dobivanje ovih podataka korištena je sljedeća jednostavna procedura:

- 1) promiješati cementnu kašu prema API Spec 10B preporuci;
- 2) uliti cementnu kašu u ćeliju HP/HT konzistometra, postaviti temperaturu na BHCT i ostaviti ju u mirovanju 3 i pol sata;

- 3) premjestiti cementnu kašu iz konzistometra u Fann viskozimetar;
- 4) nakon standardnog ispitivanja reoloških svojstava, promijeniti broj okretaja na 600 o/min te miješati 60 sekundi;
- 5) nakon 60 sekundi miješanja, isključiti viskozimetar 10 sekundi;
- 6) ponovno uključiti viskozimetar, ali na 3 o/min te pratiti skalu za očitavanje na uređaju; očitavanje će se polako povećavati sve do trenutka kada će se naglo spustiti; najviša očitana vrijednost predstavlja čvrstoću gela cementne kaše;
- 7) ostaviti cementnu kašu da miruje 10 minuta i vratiti se na korak 4);
- 8) ponoviti mjerenja za 2, 4, 6 i 10 sati.

Tablica 7-3. Razvoj čvrstoće gela cementne kaše s vremenom (Rahman i Zulkafly, 2004)

Vrijeme	10 s	10 min	2 h	4 h	6 h	10 h
Čvrstoća gela, Pa	3,35	12,93	14,84	21,07	24,90	34,47
(lb _f /100 ft ²)	(7)	(27)	(31)	(44)	(52)	(75)

Vrijednosti čvrstoće gela u ovim vremenskim intervalima pokazuju da čvrstoća gela cementne kaše u statičkim uvjetima ostaje stabilna i niska te da se zadovoljava uvjet da vrijednosti čvrstoće gela ne prelaze 48 Pa (100 lb_f/100 ft²) tijekom vremena fluidnosti.

Gustoća cementne kaše iznosila je 1 797 kg/m³ (15 ppg) i to iz dva glavna razloga. Prvo, dizajn cementne kaše manje gustoće rezultat je računalne simulacije koja je pokazala da bi veće gustoće cementne kaše, a ujedno i veća vrijednost ekvivalentne gustoće cementne kaše u optoku (engl. *equivalent circulating density – ECD*), povećale gubljenje cementne kaše u okolne stijene tijekom njenog utiskivanja u izacijevni prstenasti prostor. Drugo, uzak prstenasti prostor iziskuje snažni i izdržljivi cementni oblog koji će spriječiti nastajanje pukotina i odvajanje cementnog kamena od stijenki cijevi i/ili kanala. Smanjenjem gustoće cementne kaše, povećava se duktilnost (žilavost) cementnog kamena koji može bolje izdržati sva naprezanja kojima je podvrgnut u bušotini kroz njen radni vijek. Istraživanja pokazuju da je, pod istim bušotinskim uvjetima naprezanja, cementnom kamenu, koji je nastao zgušćivanjem cementne kaše manje gustoće, potrebna manja vlačna čvrstoća za sprječavanje mehaničkog oštećenja nego li je to slučaj kod cementnog kamena koji je nastao zgušćivanjem cementne kaše veće gustoće. Tlačna čvrstoća cementnog kamena 24 sata nakon utiskivanja cementne kaše u izacijevni prstenasti prostor iznosila je 4,14 MPa (600 psi). Ta vrijednost niža je od uobičajene, no veća je od preporučene

vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 24 sata od 3,45 MPa (500 psi) za nastavak bušačkih operacija.

Za određivanje vremena zgušćivanja korištena je temperatura na dnu bušotine u optoku (BHCT), a ispitivanje je provedeno prema API standardu. Za određivanje svojstava cementne kaše tijekom vremena fluidnosti (vrijeme u kojem je cementna kaša fluidna i nalazi se u prstenastom prostoru za vrijeme proširivanja lajnera), korištena je temperatura na dnu bušotine u mirovanju (BHST). Motor konzistometra je zaustavljen i pokrenut je tek na kratko nakon 2, 4, 6 i 10 sati kako bi se očitala konzistencija cementne kaše u Bc pri temperaturi od 149 °C (300 °F). Ta mjerenja, čiji su rezultati prikazani u tablici 7-4., pokazuju da je kaša stabilna i u najgorem mogućem slučaju te da ostaje osobito stabilna, s niskim stupnjem geliranja, kroz cijelo vrijeme fluidnosti. Ovakva stabilnost postignuta je dodavanjem patentiranog višenamjenskog aditiva u kombinaciji s usporivačem na bazi organske kiseline.

Tablica 7-4. Konzistencija cementne kaše kroz vrijeme fluidnosti (Rahman i Zulkafly, 2004)

Vrijeme, h	2	4	6	10
Konzistencija, Bc	4	6	7	6

Kako bi se u obzir uzela i eventualna kontaminacija cementne kaše isplakom, provedena su ispitivanja na dvije cementne kaše: cementna kaša koja se koristi za ugradnju proširivog lajnera u ovom slučaju i konvencionalna cementna kaša bez specijalnih aditiva, ali sličnih svojstava. Gustoća ovih cementnih kaša je, dakle, 1 797 kg/m³ (15 ppg), a mjerenja su provedena na 149 °C (300 °F), što predstavlja statičku temperaturu na dnu bušotine (BHST). Kontaminirana cementna kaša sadrži od 15 do 25% isplake. U tablici 7-5. prikazani su rezultati mjerenja tlačne čvrstoće cementnog kamena nastalog očvršćivanjem čiste cementne kaše te cementne kaše zagađene sa 15% i 25% isplake nakon 36 sati (3 dana) očvršćivanja.

Tablica 7-5. Tlačne čvrstoće cementnog kamena (Rahman i Zulkafly, 2004)

CEMENTNA KAŠA	Tlačna čvrstoća cementnog kamena pri 149 °C (300 °F) nakon 36 sati očvršćivanja, MPa (psi)	
	Cementna kaša korištena za cementiranje proširivog lajnera	Konvencionalna cementna kaša sličnih svojstava bez specijalnih aditiva
Čista cementna kaša	9,65 (1 400)	8,27 (1 200)
Cementna kaša pomiješana sa 15% isplake	4,96 (720)	3,07 (445)
Cementna kaša pomiješana sa 25% isplake	4,41 (640)	1,65 (240)

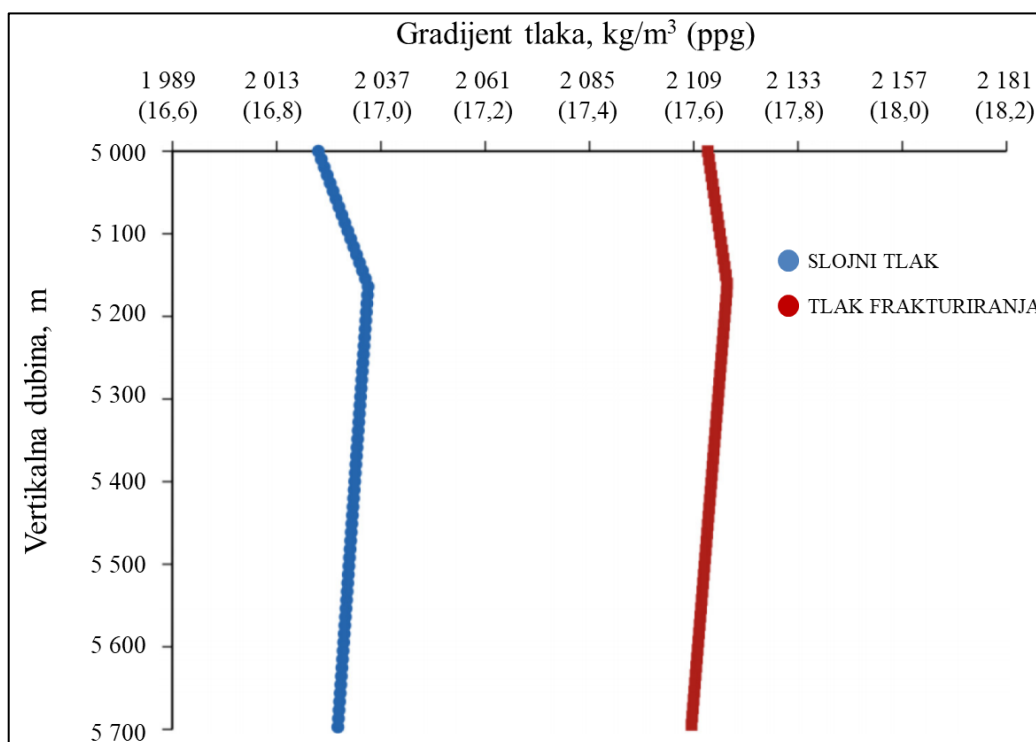
Na kraju, ispitana je stabilnost cementne kaše odnosno tendencija sedimentacije cementnih čestica iz cementne kaše uslijed djelovanja gravitacije i promjena gustoće duž stupca cementne kaše u statičkim uvjetima. Test je proveden u menzuri visine 203 mm, pod tlakom od 206,84 bar (3 000 psi) i na temperaturi od 130 °C (266 °F), odnosno BHCT. Test je trajao 16 sati. Zabilježeno je neznatno povećanje gustoće cementne kaše na dnu menzure. Visina sedimenta bila je 0 mm, odnosno sedimenta nije bilo, kao ni slobodne vode na površini što pokazuje da je cementna kaša bila izrazito stabilna u vremenu trajanja ovog testa.

7.2. UGRADNJA NAJDUBLJEG PROŠIRIVOG LAJNERA U BUŠOTINU EKSTREMNO VISOKOG TLAKA I TEMPERATURE U SREDOZEMNOM MORU U ODOBALJU EGIPTA

U nastavku se navode podaci o bušotini i njenoj izradi, ugradnji i cementaciji proširivog lajnera te svojstvima cementne kaše.

