Hidraulički i mehanički integritet kanala bušotine

Horaček, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:497738

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

HIDRAULIČKI I MEHANIČKI INTEGRITET KANALA BUŠOTINE

Diplomski rad

Antonio Horaček

N314

Zagreb, 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

HIDRAULIČKI I MEHANIČKI INTEGRITET KANALA BUŠOTINE

ANTONIO HORAČEK

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

Sažetak

NORSOK D-010 standard definira integritet bušotine kao: ”Primjenu operativnih, tehničkih i organizacijskih rješenja u svrhu smanjenja rizika od nekontroliranog ispuštanja ležišnog fluida tijekom životnog vijeka kanala bušotine“. Primarna barijera (isplaka, cementni kamen, zaštitne cijevi, dubinski sigurnosni ventil) predstavlja prvi stup obrane od nekontroliranog dotoka ležišnog fluida, dok sekundarna barijera (cementni kamen, bušotinska glava, preventerski sustav, erupcijski uređaj) čini vanjsku zaštitu ukoliko elementi primarne barijere ne obave temeljnu zadaću. Sustav upravljanja integritetom bušotina kojeg čine stručno osoblje, oprema i sustavni procesi predstavlja rješenje za definiranje obveza, zahtjeva i odgovornosti kompanija u naftnoj i plinskoj industriji za upravljanje rizicima od gubitka bušotine tijekom životnog vijeka bušotine. Shematski prikaz barijera pruža bolji uvid u stanje barijera i njihove uloge pri djelovanju na nekontrolirani dotok fluida, dok metoda stabla kvarova omogućuje sustavnu procjenu mogućih rizika koji mogu narušiti integritet i kontrolu nad kanalom bušotine. Neadekvatna ugradnja, loša kvaliteta i neispitanost hidrauličkih i mehaničkih elemenata barijera, te manjak znanja i loša komunikacija stručnog osoblja mogu dovesti do katastrofalnih posljedica, kao što je bio gubitak integriteta bušotine na polju Macondo u Meksičkom zaljevu 2010. godine.

Ključne riječi: integritet bušotine, NORSOK D-010 standardi, primarna i sekundarna barijera, shematski prikaz barijera, procjena rizika, neuspjeh integriteta bušotine

Diplomski rad sadrži: 73 stranice, 6 tablica, 37 slika i 29 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

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

Datum obrane: 12.02.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

HYDRAULIC AND MECHANICAL INTEGRITY OF THE WELL

ANTONIO HORAČEK

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

Abstract

The NORSOK D-010 standard defines well integrity as: "Application of operational, technical and organizational solutions to reduce the risk of uncontrolled release of formations fluid throughout the life cycle of a well". The primary barrier (mud, cement, casing, downhole safety valve) is the first pillar of defense against uncontrolled inflow of reservoir fluid, while the secondary barrier (cement, wellhead, blowout preventer, "Christmas tree") provides an external protection if the primary barrier elements do not perform the basic requirements. Well integrity management system, consisting of professional crew, equipment and systematic procedures, presents solution for defining the obligations, requirements and responsibilities of a company in the oil and gas industry to manage the risks of well loss during the life cycle of a well. Well barrier schematic provides a better visualization of barrier conditions and their role in an attempt to protect uncontrolled fluid inflow, while the fault tree method allows a systematic assessment of potential risks that may impair the integrity and control of the wellbore. Inadequate installation, poor quality and untested hydraulic and mechanical barriers, as well as lack of knowledge and poor communication of professional staff can lead to catastrophic events, like demonstrated in the Gulf of Mexico in 2010, with the "Deepwater Horizon" incident.

Keywords: well integrity, NORSOK D-010 standards, primary and secondary barriers, well barrier schematic, risk assessment, failure of well integrity

Thesis contains: 73 pages, 6 tables, 37 figures and 29 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Reviewers: 1. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

2. Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

3. Full Professor Zdenko Krištafor, PhD

Date of defense: February 12, 2021, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,

University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS TABLICA I

POPIS SLIKA II

POPIS KORIŠTENIH KRATICA IV

1. UVOD 1

2. HIDRAULIČKI I MEHANIČKI INTEGRITET KANALA BUŠOTINE PREMA NORSOK D-010 STANDARDU 2

2.1. Uspostavljanje hidrauličkog i mehaničkog integriteta bušotine i upravljanje njime 6

2.1.1. Organizacija 8

2.1.2. Projektiranje integriteta bušotine 9

2.1.2.1. Projektiranje integriteta bušotine s obzirom na tlak 11

2.1.2.2. Projektiranje integriteta s obzirom na opterećenja i naprezanja 12

2.1.3. Operativni postupci 13

2.1.4. Upravljanje podacima 14

2.1.5. Analiza nadziranja bušotina 15

2.2. Barijere za održavanje hidrauličkog i mehaničkog integriteta bušotine 15

2.2.1. Funkcije barijera 17

2.2.2. Shematski i dijagramski prikaz barijera 20

2.2.2.1. Shematski prikaz barijera 20

2.2.2.2. Dijagram barijera 22

2.2.3. Ispitivanje barijera 23

2.2.4. Nadziranje barijera 24

2.3. Procjena rizika 26

2.3.1. FMECA analiza 27

2.3.2. Analiza FTA 29

3. BARIJERE I ELEMENTI ZA ODRŽAVANJE INTEGRITETA TIJEKOM OPERACIJA U BUŠOTINI 32

3.1. Elementi barijera za uspostavljanje integriteta kanala bušotine 33

3.1.1. Kolona zaštitnih cijevi 34

3.1.2. Cementni kamen 35

3.1.3. Isplaka pri bušenju 36

3.1.4. Tubing 38

3.1.5. Preventerski sklop 40

3.1.6. Bušotinska glava i erupcijski uređaj 41

3.1.7. Dubinski sigurnosni ventil 42

3.1.8. Paker 43

3.1.9. Cementni čep 44

3.1.10. Vješalica zaštitnih cijevi i tubinga 44

3.2. Primarne i sekundarne barijere pojedinih operacija u bušotini 46

3.2.1. Primarne i sekundarne barijere tijekom bušenja 46

3.2.2. Primarne i sekundarne barijere tijekom eksploatacije ležišta 48

3.2.3. Primarne i sekundarne barijere tijekom opremanja i održavanja bušotina 49

3.2.4. Primarne i sekundarne barijere tijekom napuštanja bušotine 51

4. PROBLEMI UZROKOVANI NEDOVOLJNIM HIDRAULIČKIM I MEHANIČKIM INTEGRITETOM KANALA BUŠOTINE 53

4.1. Narušeni integritet bušotine uzrokovan oštećenjem proizvodne kolone zaštitnih cijevi 55

4.2. Gubitak integriteta bušotine uslijed neučinkovite primarne i sekundarne barijere 57

4.3. Problem integriteta bušotine uzrokovan oštećenjem cementnog kamena 58

4.4. Narušeni integritet bušotine uzrokovan propuštanjem vješalice lajnera 61

4.5. Gubitak integriteta i eksplozija poluuronjive platforme “Deepwater Horizon” 63

5. ZAKLJUČAK 69

6. LITERATURA 70

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Osnove projektiranja integriteta bušotina raznih namjena pri različitim uvjetima rada s obzirom na najveći mogući tlak 11

Tablica 2-2. Faktori opterećenja pri projektiranju opreme za održavanje integriteta bušotine 13

Tablica 2-3. Metode određivanja integriteta stijena koje okružuju kanal bušotine 24

Tablica 2-4. Kriterij prihvatljivosti određenog elementa barijere 25

Tablica 2-5. Radni list FMECA analize 28

Tablica 3-1. Kriterij prihvatljivosti isplake 37

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Logotip NORSOK standarda 2

Slika 2-2. Shematski prikaz primarnih i sekundarnih barijera tijekom privremenog napuštanja bušotine 4

Slika 2-3. Zakonodavna hijerarhija integriteta kanala bušotine 7

Slika 2-4. Elementi sustava upravljanja integritetom bušotine 8

Slika 2-5. Elipsa naprezanja prilikom odabira opreme 12

Slika 2-6. Shematski prikaz barijera tijekom bušenja odobalne bušotine 18

Slika 2-7. Sigurnosni podzemni bušotinski ventil 19

Slika 2-8. Shematski prikaz barijera u eksploatacijskoj bušotini 21

Slika 2-9. Dijagram barijera 22

Slika 2-10. Matrica procjene rizika 26

Slika 2-11. Grafički prikaz logičkih vrata 29

Slika 2-12. Grafički prikaz analize stabla kvarova 30

Slika 3-1. Požar poluuronjive platforme „Deepwater Horizon“ u Meksičkom zaljevu 32

Slika 3-2. Klasična konstrukcija kanala bušotine 34

Slika 3-3. Cementni kamen kao element primarne i sekundarne barijere 36

Slika 3-4. Tubing 39

Slika 3-5. Preventeski sklop 40

Slika 3-6. Bušotinska glava i pripadajući erupcijski uređaj 41

Slika 3-7. Dubinski sigurnosni ventil u otvorenom i zatvorenom položaju 42

Slika 3-8. Položaj pakera u eksploatacijskoj bušotini 43

Slika 3-9. Pravilan i nepravilan položaj cementnog čepa u kanalu bušotine 44

Slika 3-10. Vješalica zaštitnih cijevi 45

Slika 3-11. Vješalica tubinga 45

Slika 3-12. Primarne i sekundarne barijere tijekom bušenja.....47

Slika 3-13. Primarne i sekundarne barijere tijekom eksploatacije ležišta.....48

Slika 3-14. Primarne i sekundarne barijere tijekom izvođenja zahvata u bušotini primjenom postrojenja za rad s opremom na žici 50

Slika 3-15. Primarne i sekundarne barijere privremeno napuštene proizvodne bušotine.....52

Slika 4-1. Broj bušotina na kojima se javio problem s integritetom kanala bušotine na pojedinom elementu barijere 54

Slika 4-2. Oštećeni segement proizvodne kolone zaštitnih cijevi s tubingom.....56

Slika 4-3. Izvlačenje popravnog lajnera i gubitak integriteta bušotine.....57

Slika 4-4. Oštećenja cementnog kamena uslijed djelovanja različitih naprezanja 59

Slika 4-5. Primarni i sekundarni načini propuštanja plina kroz cementni kamen.....60

Slika 4-6. Prodor plina kroz dvostruku barijeru vješalice lajnera i cementnog kamena…..…62