7.2.1. Podaci o bušotini

U razdoblju od 2012. do 2014. godine, u Sredozemnom moru kod Egipta, izbušena je bušotina s ekstremno visokim tlakom i temperaturom (eHP/HT) do dubine od oko 7 200 m. Tlak na dnu kanala bušotine iznosio je preko 1 380 bar (20 000 psi), a temperatura je dosegala vrijednosti od preko 205 °C (400 °F) (Bhasiora et al., 2015.). Izvorni dizajn bušotine sastojao se samo od klasičnih kolona zaštitnih cijevi i lajnera. Međutim, bušenjem do prve ciljane formacije, točnije oligocenskih naslaga, prvo je bilo potrebno probušiti rijetko bušene naslage seravala. Sigurnosna margina bušenja (engl. *drilling window*), odnosno razlika između gradijenata slojnog tlaka i tlaka frakturiranja, izražena u jedinicama gustoće isplake za ispiranje, u tom je intervala bila do 95 kg/m³ (0,8 ppg). Na slici 7-2. nalazi se dijagram koji prikazuje pretpostavljeno kretanje gradijenata slojnog tlaka i tlaka frakturiranja, odnosno prikazuje margine bušenja.

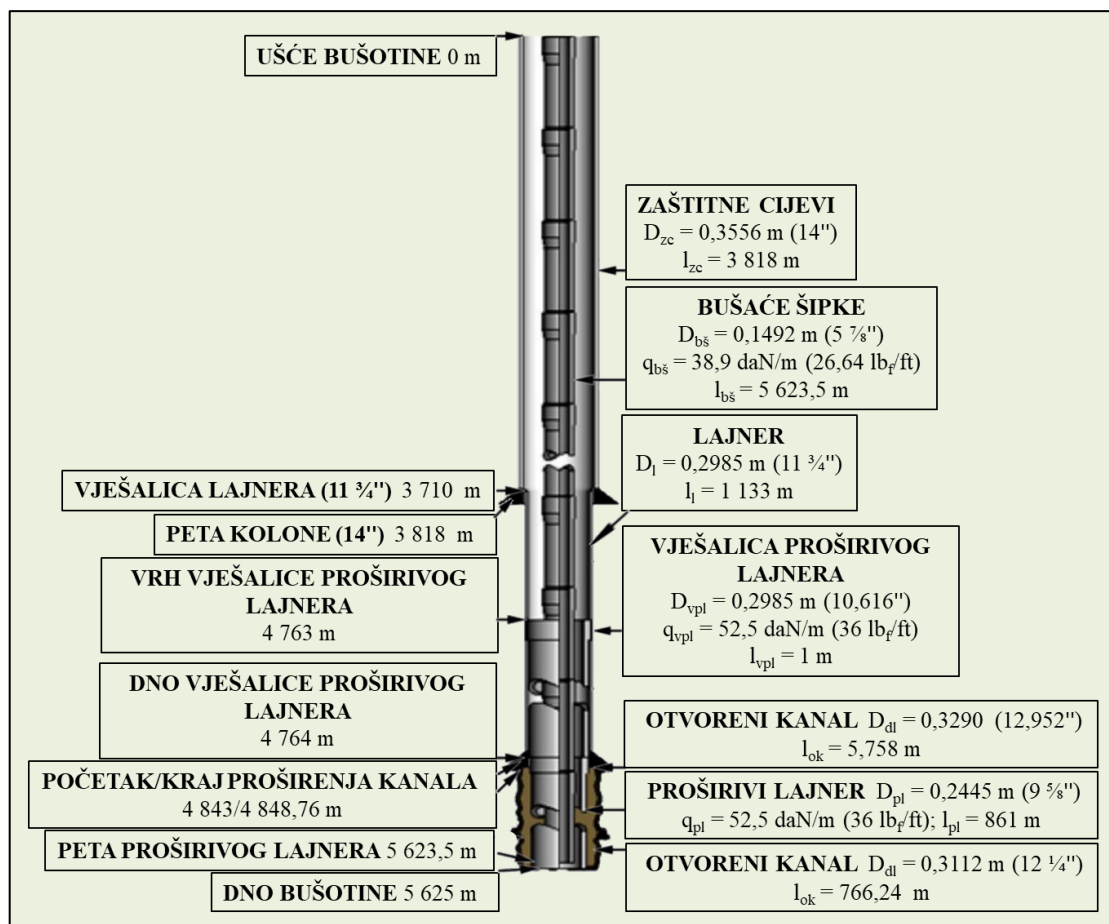


Slika 7-2. Pretpostavljeni odnos gradijenata slojnog tlaka i tlaka frakturiranja izraženih preko gustoće isplake (Bhaisora et al., 2015)

U takvim uvjetima moguće je jedino bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (engl. *managed pressure drilling – MPD*) te korištenje isplake niže gustoće od one potrebne za nadvladavanje slojnog tlaka u statičkim uvjetima (engl. *statically underbalanced mud weight*). Najveći rizici kod bušenja ovog intervala bili su nepoznat litološki sastav stijena,

nepoznati režimi tlakova, visoki slojni tlakovi te činjenica da je ovo prvi puta da se ove formacije na ovom području buše na toliko velikim dubinama. Iz ovih razloga odlučeno je da će se u izvorni dizajn bušotine dodati još jedna kolona i to proširivi lajner. Proširivi lajner promjera je 0,2445 m (9 5/8"), a vješa se u prethodnu kolonu, odnosno konvencionalni lajner, promjera 0,2985 m (11 3/4") te se ugrađuje u otvoreni kanal promjera 0,3112 m (12 1/4"). Na slici 7-3. prikazana je konstrukcija bušotine do vertikalne dubine od 5 625 m, odnosno do pete proširivog lajnera. Konduktor i uvodna kolona bušotine, kao i razzerski sustav, nisu prikazani. Konstrukcija bušotine ispod proširivog lajnera i do konačne dubine također nije prikazana. Ugradnjom proširivog lajnera izoliraju se ovi problematični slojevi u kojima, osim navedenog, postoji mogućnost prisustva plinskih zona, a ujedno se čuva promjer kanala bušotine, kako bi ona mogla doseći konačnu vertikalnu dubinu od 7 200 m.

Bušenje u uvjetima kontroliranog tlaka (MPD) je, osim spomenutih uskih margina bušenja, korišteno i zbog sprječavanja privremenog primanja naslaga (engl. *wellbore balloning*). Do te pojave dolazi kada zbog cirkulacije isplake dolazi do povećanog tlaka u bušotini dovoljnog da bi stijene primile fluid, ali nedovoljnog za frakturiranje stijene. Tada se na površini opaža gubljenje isplake. No, kada se cirkulacija fluida zaustavi, tlak u bušotini se smanjuje i stijene vraćaju privremeno primljenu isplaku natrag u bušotinu te se na površini opaža dotjecanje isplake (Wind Well Control, 2020). MPD sustav je također korišten za povećavanje tlaka na dno od 6,89 do 13,79 bar (od 100 do 200 psi) za vrijeme vađenja bušačeg niza iz bušotine (engl. *tripping*).



Slika 7-3. Konstrukcija bušotine (Bhaisora et al., 2015)

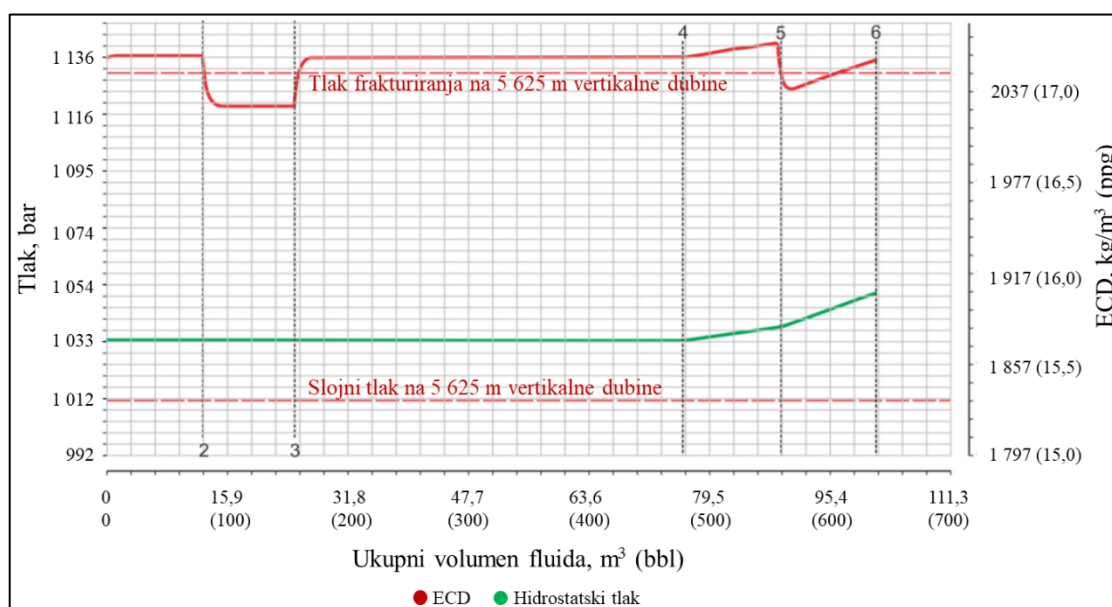
7.2.2. Ciljevi i izazovi ugradnje i cementacije proširivog lajnera

Glavni cilj ugradnje i cementiranja ovog proširivog lajnera je postići dobru cementnu vezu oko pete lajnera i osigurati podobnu petu u koju će se moći ugraditi sljedeći lajner. Osim pete, potrebna je izolacija i ostatka izacijevnog prstenastog prostora zbog postojanja plinskih zona u otvorenom kanalu. Njih treba izolirati kako ne bi došlo do dotoka plina. Najvažniji izazovi na koje je trebalo obratiti pozornost su:

a) Gubici tijekom cementacije

Prema hidrauličkoj simulaciji prikazanoj na slici 7-4. vidljivo je da je tlak koji je rezultat ekvivalentne gustoće cementne kaše u optoku (ECD – prikazan crvenom punom linijom) veći od predviđenog tlaka frakturiranja (prikazan isprekidanom gornjom crvenom linijom). Iz tog razloga strahovalo se od gubitaka cementne kaše u tom intervalu. Brojevi 2, 3, 4, 5 i 6 na slici odnose se na različite operacije te različite dobave i vrste fluida (razdjeljivač, ispirać, isplaka, cementna kaša) koji se utiskuju u bušotinu i zbog toga se

vrijednost ECD-a mijenja. Tijekom bušenja tog intervala došlo je do gubljenja isplake otprilike 100 metara ispod pete prethodne kolone, a gradijent frakturiranja, koji je utvrđen uz pomoć MPD sustava, bio je za 48 kg/m^3 (0,4 ppg) manji od isprva predviđenog. Dobavu cementne kaše nije moguće smanjiti (kako bi se smanjila ekvivalentna gustoća cementne kaše u optoku) zbog ograničenja proizvođača proširivog lajnera kao i zbog činjenice da gornji čep (engl. *latching dart*) mora odsjesti u zaustavnoj ploči prije proširenja. Razmatrano je dodavanje staklenih vlakana u cementnu kašu kako bi se smanjilo njeno gubljenje u okolne stijene.



Slika 7-4. Rezultati hidrauličke simulacije kretanja tlakova tijekom cementacije na dubini pete proširivog lajnera (Bhaisora et al., 2015)

b) Zaobilaženje cementne kaše zbog neadekvatne centralizacije i nemogućnosti kretanja i/ili rotiranja kolone

Rezultat konstrukcije bušotine u kojoj se koristi velik broj kolona zaštitnih cijevi jesu vrlo uski prstenasti prostori. Iz tog razloga, javila se zabrinutost da će cementna kaša zaobići isplaku u vrlo uskim dijelovima izacijevnog prstenastog prostora. Zbog jedinstvene prirode proširivih zaštitnih cijevi, keramički centralizeri jedina su vrsta centralizera koji bi se mogli koristiti na takvim cijevima. No, s obzirom da je ova konkretna ugradnja proširivog lajnera u biti rješenje za nepredviđenu situaciju, nije bilo vremena da bi se upotrijebili centralizeri. Rotacija i kretanje kolone gore-dolje također nisu bili mogući, što je dodatno povećalo mogućnost da cementna kaša zaobiđe isplaku u nekim dijelovima

izacijevnog prstenastog prostora koji nisu bili dovoljno kvalitetno od nje očišćeni. Ovaj problem uglavnom je riješen korištenjem rezultata računalne simulacije dinamike fluida (engl. *computational fluid dynamics – CFD*) koji su ukazali na potrebu za mijenjanjem gustoća fluida te na potrebu za korištenjem specijalne pete lajnera koja može primiti gumene kuglice (engl. *foam balls*). One se koriste za fizičko odvajanje različitih fluida koji se protiskuju u bušotinu kroz bušaće šipke i za sprječavanje njihovog miješanja i zagađenja prije nego što uđu u izacijevni prstenasti prostor.

c) Adekvatne performanse cementne kaše u HP/HT uvjetima

Kao posljedica vrlo dugog vremena potrebnog za proširenje lajnera, cementna kaša morala je imati određena svojstva koja su navedena u tablici 7-6. Ta svojstva ne uključuju samo dugo vrijeme zgušćivanja, već i dugo vrijeme u kojem kaša ne gelira te duže vrijeme prije početka razvoja čvrstoće cementnog kamena. Morali su se provesti razni testovi osjetljivosti kako bi dizajn cementne kaše bio u skladu sa svim bušotinskim uvjetima. Glavni izazov bio je dizajnirati cementnu kašu koja će ostati stabilna u zahtjevnim bušotinskim uvjetima. Statička temperatura na dnu bušotine (BHST) iznosila je 157 °C (315 °F), a tlak na dnu bušotine (BHP) dosezao je vrijednosti preko 1 100 bar (16 000 psi). Uz to, plinske zone u otvorenom kanalu zahtijevale su dobru zonalnu izolaciju uporabom cementne kaše izrazito dugog vremena bez geliranja i kratkog prijelaznog perioda. Za proširenje lajnera bilo je potrebno oko 9 sati, što je ukazivalo na potrebu za provedbom raznih testova osjetljivosti kako bi se smanjili rizici neadekvatnih performansi cementne kaše, budući da će cementna kaša u statičkim uvjetima biti podvrgnuta vrlo visokim temperaturama na duže vrijeme.

Tablica 7-6. Potrebna svojstva cementne kaše i kamena za cementiranje proširivog lajnera (Bhaisora et al., 2015)

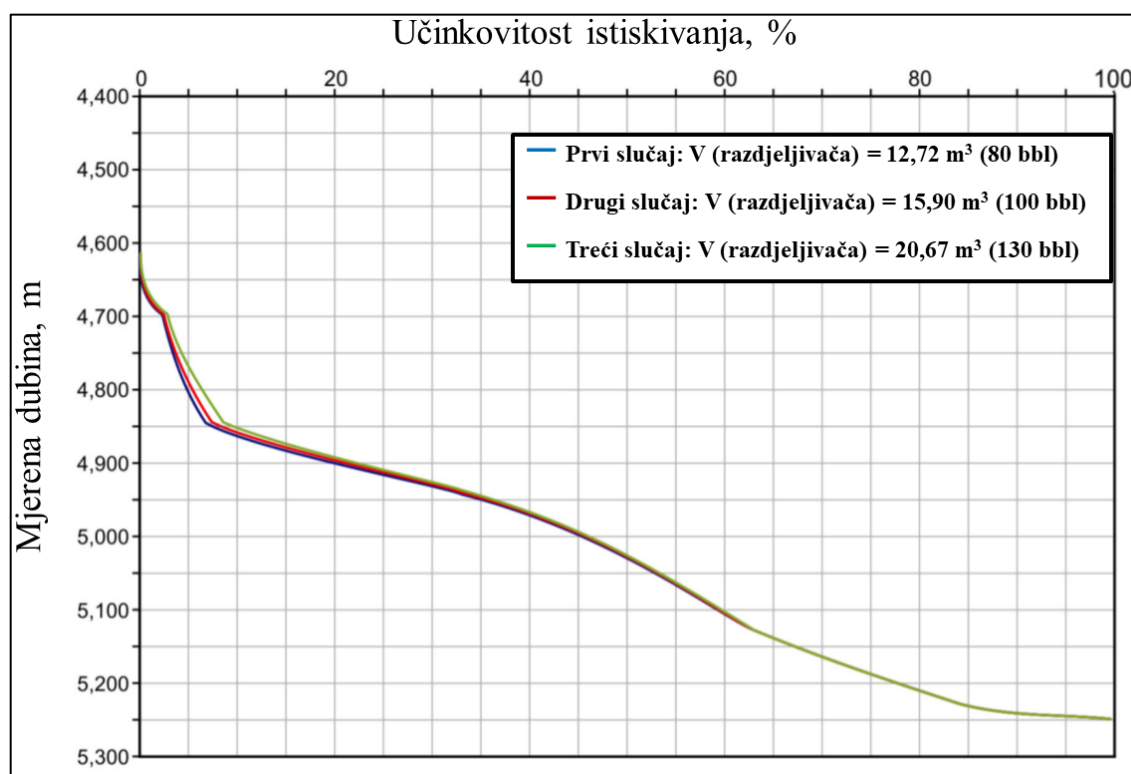
PARAMETAR	POTREBNA VRIJEDNOST
Vrijeme zgušćivanja	13 do 14 sati s obzirom na oko 9 sati potrebnih za proširenje lajnera
Slobodna voda	0%
Filtracija	Manja od 50 cm ³ /30 min/ 70 bar
Vrijeme razvoja početne čvrstoće cementnog kamena od 0,34 MPa (50 psi)	15 sati
Čvrstoća cementnog kamena za nastavak operacija	Najmanje 3,45 MPa (500 psi) za provedbu testa primanja
Vrijeme trajanja prijelaznog perioda	Manje od 45 minuta

7.2.3. Dizajn cementne kaše i razdjeljivača

Polazna točka dizajniranja cementne kaše i razdjeljivača bila je osigurati učinkovito istiskivanje isplake i popunjavanje prstenastog prostora cementnom kašom. Izračunato je potrebnih 12,08 m³ (76 bbl) cementne kaše kako bi se do određene razine popunio prstenasti prostor (80% volumena otvorenog kanala prema specifikaciji proizvođača lajnera). Budući da volumen cementne kaše nije moguće povećati zbog ograničenja proizvođača proširivog lajnera, poduzete su sljedeće mjere kako bi se umanjilo zagađenje cementne kaše:

- a) S obzirom da je volumen cementne kaše tek 16% volumena svih fluida koji će se utiskivati za vrijeme cementacije, zaključeno je da će bez nekakvog razdjeljivača biti nemoguće spriječiti zagađenje cementne kaše. Posljedica zagađene cementne kaše bit će loša kvaliteta cementacije oko pete lajnera kao i u cijelom otvorenom kanalu. CFD simulacijama utvrđeno je da će do zagađenja doći bez obzira na količinu korištenog razdjeljivača. Na slici 7-5. vidi se da, bez obzira na povećanje volumena razdjeljivača, učinkovitost istiskivanja ostaje gotovo ista i drastično

opada kada fluidi uđu u prstenasti prostor. Postoje dva rješenja za ovaj problem. Prvo rješenje je povećanje volumena cementne kaše, no, kao što je prije rečeno, to nije moguće. Drugo rješenje je korištenje mehaničkog razdjeljivača za smanjenje zagađenja cementne kaše tekućim razdjeljivačem kada su oni još uvijek u cijevima. Taj pristup je na kraju i usvojen te je kao mehanički razdjeljivač ispred cementne kaše (engl. *bottom plug*) korištena gumena kuglica. Kuglica je izrađena od prirodne gume i može bez oštećenja proći kroz suženja. Zaustavna ploča (engl. *float collar*) lajnara je dizajnirana tako da u nju može odsjesti gumena kuglica i oko nje prolaziti cementna kaša. Također, u ovom procesu korištena je posebna cementacijska glava kroz koju je u bušaću šipku moguće ubaciti gumenu kuglicu prije i gornji čep nakon utiskivanja cementne kaše. Kad gornji čep odsjedne u zaustavnoj ploči, iznad gumene kuglice, tlak na površini se povećava što je pokazatelj da je cementna kaša istisnuta iz bušaćih šipki.