Slika 4-7. Požar poluuronjive platforme "Deepwater Horizon" 63

Slika 4-8. Prodor dušika u cementacijsku petu 65

Slika 4-9. Cementacijska peta kao element barijere 66

Slika 4-10. Uvjeti tijekom testa negativnog tlaka 67

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

OZNAKA	OPIS
ALARP	regulativno načelo za sigurnost (engl. *As Low As Reasonably Practicable*)
API	standard Američkog Naftnog Instituta (engl. *American Petroleum Institute*)
BOP	preventerski sklop (engl. *Blowout Preventer*)
EAC	certifikacijski znak za sve proizvode koji su u skladu sa Euroazijskim tehničkim propisima (engl. *The Eurasian Conformity mark*)
EMW	ekvivalentna gustoća isplake (engl. *Equivalent Mud Weight*)
FMECA	analiza uzroka i posljedica oštećenja (engl. *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*)
FIT	tlačni test integriteta stijene (engl. *Formation Integrity Test*)
FTA	analiza stabla kvarova (engl. *Fault Tree Analysis*)
GOR	omjer volumena proizvedenog plina i volumena proizvedene nafte (engl. *Gas Oil Ratio*)
HPHT	bušotine koje imaju velike vrijednosti tlaka i temperature (engl. *High Temperature and High Pressure*)
HSE	model očuvanja zdravlja, sigurnosti i okoliša (engl. *Health, Safety and Environment*)
IEC	međunarodna organizacija za normizaciju električne, elektronske tehnologije (engl. *International Electrotechnical Commission)*
ISO	međunarodna organizacija za normizaciju (engl. *International Organization for Standardization)*

LOT	test primanja stijena (engl. *Leak Off Test)*
NORSOK	konkurentnost Norveškog šelfa (nor. *Norsk Sokkels Konkuranseposisjon*)
WBS	shematski prikaz barijera (engl. *Well Barrier Schematics)*
WIMS	sustav upravljanja integritetom bušotine (engl. *Well Integrity Management Systems*)

1. UVOD

Integritet bušotine je rezultat tehničkih, operativnih i organizacijskih barijera koje se primjenjuju s ciljem održavanja, nadziranja i kontrole ponašanja tlaka i ležišnih fluida u bušotinama. Pravilno i efikasno uspostavljanje hidrauličkog i mehaničkog integriteta bušotine propisano je raznim međunarodnim i nacionalnim standardima i propisima, od kojih NORSOK D-010 standard čini glavnu jezgru smjernica, uputa i kriterija za prihvatljiv sustav barijera tijekom cijelog životnog ciklusa bušotine. NORSOK standardi u najvećoj mjeri su zamijenjeni specifikacijama naftnih kompanija i služe stvaranju novih okvira u naftnoj i plinskoj industriji koji će povećati sigurnost operacija, a istodobno smanjiti vrijeme izvođenja operacija i popratne troškove. Kad god se bušotina planira, izrađuje, koristi za pridobivanje/utiskivanje fluida, privremeno ili trajno napušta, princip integriteta bušotine mora sadržavati dvije neovisne tehnički ispravne barijere. Primarna barijera je u stalnom kontaktu s tlakom u ležištu i njen glavni zadatak je spriječiti nekontrolirani dotok ležišnog fluida u bušotinu i na površinu, a ukoliko se pokaže da primarna barijera ne ispunjava svoju temeljnu funkciju, daljnji protok ležišnog fluida do površine će spriječiti sekundarna barijera. Barijere umanjuju pojave rizičnih situacija zajedničkim djelovanjem elemenata, od kojih se pojedini koriste tijekom cijelog životnog ciklusa bušotine, poput zaštitnih cijevi i cementnog kamena, dok se neki elementi koriste privremeno poput isplake za vrijeme bušenja ili cementnog čepa prilikom privremenog napuštanja bušotine. Jednostavni grafički prikazi barijera, omogućuju kompanijama, operaterima i radnom osoblju bolji uvid u stanje barijera i njihove ulogu pri sprječavanju ili djelovanju na nekontrolirani dotok fluida, dok metoda stabla kvarova, te analiza uzroka i posljedica oštećenja pružaju sustavnu procjenu mogućih rizika prilikom planiranja i pripreme obavljanja određenih radnih zahvata u kanalu bušotine. Neadekvatna ugradnja, nadziranje i upravljanje sustavom dviju neovisnih barijera, te nedostatak poznavanja uvjeta u bušotini, može dovesti do gubitka integriteta bušotine što može rezultirati negativnim trajnim posljedicama za sigurnost ljudi, opreme i okoliša. U ovom radu biti će opisani postupci uspostavljanja i upravljanja integritetom bušotine prema NORSOK D-010 standardu, zatim elementi koji čine barijere tijekom cijelog životnog ciklusa bušotine i funkcije barijera, te će biti predstavljeni problemi uzrokovani nedovoljnim hidrauličkim i mehaničkim integritetom bušotine na osnovu primjera iz naftne i plinske industrije.