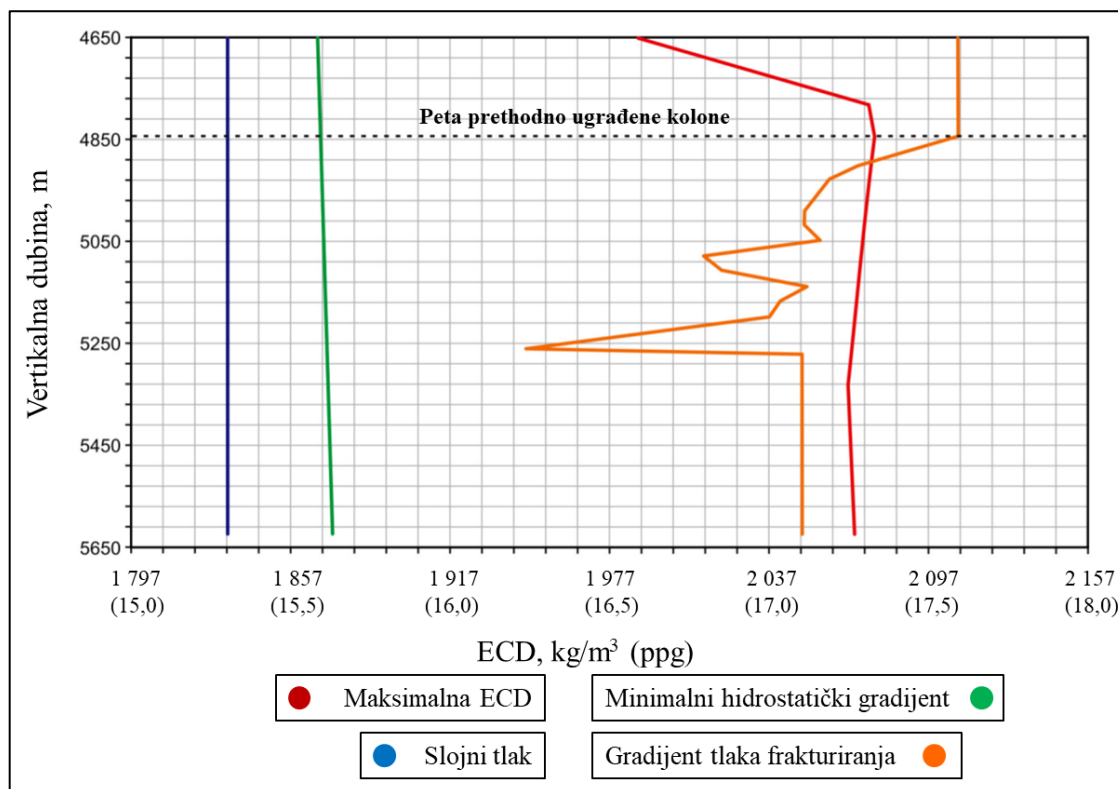
Slika 7-5. Utjecaj volumena razdjeljivača na učinkovitost istiskivanja (Bhaisora et al., 2015)

- b) Odlučeno je da će gustoća cementne kaše biti $2\,217\text{ kg/m}^3$ (18,5 ppg), budući da su rezultati CFD simulacija pokazali da su cementne kaše većih gustoća otpornije na zagađivanje. Tako da, bez obzira što je dovoljna gustoća cementne kaše bila 1 857

kg/m³ (15,5 ppg), a uobičajena gustoća za ovakvu operaciju bila bi 1 893 kg/m³ (15,8 ppg), korištena je cementna kaša gustoće 2 217 kg/m³ (18,5 ppg). Na taj način ostvarena je razlika u gustoći između isplake i cementne kaše od 360 kg/m³ (3 ppg). Simulacije su također ukazale na to da će ekvivalentna gustoća cementne kaše u optoku (ECD) biti za 24 kg/m³ (0,2 ppg) viša od gradijenta frakturiranja stijena, no svejedno je odlučeno da će se takva cementna kaša koristiti zbog povećanja učinkovitosti istiskivanja isplake i otpornosti na zagađivanje. Kako bi se osigurala cementna kaša homogenih svojstava, na površini je miješana u više manjih obroka (engl. *batch mixing cement*).

- c) Odabrani volumen korištenog razdjeljivača iznosi 12,72 m³ (80 bbl). Gustoća razdjeljivača iznosi 2 037 kg/m³ (17 ppg), što ga u hijerarhiji gustoća smješta između isplake i cementne kaše. U razdjeljivaču se koriste sufraktanti (PAT-i) i otapala dvojne topivosti (engl. *mutual solvents*). Kako bi se odabrao optimalni razdjeljivač, provedena su ispitivanja močivosti i kompatibilnosti.
- d) Podaci o gradijentu frakturiranja dobiveni su tzv. testovima curenja (engl. *seepage initiation tests*) tijekom bušenja. Testovi su provedeni uz pomoć MPD sustava povećavajući tlak na ušću (a tako ujedno i na dnu) tako dugo dok na Coriolisovom (masenom) protokomjeru nisu zabilježeni gubici isplake. Najveća izračunata ECD isplake kod pete lajnera promjera 0,2985 m (11 3/4") bila je ispod gradijenta frakturiranja, ali iznad tlaka potrebnog da bi se zabilježilo curenje isplake. Naslage pješčenjaka u ovom intervalu pokazuju tlačnu regresiju, pojavu kada plići slojevi imaju veći tlak od slojeva ispod njih. Zbog toga se i gradijent tlaka frakturiranja u tom intervalu smanjuje s dubinom, umjesto da se povećava. S obzirom da je za ugradnju proširivog lajnera potrebna dobava od 0,64 do 0,79 m³/min (od 4 do 5 bbl/min), simulacije su bile provedene s tim dobavama. Ukoliko bi došlo do gubitaka, ta se dobava ne bi mogla smanjiti zbog operativnih zahtjeva ugradnje proširivog lajnera. Najveća ECD isplake prešla je vrijednost gradijenta frakturiranja kada se probušio određeni broj metara ispod pete prethodno ugrađene kolone, iako je korištena isplaka imala gustoću od samo 1 857 kg/m³ (15,5 ppg) te su gubici bili očekivani tijekom cementacije. Slika 7-6. detaljno prikazuje profile tlakova u intervalu u koji se ugrađuje proširivi lajner za vrijeme cementacije. Kako bi se smanjili gubici, u razdjeljivač i u cementnu kašu dodana su staklena vlakna. Staklena vlakna su inertna i ne mijenjaju svojstva razdjeljivača i cementne kaše

ukoliko se koriste u manjim količinama. Stoga je u razdjeljivač i u cementnu kašu dodano 0,45 kg (1 lb) staklenih vlakana po 0,16 m³ (barelu) fluida.



Slika 7-6. Profili tlakova u intervalu u koji se ugrađuje proširivi lajner za vrijeme cementacije (Bhaisora et al., 2015)

7.2.4. Ispitivanje cementne kaše

Ispitivanje cementne kaše za cementaciju proširivog lajnera od kritične je važnosti, jer je potrebno istovremeno osigurati nekoliko važnih svojstava. U ovom slučaju, ispitivanje je bilo osobito zahtjevno zbog eHP/HT uvjeta. Ispitivanja su prevedena u sljedećih nekoliko koraka:

a) *Utvrđivanje temperature na dnu bušotine u optoku*

Utvrđivanje vrijednosti BHCT-a prvi je važni korak za reprezentativno ispitivanje cementne kaše u laboratoriju. Kod konvencionalnih cementacija, za utvrđivanje BHCT-a koriste se standardne API korelacije za BHST. Kada se dobije BHST, ta vrijednost postaje, zajedno s mjerenom i vertikalnom dubinom bušotine, varijabla za proračun BHCT-a. Međutim, pri cementaciji, na vrijednost BHCT-a utječu i toplina hidratacije, prijenos topline s formacije na cementnu kašu u dugim statičkim razdobljima i sl. Kako bi se i te

varijable uzele u obzir, koristi se napredni softver za modeliranje temperature. U ovom konkretnom slučaju, vrijednost BHCT-a dobivena pomoću tog softvera od 118 °C (245 °F) bila je niža od vrijednosti dobivene standardnim API korelacijama, koja je iznosila 128 °C (262 °F). Kako bi se u obzir uzeli najgori mogući uvjeti, daljnja ispitivanja provedena su korištenjem temperature na dnu u optoku od 128 °C uz ± 11 °C za pokrivanje razlike kod testova osjetljivosti. Statička temperatura na dnu bušotine (BHST) iznosi 157 °C (315 °F).

b) Ispitivanje vremena zgušćivanja

Vrijeme potrebno za miješanje cementne kaše iznosi otprilike jedan sat. Vrijeme potrebno za utiskivanje cementne kaše i protiskivanje isplake procijenjeno je na 117 minuta, s obzirom da je dobava 0,64 m³/min (4 bbl/min). Za uklanjanje cementacijske glave s ušća bušotine i početak proširivanja lajnera uzeto je 45 minuta statičkog perioda. Vrijeme proširivanja lajnera procijenjeno je na otprilike 9 sati, budući da se lajner proširuje brzinom nešto većom od 100 metara po satu. U konačnici, za potrebno vrijeme zgušćivanja određeno je otprilike 13 do 14 sati uz jedan dodatni sat za miješanje cementne kaše u obrocima na površini i faktor sigurnosti od još dva do tri sata. Detaljan proces utiskivanja fluida i širenja lajnera po koracima opisan je u tablici 7-7.

Kako bi se simulirali točni uvjeti i raspored procesa ugradnje i cementacije proširivog lajnera, vrijeme zgušćivanja je simulirano u laboratoriju na sljedeći način:

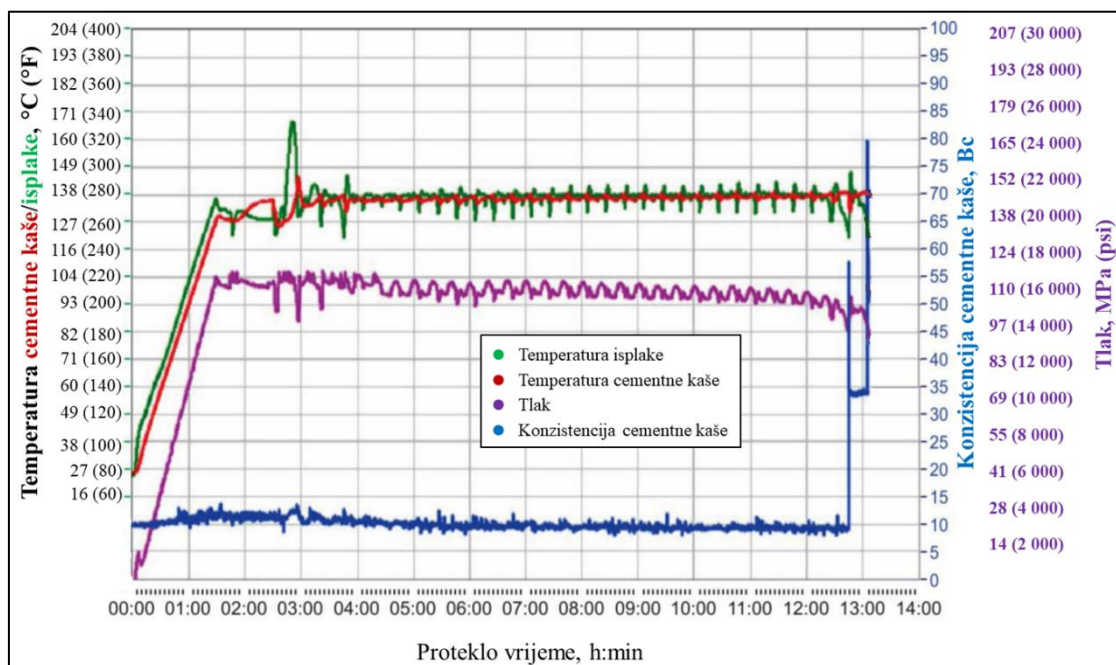
- 1) miješanje obroka cementne kaše na površinskim uvjetima tlaka i temperature na sat vremena;
- 2) u sljedećih 87 minuta tlak se povećava na vrijednost tlaka na dnu od 1 124 bar (16 300 psi), a temperatura na vrijednost temperature na dnu bušotine u optoku (BHCT) od 128 °C (262 °F);
- 3) miješanje cementne kaše pod BHP i BHCT uvjetima sljedećih 17 minuta;
- 4) isključivanje motora konzistometra na 45 minuta (simuliranje uklanjanja cementacijske glave i pripreme za proširenje lajnera);
- 5) početak testa s prekidima (engl. *hesitation test*): naizmjenično uključivanje (na 10 minuta) i isključivanje (na 15 minuta) motora konzistometra kroz sljedećih 100 minuta uz zadržavanje tlaka na BHP vrijednosti s postepenim povećavanjem temperature s BHCT na BHST brzinom od 0,48 °C/h (0,87 °F/h);
- 6) nastavak testa s prekidima: naizmjenično uključivanje (na 10 minuta) i isključivanje (na 10 minuta) motora konzistometra do kraja trajanja testa uz

zadržavanje tlaka na BHP vrijednosti i daljnjim povećavanjem temperature prema BHST vrijednosti brzinom od 0,48 °C/h (0,87 °F/h).

Tablica 7-7. Proces utiskivanja fluida i proširenja lajnera s navedenim karakteristikama pojedinih fluida i vremenom trajanja svakog koraka (Bhaisora et al., 2015)

OPIS RADNJE	GUSTOĆA FLUIDA kg/m ³ (ppg)	DOBAVA m ³ /min (bbl/min)	VOLUMEN m ³ (bbl)	TRAJANJE min
Utiskivanje isplake	1 857 (15,5)	0,79 (5)	0	0
Utiskivanje razdjeljivača i ubacivanje donjeg čepa (loptice od pjene)	2 037 (17,0)	0,79 (5)	12,72 (80)	16
Utiskivanje cementne kaše i ubacivanje gornjeg čepa	2 217 (18,5)	0,64 (4)	12,08 (76)	19
Utiskivanje isplake	1 857 (15,5)	0,79 (5)	63,59 (400)	80
Utiskivanje isplake	1 857 (15,5)	0,64 (4)	12,08 (76)	19
Uklanjanje cementacijske glave i priprema za proširenje lajnera				45
Proširenje lajnera (vertikalna dubina od 5 625 do 4 763 m)				515
Ukupni volumen/ ukupno vrijeme			100,48 (632)	694

Brzina povećavanja temperature od 0,48 °C/h (0,87 °F/h) za simuliranje uvjeta u vremenu zgušćivanja rezultat je činjenice da će se BHCT izjednačiti s BHST-om za 24 sata nakon završetka proširenja lajnera. Rezultati testa vremena zgušćivanja grafički su prikazani na slici 7-7.



Slika 7-7. Grafički prikaz testa vremena zgušćivanja s vrijednostima temperature, tlaka i konzistencije (Bhaisora et al., 2015)

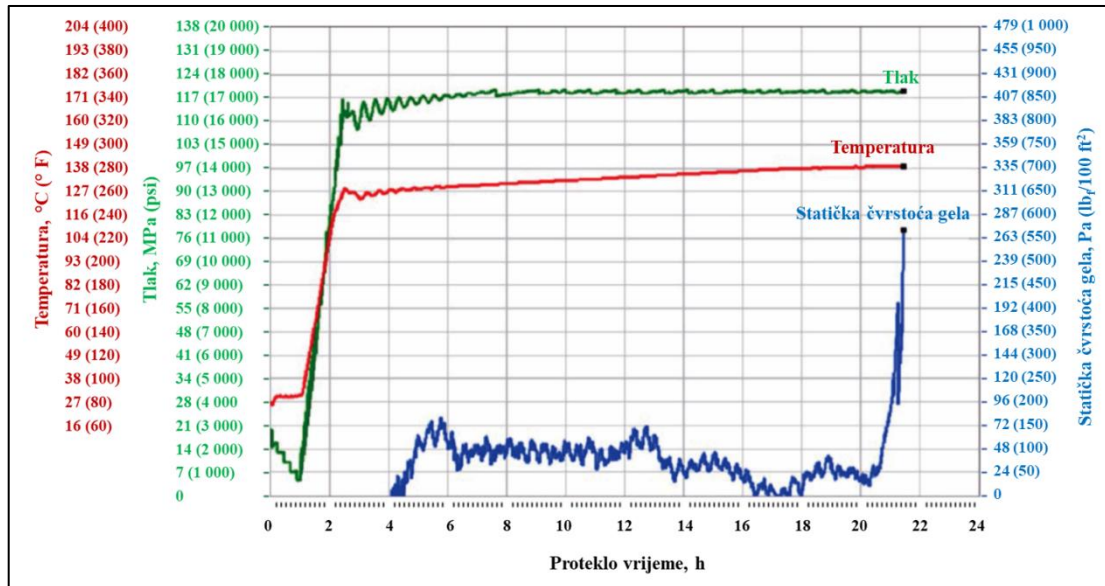
c) Ispitivanje statičke čvrstoće gela

Ispitivanje statičke čvrstoće gela također je bilo bitno iz razloga što cementna kaša mora posjedovati svojstva koja će onemogućiti migraciju plina tj. ne smije pokazivati tendencije geliranja na dugo vrijeme i mora imati kratki prijelazni period (manji od 45 minuta). Posebni viskotemperaturni aditiv protiv migracije plina korišten je za postizanje tih svojstava. Procedura za ispitivanje statičke čvrstoće gela slična je proceduri za ispitivanje vremena zgušćivanja i provodi se na sljedeći način:

- 1) miješanje obroka cementne kaše na površinskim uvjetima tlaka i temperature na sat vremena;
- 2) u sljedećih 87 minuta tlak se podiže s površinskog na BHP od 1 124 bar (16 300 psi), a temperatura se podiže na BHCT od 128 °C (262 °F);
- 3) miješanje cementne kaše pod BHP i BHCT uvjetima sljedećih 17 minuta;

- 4) očitavanje vrijednosti statičke čvrstoće gela, držanje vrijednosti tlaka na BHP, postepeno podizanje BHCT na BHST brzinom od 0,48 °C/h (0,87 °F/h) do postizanja konačne temperature od 157 °C (315 °F), tj. do postizanja BHST uz konstantno očitavanje i bilježenje statičke čvrstoće gela.

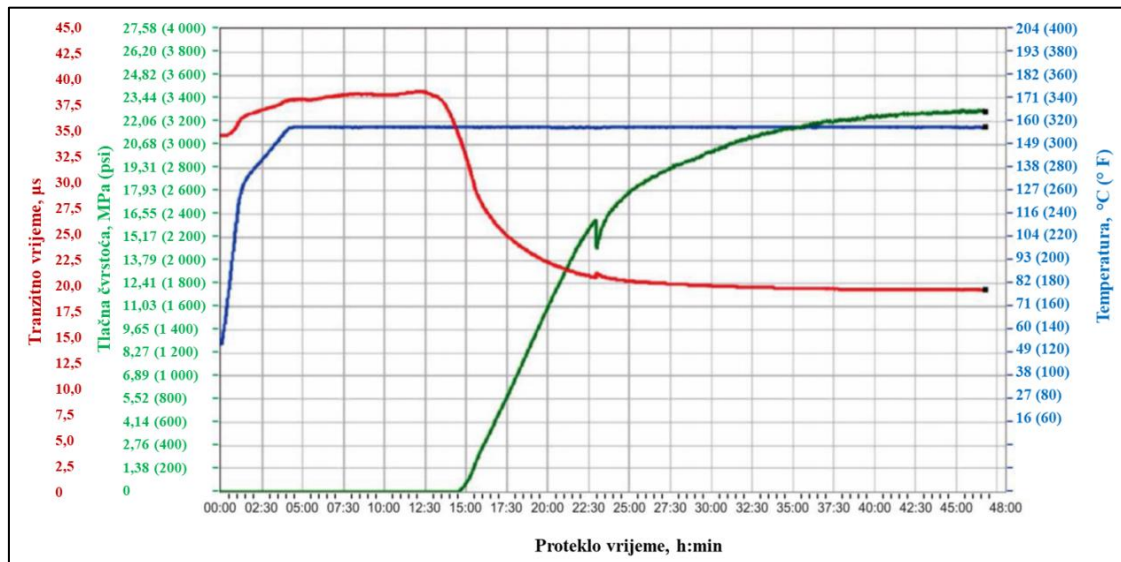
Vrijednost statičke čvrstoće gela od 48 Pa (100 lb_f/100 ft²) postignuta je 20 sati i 44 minuta od početka testa, a vrijednost statičke čvrstoće gela od 240 Pa (500 lb_f/100 ft²) zabilježena je 21 sat i 26 minuta nakon početka testa. Shodno tome, vrijeme u kojem cementna kaša ne gelira (engl. *zero gel time*) iznosi 18 sati, a prijelazni period trajanja je 42 minute. Prijelazni period je, dakle, vrijeme u kojem se naglo počinje razvijati statička čvrstoća gela. Bitno je da taj period bude što kraći, jer se zgušćivanjem cementne kaše smanjuje hidrostatski tlak na dno bušotine te postoji opasnost od pritjecanja fluida. Iz tog je razloga bitno da se cementna kaša što prije počne pretvarati u cementni kamen, kako bi se spriječila migracija slojnih fluida. Slika 7-8. grafički prikazuje razvoj čvrstoće gela. Zapravo je impresivno što cementna kaša posjeduje svojstvo toliko dugog vremena bez razvoja gela (u ovom slučaju to je 18 sati, dok je uobičajeno vrijeme od 6 do 8 sati) te toliko naglo, gotovo vertikalno (na grafu) poprima čvrstoću.