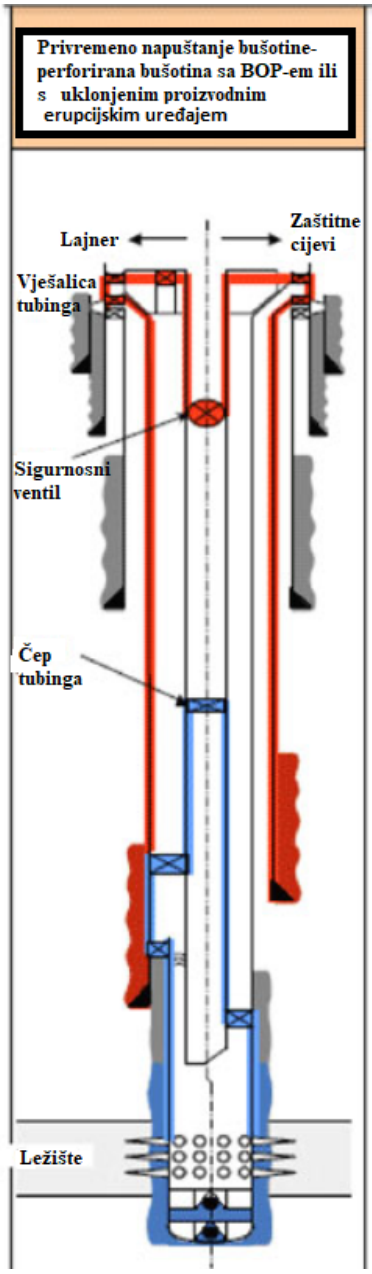
2. HIDRAULIČKI I MEHANIČKI INTEGRITET KANALA BUŠOTINE PREMA NORSOK D-010 STANDARDU

Od samih početaka razvoja naftne i plinske industrije pa sve do danas postoje razne definicije koje objašnjavaju što je zapravo integritet kanala bušotine. Trenutno najprihvaćenija definicija integriteta kanala bušotine bazira se na norveškom NORSOK D-010 standardu koji pod pojmom „integritet bušotine“ podrazumijeva *primjenu operativnih, tehničkih i organizacijskih rješenja u svrhu smanjenja rizika od nekontroliranog ispuštanja ležišnog fluida tijekom životnog vijeka kanala bušotine*. Svaka bušotina u svijetu je projektirana, izrađena, održavana i konačno puštena u rad s posebnim naglaskom na njen integritet. Ležišni fluidi poput plina, vode i nafte koji su zarobljeni u stijenama na velikim dubinama i pri visokim ležišnim tlakovima nastoje prodrijeti u kanal bušotine. Stoga pravilan postupak provedbe integriteta je obavezan prije provedbe aktivnosti u kanalu buošotine kako ne bi došlo do neželjenih situacija (Petrowiki, 2018). Norveška naftna industrija primjenjuje NORSOK standard kako bi se osigurala odgovarajuća sigurnost, dodatna vrijednost i isplativost za poslovanje i razvoj naftne i plinske industrije. Dakle, NORSOK standardi u najvećoj mjeri su zamijenjeni specifikacijama naftnih kompanija i služe kao osnova u propisima nadležnih tijela. Standardi su zasnivani na više od 40 godina iskustva norveške naftne industrije s norveškog kontinentalnog šelfa, a logo NORSOK standarda prikazan je na slici 2-1 (Standards Norway, 2019).



Slika 2-1. Logotip NORSOK standarda (Interdam, 2017)

Doneseni standardi stvaraju okvire u naftnoj i plinskoj industriji te olakšavaju međunarodnu trgovinu, osiguravaju sigurnost, poboljšavaju kvalitetu proizvoda, povećavaju i održavaju povjerenje potrošača. Izradili su ih terenski naftni stručnjaci i pokrivaju širok spektar propisa koji se odnose na konstrukciju proizvoda, upravljanje procesima, zdravstvene i sigurnosne zahtjeve. Standardi prema NORSOK-u su međunarodne norme čiji je cilj podržati rad međunarodne normizacije s norveškim znanjem kako bi se poboljšali međunarodni standardi. Objavljeni standardi imaju podršku Norveškog udruženja naftne industrije (engl. *Norwegian Oil Industry Association*) i Federacije norveške prerađivačke industrije (engl. *Federation of Norwegian Manufacturing Industries).* Početci NORSOK standarda sežu u 1993. godinu kada je naftna i plinska industrija pokrenula istoimenu inicijativu s ciljem povećanja norveške konkurentnosti prilikom pronalaženja novih terenskih rješenja u naftnoj industriji (Interdam, 2017). Tako je iz tog pristupa proizašao D-010 standard za bušenje i za ostale operacije koje se izvode u kanalu bušotine. Primjena standarda je uglavnom bila usredotočena na aktivnosti bušenja, opremanja, održavanja i napuštanja kanala bušotine. Tijekom 2003. godine objavljena je treća nadopuna D-010 standarda. U ovoj je nadopuni standard D-010 značajno promijenjen i proširen kako bi se usredotočio na cjelovitost bušotine tijekom planiranja i izvođenja svih operacija tijekom životnog ciklusa bušotine. Nadopunu D-010 standarda iz 2003. godine preuzeli su stručnjaci iz norveških i međunarodnih naftnih kompanija, a nadopunjeni D-010 standard bio je jedinstven u rješavanju integriteta bušotina u svim konvencionalnim bušotinskim operacijama kao što su: bušenje, ispitivanja i mjerenja, operativni radovi na žici, bušenje u uvjetima podtlaka, pridobivanja fluida i napuštanje kanala bušotine. Također standard D-010 je jedinstven zbog upotrebe shematskih prikaza barijera unutar kanala bušotine koje su postavljene za određene operacije. Norveška tvrtka Norsk Hydro koja se bavi proizvodnjom aluminija koristila je metodu shematskog prikaza barijera, odnosno WBS-a (engl. *Well Barrier Schematics*) još prilikom objava prvih standarda 1992. godine, navodeći da treba definirati i kontrolirati barijere neželjenom dotoku slojnog fluida u bušotinu. Tako je tvrtka Norsk Hydro velikodušno stavila svoje shematske podatke na raspolaganje urednicima treće nadopune D-010 standarda što je rezultiralo uključivanjem mnogih shematskih prikaza barijera kanala bušotine kako bi se dobila jasnija vizualizacija stanja i elemenata barijera u samom kanalu bušotine. Na slici 2-2 prikazan je primjer shematskog prikaza primarnih i sekundarnih barijera tijekom aktivnosti privremenog napuštanja kanala bušotine.