Slika 7-8. Razvoj čvrstoće gela cementne kaše s obzirom na vrijeme, tlak i temperaturu (Bhaisora et al., 2015)

d) Ispitivanje tlačne čvrstoće

Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog kamena provedeno je po standardnoj API proceduri korištenjem ultrazvučnog analizatora (engl. *ultrasonic cement analyzer – UCA*). U cementnu kašu dodan je aditiv za razvoj rane tlačne čvrstoće kako bi se ubrzao proces stvaranja početne tlačne čvrstoće u svrhu postizanja dovoljne vrijednosti tlačne čvrstoće 24 sata nakon cementacije proširivog lajnera da bi se moglo nastaviti s bušačim operacijama. Početna tlačna čvrstoća cementnog kamena od 0,34 MPa (50 psi) postignuta je za 14 sati i 53 minute, a nakon 24 sata postignuta je tlačna čvrstoća cementnog kamena od 16,84 MPa (2 442 psi). Nakon 36 sati vrijednost tlačne čvrstoće bila je 21,89 MPa (3 175 psi). Dijagram razvoja tlačne čvrstoće cementnog kamena prikazan je na slici 7-9.



Slika 7-9. Dijagram razvoja tlačne čvrstoće cementnog kamena dobiven pomoću ultrazvučnog analizatora (Bhaisora et al., 2015)

Ultrazvučni analizator cementnog kamena funkcionira tako da mjeri vrijeme putovanja ultrazvučnog signala kroz uzorak cementne kaše, a kasnije cementnog kamena. Takvo mjerenje spada u nedestruktivno mjerenje tlačne čvrstoće cementnog kamena, a može se obaviti u uvjetima visokog tlaka i temperature, ovisno o modelu analizatora. Vrijeme putovanja ultrazvučnog signala još se naziva tranzitno vrijeme (engl. *transit time*) i mjeri se u mikrosekundama (μs) (Cement Test Equipment, 2020). Odnos crvene linije (tranzitnog vremena) i zelene linije (tlačne čvrstoće) na slici 7-9. pokazuje da zvučnom signalu treba manje vremena da prođe kroz zgusnutu cementnu kašu/cementni kamen nego kroz fluidnu cementnu kašu.

e) Ispitivanje kompatibilnosti fluida

Ispitivanja kompatibilnosti između cementne kaše i isplake, isplake i razdjeljivača te razdjeljivača i cementne kaše provedena su kako bi se potvrdilo da neće doći do prevelikog geliranja ili taloženja u slučaju direktnog kontakta ovih fluida. Testovi su provedeni s raznim volumnim udjelima pojedinih fluida, i to u omjerima 75:25, 50:50 i 25:75. Tablica 7-8. prikazuje rezultate ispitivanja kompatibilnosti fluida.

Ispitivanje kompatibilnosti provedeno je pri temperaturama 27°C i 90 °C. Iz rezultata se vidi da se čvrstoća gela cementne kaše (i 10-s i 10-min) povećava kada je ona zagađena isplakom ili razdjeljivačem. Primjerice, kod temperature od 27 °C, čista cementna kaša ima vrijednost 10-s gela od 3,35 Pa. Ta se vrijednost povećava na 9,58 Pa kada se cementna kaša zagađi s 25% isplake. Kada se cementna kaša zagađi s još više isplake (50% i 75%), vrijednost 10-s gela se smanjuje (na 7,18 Pa kod 50% zagađenja i na 5,75 Pa kod 75% zagađenja), no još uvijek su te vrijednosti više od vrijednosti kod čiste cementne kaše. To se događa jer mješavina, sa sve većim udjelom isplake, počinje poprimati svojstva sličnija čistoj isplaci, čija je čvrstoća 10-s gela također 3,35 Pa. Isti trend prati i vrijednost 10-minutnog gela, a isto se događa i s vrijednostima naprezanja pri pokretanju. Viskoznost se smanjuje s povećanjem udjela isplake u cementnoj kaši.

Kod temperature od 90 °C, situacija je nešto drugačija. Čvrstoće gela (i 10-s i 10-min) također se povećavaju s udjelom isplake u cementnoj kaši, no povećavaju se kako se povećava i postotak udjela isplake u cementnoj kaši. Tako se čvrstoće gela najviše povećaju kod zagađenja cementne kaše s 75% isplake. S obzirom da je jedina razlika, u odnosu na prijašnji slučaj, temperatura, očito je da temperatura igra važnu ulogu u ponašanju zagađene cementne kaše. Poznato je da povećanje temperature pospješuje geliranje i zgušćivanje cementne kaše. Na isti način ponašaju se i vrijednosti naprezanja pri pokretanju, dok viskoznost i dalje pada s povećanjem udjela isplake u cementnoj kaši.

U slučaju zagađenja cementne kaše s razdjeljivačem, situacija je slična kao i kod zagađenja isplakom, no trendovi nisu toliko jednostavni za interpretaciju. Primjerice, kod temperature od 90 °C, najizraženija povećanja vrijednosti čvrstoća gela (i 10-s i 10-min) i naprezanja pri pokretanju zabilježena su kod mješavine 50:50, no kod temperature od 27 °C razlikuje se trend kod 10-s i 10-min gela. Slična naprezanja kod zagađenja isplakom prate iste trendove kao i čvrstoće gela i naprezanja pri pokretanju, no kod razdjeljivača to nije uvijek tako. Viskoznost u svim slučajevima opada s povećanjem udjela zagađivača.

Tablica 7-8. Rezultati ispitivanja kompatibilnosti fluida (Bhaisora et al., 2015)

Mješavina	Temperatura (°C)	Sastav mješavine	Očitavanja s Fann viskozimetra (Pa)						Plastična viskoznost (Pa-s)	Naprezanje pri pokretanju (Pa)	Čvrtoća gela (Pa)	
			600 o/min	300 o/min	200 o/min	100 o/min	6 o/min	3 o/min			Nakon 10 sekundi	Nakon 10 minuta
CEMENTNA KAŠA + ISPLAKA	27	Čista cementna kaša	103,42	73,74	40,70	3,83	2,39	0,197	10,05	3,35	7,18	
		Čista isplaka	87,14	50,27	35,43	20,11	2,87	1,92	0,095	5,27	3,35	
		75% cementne kaše + 25% isplake	110,12	90,97	55,06	6,70	4,31	0,173	29,21	9,58	31,12	
	90	50% cementne kaše + 50% isplake	77,57	57,46	35,43	5,27	3,83	0,132	15,32	7,18	21,55	
		25% cementne kaše + 75% isplake	67,03	50,27	29,69	4,79	3,83	0,117	11,97	5,75	14,36	
		Čista cementna kaša	66,07	45,49	24,90	2,87	2,39	0,129	4,79	2,87	5,75	
CEMENTNA KAŠA + RAZDJEJLIVAČ	27	Čista isplaka	53,63	33,99	23,46	13,89	4,31	2,87	0,063	4,31	5,27	
		75% cementne kaše + 25% isplake	60,33	43,09	24,42	2,39	1,44	0,113	6,70	2,87	4,79	
		50% cementne kaše + 50% isplake	62,24	47,88	27,77	2,87	1,92	0,108	11,01	3,35	5,75	
	90	25% cementne kaše + 75% isplake	59,85	45,97	30,16	4,31	2,87	0,093	16,28	4,79	10,53	
		Čista cementna kaša	103,42	73,74	40,70	3,83	2,39	0,197	10,05	3,35	7,18	
		Čisti razdjeljivač	66,55	41,18	30,64	21,07	6,22	4,79	0,063	11,97	6,70	
ISPLAKA + RAZDJEJLIVAČ	27	75% cementne kaše + 25% razdjeljivača	90,97	66,55	38,30	3,83	2,87	0,165	12,93	9,58	28,25	
		50% cementne kaše + 50% razdjeljivača	68,95	49,80	29,69	4,31	2,87	0,123	10,53	7,18	21,55	
		25% cementne kaše + 75% razdjeljivača	54,58	40,70	24,90	5,27	4,31	0,093	10,53	8,14	14,36	
	90	Čista cementna kaša	66,07	45,49	24,90	2,87	2,39	0,129	4,79	2,87	5,75	
		Čisti razdjeljivač	40,70	27,29	22,02	16,28	6,70	5,75	0,035	11,49	7,66	
		75% cementne kaše + 25% razdjeljivača	53,63	38,30	21,07	2,87	1,92	0,102	5,27	3,83	6,70	
ISPLAKA + RAZDJEJLIVAČ	27	50% cementne kaše + 50% razdjeljivača	54,58	38,30	23,46	4,79	3,83	0,098	8,62	5,27	10,53	
		25% cementne kaše + 75% razdjeljivača	52,67	40,22	21,55	3,35	2,39	0,098	6,22	3,83	5,75	
		Čista isplaka	87,14	50,27	35,43	20,11	2,87	1,92	0,095	5,27	3,35	
	90	Čisti razdjeljivač	66,55	41,18	30,64	21,07	6,22	4,79	0,063	11,97	6,70	
		75% isplake + 25% razdjeljivača	84,27	46,92	34,47	20,11	3,35	2,39	0,084	7,18	4,31	
		50% isplake + 50% razdjeljivača	72,78	42,61	31,60	19,15	3,83	2,87	0,074	8,14	4,79	
90	25% isplake + 75% razdjeljivača	67,51	40,22	29,69	18,67	4,79	3,83	0,068	8,62	5,27		
	Čista isplaka	53,63	33,99	23,46	13,89	4,31	2,87	0,063	4,31	5,27		
	Čisti razdjeljivač	40,70	27,29	22,02	16,28	6,70	5,75	0,035	11,49	7,66		
90	75% isplake + 25% razdjeljivača	44,05	26,33	20,59	9,58	3,83	2,87	0,053	1,44	3,83		
	50% isplake + 50% razdjeljivača	35,43	23,46	17,24	10,53	2,87	2,39	0,041	4,31	3,83		
	25% isplake + 75% razdjeljivača	37,83	23,94	18,19	11,49	3,83	2,87	0,039	5,75	4,31		