Elementi barijera kanala bušotine		Komentari
Primarna barijera kanala bušotine		
1. C. kamen zaš. cijevi (lajnera)		
2. Zaštitne cijevi (lajner)		Lajner iznad perforacija
3. Paker na vrhu lajnera		
4. Zaštitne cijevi		Ispod proizvodnog pakera
5. Proizvodni paker		50 m ispod vrha cementnog kamena u prstenastom prostoru
6. Tubing		
7. Čep tubinga		
ili		
1. C. kamen zaštinih cijevi		
2. Zaštitne cijevi		Iznad perforacija
3. Proizvodni paker		
4. Tubing		
5. Čep tubinga		
Sekundarna barijera kanala bušotine		
1. C.kamen zaštitnih cijevi		Iznad proizvodnog pakera
2. Zaštitne cijevi		Između pakera na vrhu lajnera i proizvodnog pakera
3. Bušotinska glava		
4. Vješalica tubinga		
5. Čep vješalice tubinga		
6. Tubing		Do sigurnosnog ventila
7. Podzemni sigurnosni ventil		
ili		
1. C. kamen zaštitnih cijevi		C.kamen tehničke kolone z.c.
2. Zaštitne cijevi		Tehnička kolona zaštitnih cijevi
3. Bušotinska glava		
4. Vješalica tubinga		
5. Čep vješalice tubinga		
6. Tubing		Do sigurnosnog ventila
7. Podzemni sigurnosni ventil		

Slika 2-2. Shematski prikaz primarnih i sekundarnih barijera tijekom privremnog napuštanja bušotine (Oilfield technology, 2014)

Na slici 2-2 plavom linijom je označena primarna barijera koja sprječava nekontrolirani dotok ležišnog fluida (vode, plina ili nafte) u kanal bušotine, dok je crvenom linijom označena sekundarna barijera koja je zapravo dodatna sigurnost integriteta kanala bušotine ukoliko dođe do popuštanja primarne barijere.

Nakon jedne od najvećih ekoloških nesreća u povijesti naftne i plinske industrije, eksplozije i požara istražne bušotine na polju Macondo u Meksičkom zaljevu 2010. godine i izljeva ugljikovodika koji je trajao tri mjeseca, pojavila su se nova preispitivanja i preporuke s obzirom na iskustvo stečeno kroz spomenutu ekološku katastrofu i narušavanje integriteta kanala bušotine. Nova, četvrta nadopuna NORSOK D-010 standarda objavljena je 2013. godine. Četvrta nadopuna NORSOK D-010 standarda pruža više informacija vezanih za privremeno i konačno napuštanje kanala bušotine, detaljnije su razrađeni kriteriji cementiranja i svojstava cementnog kamena tijekom operacija bušenja i održavanja bušotine, ujedno uključuje propise za bušenje pod tlakom koji nisu bili obuhvaćeni trećom nadopunom D-010 standarda. Također definira devet dodatnih elemenata barijera za kanal bušotine kako bi se osigurao odgovarajući integritet cjelovitog kanala bušotine (Oilfield technology, 2014). Učinkoviti integritet kanala bušotine dizajniran je tako da se sastoji uglavnom od primarne i sekundarne barijere. Svrha odnosno ciljevi učinkovitog dizajna bušotine su sljedeći (Government of Western Australia, 2021):

- konstantno kontroliranje tlaka kojim fluidi djeluju u podzemnim stijenama (ležišni tlak) uz pomoć erupcijskog uređaja (engl. christmas tree);
- sprječavanje protoka fluida između različitih slojeva međusobnim izoliranjem istih;
- sprječavanje nekontroliranog protoka fluida iz bušotine u vanjsko okruženje;
- sprječavanje ulaska fluida iz vanjskog okruženja (u podzemnoj stijeni ili na površini) u bušotinu.

Također, uspješni i održivi integriteta bušotine imati će pozitivne utjecaje za bilo koju organizaciju. To uključuje (Wild well control, 2021):

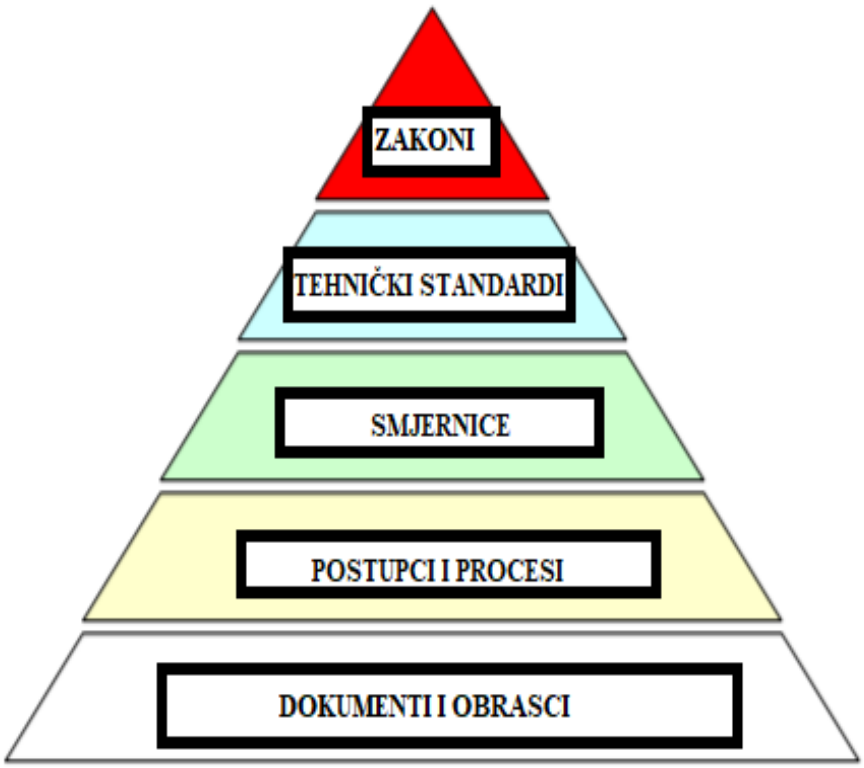
- poboljšani učinak na zdravlje ljudi, sigurnost i okoliš (engl. *Health, Safety and Environment),*
- zaštićeni ugled, imovina i pravo kompanije na poslovanje,
- produženi životni vijek bušotine i povećana proizvodnja,
- smanjeni troškovi opremanja i održavanja bušotine,
- poboljšana dokumentacija bušotina,
- poboljšana međuorganizacijska suradnja,
- povećana inženjerska produktivnost.

2.1. Uspostavljanje hidrauličkog i mehaničkog integriteta bušotine i upravljanje njime

Upravljanje integritetom bušotine je od ključne važnosti za pouzdano izvođenje različitih radova u bušotini. Svi operatori su svjesni da gubitak dostupnosti bušotine zbog problema s integritetom bušotine može imati izravan utjecaj na profitabilnost. Stoga svaki operator ima sustav za upravljanje integritetom bušotina. Takav sustav se sastoji od stručnog osoblja, opreme i sustavnih procesa koji pružaju operatoru praćenje i procjenu integriteta bušotine. Svaki operator trebao bi se pozvati na pojedinosti u odgovarajućim propisima i standardima. Sustav upravljanja integritetom bušotina- WIMS (engl. *Well Integrity Management Systems*) značajno je rješenje za definiranje obveza, zahtjeva i odgovornosti kompanije u naftnoj i plinskoj industriji za upravljanje rizicima od gubitka bušotine tijekom njenog životnog vijeka. Ciljevi učinkovitog integriteta navedeni su u dokumentima sustava za upravljanje integritetom bušotine. Također, za bolje upravljanje sustavom mogu se koristiti softverski programi. Oni mogu biti različiti, od jednostavnih programa kojima se upravlja proračunskom tablicom, do složenijih programa kojima se upravlja pomoću samostalnih ili komercijalno dostupnih elektroničkih sustava upravljanja. Cilj WIMS-a je odrediti zahtjeve potrebne za postizanje cjelovitosti integriteta kanala bušotine, uključujući (Petrowiki, 2020):

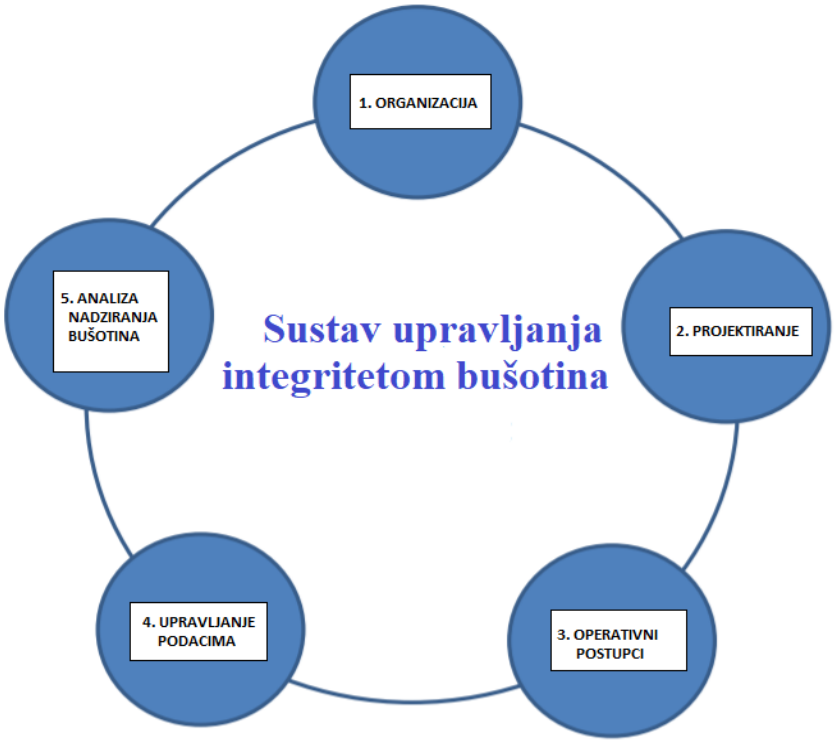
- integritet bušotine koji se odnosi na stalno održavanje potpune kontrole fluida unutar bušotine, kako bi se spriječilo nekontrolirano kretanje fluida ili zagađenje okoliša;
- politiku integriteta kanala bušotine koja definira obveze zaštite zdravlja, sigurnosti, okoliša, imovine i ugleda;
- WIMS sustav koji osigurava održavanje integriteta bušotine tijekom cijelog životnog vijeka bušotine primjenom kombinacije tehničkih, operativnih i organizacijskih procesa.