f) Kratak pregled rezultata laboratorijskih ispitivanja cementne kaše

U tablici 7-9. prikazane su potrebne vrijednosti svojstava cementne kaše za izvođenje cementacije proširivog lajnera, potrebni testovi i postignuti rezultati provedenih laboratorijskih ispitivanja (testova). Na temelju rezultata ispitivanja može se zaključiti da su svojstva cementne kaše i cementnog kamena unutar granica koje zahtjeva projekt i da se cementna kaša može primijeniti na terenu.

Tablica 7-9. Rezultati ispitivanja cementne kaše primijenjene za cementaciju proširivog lajnera (Bhaisora et al., 2015)

SVOJSTVO	POTREBNA VRIJEDNOST	TEST	REZULTAT TESTA
Cementna kaša			
Vrijeme zgušćivanja	13 do 14 sati	Ispitivanje vremena zgušćivanja	13 sati i 5 minuta uz jedan sat za miješanje cementne kaše
Slobodna voda	0%	Ispitivanje slobodne vode	0%
Filtracija	do 50 cm ³ /30 min/70 bar	Ispitivanje filtracije	32 cm ³ /30 min/70 bar
Trajanje prijelaznog perioda	Kraće od 45 min	Ispitivanje statičke čvrstoće gela	42 minute
Cementni kamen			
Vrijeme razvoja početne čvrstoće od 0,34 MPa (50 psi)	15 sati	Ispitivanje razvoja čvrstoće UCA uređajem	14 sati i 53 minute
Konačna čvrstoća	Najmanje 3,45 MPa (500 psi)	Ispitivanje razvoja čvrstoće UCA uređajem	3,45 MPa (500 psi) nakon 16 sati i 25 minuta te 16,84 MPa (2 442 psi) nakon 24 sata

7.2.5. Provedba ugradnje, proširivanja i cementacije lajnera

Cementna kaša uspješno je utisnuta u izacijevni prstenasti prostor. Nije bilo gubitaka cementne kaše u sloj što znači da je tlak frakturiranja formacija bio nešto viši nego što se pretpostavilo. Proširivi lajner je proširen bez poteškoća što dodatno potvrđuje da su rezultati laboratorijskih ispitivanja cementne kaše bili pouzdani te da se cementna kaša u bušotini ponašala jednako dobro kao i u laboratoriju. Za uklanjanje cementacijske glave i pripremu lajnera za proširenje utrošeno je manje vremena nego je bilo planirano (30 umjesto 45 minuta). Za proširenje lajnera bilo je potrebno 420 minuta umjesto planiranih 515 minuta. Nakon ugradnje, proširenja i cementacije lajnera, uspješno je probušena peta lajnera te je proveden test primanja naslaga (LOT). Test je pokazao dobar integritet bušotine te da je nastavak bušenja moguć bez popravnih operacija.

7.3. USPOREDBA PODATAKA IZ PRETHODNO PRIKAZANIH PRIMJERA

Za usporedbu dvaju prethodno prikazanih primjera najbolje će poslužiti tablični prikaz. U tablici 7-10. nalaze se osnovni podaci o bušotini, lajneru i cementnoj kaši za oba slučaja. Prema podacima u tablici, očito je da je ugradnja proširivog lajnera u slučaju iz Egipta bila daleko zahtjevnija.

Tablica 7-10. Usporedba karakteristika bušotina, lajnera i fluida za cementaciju proširivih lajnera u Maleziji i Egiptu (Rahman i Zulkafly, 2004; Bhaisora et al., 2015)

KARAKTERISTIKE BUŠOTINE, LAJNERA I FLUIDA	PRIMJER IZ MALEZIJE	PRIMJER IZ EGIPTA
Konačna dubina bušotine	2 975 m	7 200 m
Dubina vješalice ugrađenog proširivog lajnera	2 035 m	4 763 m
Dubina pete ugrađenog proširivog lajnera	2 527 m	5 625 m
Duljina ugrađenog proširivog lajnera	492 m	861 m
Početni promjer proširivog lajnera	0,1937 m (7 5/8")	0,2445 m (9 5/8")
Vrijeme proširenja lajnera (brzina proširenja lajnera)	220 min (2,24 m/min)	420 min (2,05 m/min)
Promjer prethodno ugrađene kolone	0,2445 m (9 5/8")	0,2985 m (11 3/4")
Promjer otvorenog kanala	0,2159 m (8 1/2")	0,3112 m (12 1/4")
Proširenje otvorenog kanala	Proširen na 0,254 m (10")	Mjestimično proširen na 0,3290 m (12,952")
Temperatura u optoku na dnu bušotine (BHCT)	130 °C	128 °C
Statička temperatura na dnu bušotine (BHST)	149 °C	157 °C
Tlak na dnu bušotine (BHP)	470 bar	1 124 bar
Metoda miješanja cementne kaše	Miješanje manjih obroka	Miješanje manjih obroka
Gustoća cementne kaše	1 797 kg/m ³	2 217 kg/m ³
Volumen cementne kaše iskorišten za cementaciju	5,25 m ³ (33 bbl)	12,08 m ³ (76 bbl)
Vrijeme zgušćivanja	13 sati i 45 minuta	14 sati i 5 minuta
Tip isplake	Uljna isplaka	Uljna isplaka
Korištenje centralizera	Ne	Ne
Kretanje/rotacija kolone	Ne	Ne

Kao prvo, bitno se razlikuju dubina ugradnje i duljina lajnera. U bušotini iz Malezije proširivi lajner je ugrađen na vertikalnoj dubini od 2 035 do 2 527 m (492 m lajnera), u slučaju iz Egipta, lajner je ugrađen na vertikalnoj dubini od 4 763 do 5 625 m (861 m lajnera). U drugom slučaju, lajner je gotovo dvostruko veće duljine (861 m naprema 492 m) što se odražava i na puno veći volumen cementne kaše (12,08 m³ naprema 5,25 m³).

Kao drugo, bušotinski uvjeti puno su zahtjevniji u slučaju iz Egipta. Temperature su sličnih vrijednosti, no tlak u bušotini u Egiptu više je nego dvostruko veći (1 124 bar naprema 470 bar). Zbog veće dubine ugradnje, u Egiptu je korištena isplaka gustoće 2 217 kg/m³, dok je u Maleziji korištena isplaka gustoće 1 797 kg/m³. U oba slučaja korištena je uljna isplaka, a cementna kaša je pripremljena i homogenizirana metodom miješanja manjih obroka cementne kaše. U oba slučaja nije bilo moguće korištenje centralizera niti kretanje/rotacija kolone. Potrebno vrijeme zgušćivanja vrlo je slično te je u slučaju iz Malezije tek 20 minuta dulje.

Oba autora ovih dviju studija slučaja naglašavaju važnost laboratorijskih ispitivanja. Ona bi trebala što bolje odražavati stvarne bušotinske uvjete, ali i simulirati vremenski slijed i sve uvjete u kojima će se u stvarnosti cementna kaša naći te njihovo trajanje. Rahman i Zulkafly (2004.) navode da je u slučaju cementiranja proširivih lajnera, kada god je to moguće, važno pridržavanje svih preporuka, saznanja i dobre prakse stečenih cementacijom klasičnih zaštitnih cijevi. Bhaisora sa suradnicima (2015.) navodi još nekoliko sljedećih preporuka za cementiranje proširivih lajnera do kojih su došli na temelju iskustva cementiranja proširivog lajnera u odobalju Egipta (Bhaisora et al., 2015):

- proračun temperature na dnu bušotine u optoku (BHCT) za korištenje u testovima cementne kaše trebalo bi obaviti korištenjem naprednih softvera za modeliranje temperature, a ukoliko dođe do razlike u vrijednosti BHCT-a dobivenog na taj način i one dobivene standardnom API metodom, poželjno je napraviti testove osjetljivosti;
- laboratorijska ispitivanja potrebno je raditi prema stvarnom vremenskom slijedu operacija na terenu;
- testovi statičke čvrstoće gela trebaju potvrditi dugo razdoblje kada cementna kaša ne gelira (engl. *long zero gel time*), a prijelazni period mora biti kraći od 45 minuta kada se koristi cementna kaša s aditivom protiv migracije plina;

- preporučljivo je korištenje mehaničkih razdjeljivača prilikom utiskivanja cementne kaše, npr. gumene kuglice;
- preporučljivo je korištenje i rezultata računalne simulacije dinamike fluida, i konvencionalnih hidrauličkih modela;
- preporučljivo je povećati razliku u gustoći između isplake i cementne kaše;
- ukoliko je to moguće, preporučljivo je korištenje keramičkih centralizera kako bi se postigla centričnost lajnera i smanjilo braždenje kaše kroz isplaku.