Tijekom uspostavljanja opširnog sustava upravljanja integritetom kanala bušotine, potrebno je uskladiti zakonsku regulative s industrijskom praksom i standardima. Na slici 2-3 prikazana je zakonodavna hijerarhija koja se treba provoditi tijekom cijelog životnog vijeka bušotine.



Slika 2-3. Zakonodavna hijerarhija integriteta kanala bušotine (Expro well services, 2011)

Slika 2-3 prikazuje da su zakoni glavni pokretači i da se nalaze u vrhu piramide nakon sustava kojim se upravlja integritet kanala bušotine. Tehnički standardi su razvijeni i provode se kroz razne politike i smjernice s obzirom na lokalnu politiku. Upravljanje integritetom bušotine je usklađeno s operatorom, koji se zatim prema financijskim i operativnim mogućnostima fokusira na odgovarajuće zakone i standarde. Lokalni postupci i procesi su razvijeni da podrže standard, dok odgovarajući dokumenti i obrasci moraju se čuvati radi dokazivanja sukladnosti s zakonom i podzakonskim aktima. Sustav upravljanja integritetom bušotine razvijen je zajedno s operaterom bušotine kako bi osigurali da se njihovi zahtjevi razumiju i implementiraju u sustav (Expro well services, 2011). Sustav upravljanja integritetom od izrade pa sve do napuštanja bušotine sastoji se od pet glavnih elemenata: organizacije, projektiranja, operativnih postupaka, upravljanja podataka i analize nadziranja bušotina (slika 2-4).



Slika 2-4. Elementi sustava upravljanja integritetom bušotine (Norwegian oil and gas, 2017)

2.1.1. Organizacija

Nositelji koji donose standarde odgovorni su da osiguravaju i nadziru da se operatori pridržavaju propisa. NORSOK D-010 standard, kao međunarodno najprihvaćeniji standard, razvija se zajedno s operatorom, te definira strategije i ciljeve integriteta bušotine. Operator nastoji uspostaviti, pratiti i dalje razvijati sustav upravljanja kako bi osigurao poštivanje zahtjeva za integritetom bušotine. Operator također osigurava da sve uključene strane i izvođači koji provode aktivnosti imaju svoj vlastiti sustav upravljanja integritetom na mjestu rada čime se osigurava cjelovitost integriteta bušotine. Uprava tvrtke trebala bi osigurati dovoljne resurse za potporu odredbama svojih propisa za dobro upravljanje integritetom bušotine. Također operator određuje i dokumentira odgovornost za pojedince, tj. smjernice kojim će se izvršiti pojedine odredbe vezane za integritet kanala bušotine. Takvi pojedinci trebaju razviti i dokumentirati strategiju i ciljeve dobrog integriteta i jasno definirati uloge i odgovornosti za svo profesionalno, nadzorno i operativno osoblje uključeno u aktivnosti. Organizacija i plan pripravnost za hitne slučajeve trebali bi biti u stanju nositi se s definiranim situacijama od različitih opasnosti i

nesreća. Preporučeno je dokumentirati, opisati i predati podatke o rezultatu rizičnih situacija kako bi se u budućnosti smanjile i izbjegle neželjene situacije. Prijedlozima novih rješenja, međusobnom komunikacijom i razmjenom rezultata i iskustava postiže se održivost organizacije. Odgovorne osobe za očuvanje barijera i cjelokupnog integriteta bušotine trebaju razumjeti sljedeće elemente (Norwegian oil and gas, 2017):

- postupke i uloge tijekom izrade i održavanja bušotine,
- razvoj tlaka i temperature u bušotini, te geološka svojstva ležišta i okolnih stijena,
- izradu, korištenje i razmjenu podataka,
- postupak cementacije, opremanja i održavanja bušotine,
- uspostavljanje integriteta u bušotini pomoću dvostruke barijere, te izradu i rukovanje grafičkim prikazom i dijagramom barijera,
- analiziranje problema i rješavanje neželjenih situacija.

2.1.2. Projektiranje integriteta bušotine

Projektiranje bušotine je postupak uspostavljanja, provjere i dokumentiranja odabranih tehničkih rješenja koji ispunjavaju svrhu bušotine, udovoljavaju zahtjevima i imaju prihvatljiv rizik od nepoželjnih situacija tijekom životnog vijeka bušotine. Postupak projektiranja integriteta provodi se prilikom:

- izrade novih kanala bušotine,
- izmjene ili preinake postojećih bušotina (npr. prenamjenom istražne u proizvodnu bušotinu),
- promjene u temeljnom dizajnu bušotine uslijed promjene uvjeta unutar bušotine (npr. povećana izloženost tlaku, protočnom mediju, itd.).

Sve komponente integriteta bušotine moraju biti dizajnirane da izdrže sva očekivana opterećenja i naprezanja. Postupak projektiranja mora obuhvaćati cjelokupni životni vijek bušotine. Slabe točke i operativna ograničenja povezana s projektom moraju se identificirati i dokumentirati.