8. ZAKLJUČAK

Proširive zaštitne cijevi u naftnoj se industriji koriste tek posljednjih dvadesetak godina, no u tom kratkom razdoblju već su se, uz svoje brojne prednosti pred klasičnim zaštitnim cijevima, pokazale kao odlično rješenje u mnogim situacijama. Međutim, sve prednosti ovih cijevi ne vrijede mnogo ukoliko se one u bušotinu ne zacementiraju na adekvatan način. Postupak cementiranja do neke je mjere sličan cementiranju klasičnih kolona zaštitnih cijevi, odnosno lajnera, no razlika ima, a one se prvenstveno očituju kod dizajna same cementne kaše.

Kod dizajna cementne kaše za cementaciju proširivih zaštitnih cijevi, najveći je izazov pripremiti stabilnu cementnu kašu izrazito dugog vremena zgušćivanja s vrlo kratkim prijelaznim periodom i brzim razvojem početne tlačne čvrstoće zbog smanjivanja hidrostatičkog tlaka na dno uslijed zgušćivanja i opasnosti od pritjecanja fluida. Za razliku od cementacije klasičnih kolona zaštitnih cijevi kod koje cementna kaša mora ostati u tekućem stanju za vrijeme protiskivanja i brzo početi stvarati tlačnu čvrstoću u prstenastom prostoru, kod cementacije proširivih zaštitnih cijevi, cementna kaša mora ostati fluidna i kada se nalazi u prstenastom prostoru, jer je cijev još potrebno proširiti. Postupak dodatno otežava i činjenica da se cementna kaša ne može protiskivati velikom dobavom zbog opasnosti od prelijevanja cementne kaše iz prstenastog prostora u proširivi lajner te iz tog razloga, vrijeme zgušćivanja mora biti još duže. Izazov predstavlja i činjenica da se najčešće kod ugradnje proširivih zaštitnih cijevi ne mogu koristiti centralizeri niti se kolona može kretati i/ili rotirati. Zajedno s uskim prstenastim prostorima koji se javljaju kod ugradnje ovih cijevi, to predstavlja velike probleme u pogledu čišćenja bušotine od isplake kako bi nju mogla potpuno zamijeniti cementna kaša, a kako se obično koristi manji volumen cementne kaše, ona je podložnija zagađenju isplakom ili razdjeljivačem.

Ovi se problemi rješavaju korištenjem usporivača, aditiva za brzi razvoj čvrstoće te aditiva protiv migracije plina. Centriranje kolone može se postići korištenjem keramičkih centralizera, a kada to nije moguće, bitno je dobro dizajnirati reološka svojstva fluida. Za rješavanje problema s kontaminacijom cementne kaše i za povećanje efikasnosti čišćenja bušotine, koriste se kondicionirana isplaka, razdjeljivači i kemijski ispirajući koji su dizajnirani tako da su njihova svojstva (gustoća, plastična viskoznost i naprezanje pri pokretanju) u određenom hijerarhijskom odnosu. Osim toga, moguće je dodatno koristiti i mehanički razdjeljivač poput gumene loptice.

S obzirom da se proširive zaštitne cijevi često ugrađuju u zahtjevnim bušotinskim uvjetima, postojana svojstva cementne kaše vrlo su bitna. Stoga poseban naglasak treba staviti na njeno reprezentativno ispitivanje te testovima simulirati točan vremenski slijed operacija koje će se na terenu i zbivati uz korištenje pouzdanih podataka dobivenih naprednim softverima za modeliranje kao i karotažnim mjerenjima. Dobra alternativa klasičnoj pripremi cementne kaše jest korištenje prethodno pripremljene cementne kaše koja daje mnoge pogodnosti.

Nema razloga zbog kojeg bi naftna industrija u skoroj budućnosti izgubila interes za korištenjem proširivih zaštitnih cijevi. Ova tehnologija pruža velike mogućnosti u pogledu dosezanja ležišta koja prije nisu mogla biti dosegnuta, spašavanja bušotina, poboljšavanja značajki starijih ležišta, a sve to uz novčanu i vremensku uštedu. Ova će tehnologija zasigurno nastaviti svoj razvoj i njena će se primjena i dalje povećavati, no upravo iz tog razloga bilo bi potrebno posvetiti još više pozornosti daljnjim istraživanjima i unaprjeđenjima te dijeljenju informacija u obliku članaka, kojih na ovu temu nema puno, u svrhu boljeg razumijevanja procesa cementacije proširivih zaštitnih cijevi.

9. LITERATURA

1. AISSA, E.B., BENABDELHAFID, L., 2017. *Resolving Trias issue in Nezla Field (Algeria) Using the Expandable casing (ABL), Case Study NZ-23*, Dissertation: Professional Master, Faculty of Hydrocarbons, Renewable energies, and Earth and Universe Sciences, Uargla: Kasdi Merbah University, 2017
2. BHAISORA, D., MOHAMED, S., AWAD, A. F., 2015. *Learnings from Cementing the Deepest Expandable Casing under HP/HT Conditions in Mediterranean Offshore Egypt*, SPE-175774-MS, SPE North Africa Technical Conference and Exhibition, Cairo, Egypt, 14-16 September, 1-16.
3. DEMONG, K., RIVENBARK, M., 2003. *Planning the Well Construction Process for the use of Solid Expandable Casing*, SPE/IADC 85303, SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 20-22 October, 1-10.
4. DUPAL, K. ET AL., 2000. *Well Design With Expandable Tubulars Reduces Costs and Increases Success in Deepwater Applications*, Deep Offshore Technology, 2000, 1-16.
5. FANGUY, C.J., MULLER, D.T., DOHERTY, D.R., 2004. *Improved Method of Cementing Solid Expandable Tubulars*, SPE 90923, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, 26-29 September, 1-5.
6. FILIPPOV, A. ET AL., 1999. *Expandable Tubular Solutions*, SPE 56500, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 3-6 October, 1-16.
7. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 1995. *Laboratorijske vježbe iz kolegija "Bušotinski fluidi" (interna skripta)*, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
8. GRANT, T., BULLOCK, M., 2005. *The Evolution of Expandable Tubular Technology: Lessons Learned Over Five Years*, OTC 17442, Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 2-5 May, 1-11.
9. HEATHMAN, J., ARREDONDO, E., OLUFOWOSHE, A., 2007. *Enhanced Cementing Practices Address Unique Issues Found With Solid Expandable Tubular Applications*, SPE/IADC 105227, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, 20-22 February, 1-13.
10. KRIŠTAFOR, Z., 2009. *Projektiranje zacijevljenja: interna skripta*, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

11. KUPREŠAN, D., 2014. *Experimental assessment of expandable casing technology as a solution for microannular gas flow*, Master's Theses, Louisiana State University, May 2014, 4-20.
12. MATANOVIĆ, D., 2013. *Tehnika izrade bušotina*, 2. izd., Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
13. MERRITT, J.W., 2005. *Premixed Cement Slurry Solves Problems Associated With Conventional Oilwell Cementing*, SPE 93897, SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma City, OK, USA, 17-19 April, 1-5.
14. RAE, P., JOHNSTON, N., 1996. *Liquid Cement Premix for Improved Abandonment and Workover Operations*, SPE 36477, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 6-9 October, 637-643.
15. RAHMAN, A.R., ZULKAFLY, A.H., 2004. *Issues and Solutions for Cementing Expandable Liners: A Case History*, IADC/SPE 87211, IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, USA, 2-4 March, 1-13.
16. RAHMAN, S.S., CHILINGARIAN G.V., 1995. *Casing Design Theory and Practice*, Developments in Petroleum Science, Volume 42, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
17. SHAIKH, A. ET AL., 2013. *First Installation of 16-in. Solid Expandable Liner Solves Shallow Drilling Problems; Opens New Doors for Hole Size Preservation*, SPE/IADC 166701, SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Dubai, UAE, 7-9 October, 1-10.
18. SILVA, M.G.P. ET AL., 1996. *Designing Fluid Velocity Profiles for Optimal Primary Cementing*, SPE 36136-MS, SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference, 23-26 April, 605-613.
19. STRINGER, J.A., FARLEY, D.B., 2013. *The Evolution of Expandables: A New Era of Monobore Expandable Well-construction Systems*, SPE 164171, SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Bahrain, 10-13 March, 1-8.
20. TREŠČEC, M., 2004. *Tehnologija proširivanja cijevi*, Diplomski rad, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet (obranjen: 24.06.2004.).
21. WRIGHT, J. C., MOORE, M. J., WINTERS, W. J., 2003. *Expandable Tubular Casing Repairs: Four Case Histories*, SPE 84049, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, 5-8 October, 1-10.

Internetski izvori:

22. Cement Test Equipment, *Ultrasonic Cement Analyzers*,
URL: <https://cementtestequipment.com/ultrasonic-cement-analyzers-2/> (23.09.2020)

23. Offshore, *Drilling Technology: Rotating casing expansion one step closer to monobore completions: Expanding many metals downhole*,
URL: <https://www.offshore-mag.com/business-briefs/company-news/article/16758750/drilling-technology-rotating-casing-expansion-one-step-closer-to-monobore-completions> (27.09.2020.)

24. Pegasus Vertex, Inc. Blog, *Eccentric Annulus in a Cement Job*,
URL: <http://www.pvisoftware.com/blog/tag/casing-standoff/> (25.08.2020.)

25. Wind Well Control, *Ballooning: Article Featured in American Oil and Gas Reporter Magazine: The Difference Between Well Ballooning and Well Kicking*,
URL: <https://wildwell.com/proper-identification-of-well-ballooning-and-well-kicking-can-prevent-a-well-control-incident/> (23.09.2020.)

IZJAVA

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

Pavao Mesarić

Pavao Mesarić



KLASA: 602-04/20-01/214
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 12.10.2020.

Pavao Mesarić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/214, UR. BROJ: 251-70-12-20-1 od 07.10.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

CEMENTACIJA PROŠIRIVIH ZAŠTITNIH CIJEVI

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

Voditeljica

(potpis)

Prof. dr. sc. Nediljka Gaurina-
Međimurec

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)