Također dizajn integriteta bušotine trebao bi biti robustan kako bi ispunio sljedeće stavke:

- mora osigurati stabilnost s obzirom na opterećenja i naprezanja koja mogu nastati zbog varijacija i nesigurnosti u projektiranju;
- mora se nositi s promjenama i kvarovima, a da ne dođe do kritičnih posljedica;
- mora se nositi s predvidljivim radnim uvjetima;
- mora omogućiti stabilnost tijekom cijelog životnog ciklusa bušotine, uključujući postavljanje cementnog čepa zbog privremenog ili trajnog napuštanja bušotine.

Projektiranje podzemne opreme bušotine mora se uskladiti s ciljevima i funkcionalnim zahtjevima prije početka aktivnosti. Čimbenici koje treba dokumentirati i procijeniti prilikom projektiranja izrade i opremanja bušotine su sljedeći: svrha i cilj bušotine, zahtjevi dizajna s obzirom na životni vijek bušotine, ograničenja povezana s lokacijom bušotine (npr. ekološka ograničenja), lokacija bušotine (podaci o terenu, ležišni uvjeti), otklon kanala bušotine, geološka procjena promjene stratigrafskih i litoloških karakteristika s dubinom, pretpostavljena ležišna temperatura i tlaka, opasnosti od plitkih plinova, utvrđivanje anomalije tlaka prilikom eksploatacije ležišta, pridobivanje pijeska i podatci o ležištu. Nakon procjene svih bitnih elemenata koji utječu na konstrukciju podzemne opreme i referentnih podataka sa susjednih bušotine, projektiranje konstrukcije podzemne opreme odnosno kanala bušotine uključuje (Norsok Standard D-010, 2013):

- dizajn ušća bušotine i konduktor cijevi (engl. *conductor pipe*),
- konstrukciju kanala bušotine i odabir zaštitnih cijevi (engl. *casing*),
- cementaciju,
- odabir isplake za ispiranje kanala tijekom bušenja,
- dizajn tubinga,
- projekciju trajektorije, otklona kanala bušotine,
- dizajn preventerskog sustava,
- rješenja prilikom čepljenja i napuštanja kanala bušotine,
- procjenu rizika.

2.1.2.1. Projektiranje integriteta bušotine s obzirom na tlak

Tlak na koji se projektira integritet kanala bušotine (engl. *well design pressure*) je najveći tlak koji se može očekivati na ušću bušotine. Tablica 2-1 prikazuje određivanje najvišeg očekivanog tlaka za različite vrste bušotina.

Tablica 2-1. Osnove projektiranja integriteta bušotina raznih namjena pri različitim uvjetima rada s obzirom na najveći mogući tlak (Norsok Standard D-010, 2013)

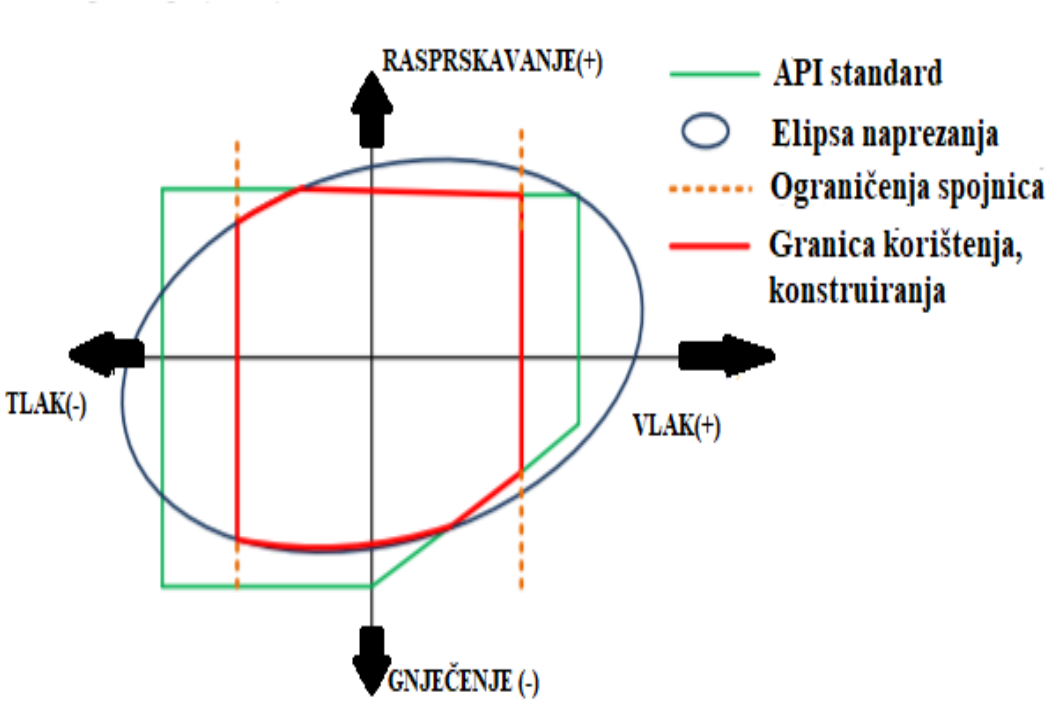
Vrsta bušotine	Temelj proračuna najvećeg očekivanog tlaka u bušotini
Izrada bušotine	projektirani tlak (bar)=ležišni tlak (bar) - hidrostatski tlak plina (bar) + sigurnosna margina zatvaranja (engl. *kill margin*) (bar)
Istraživačka bušotina	projektirani tlak (bar)=ležišni tlak (bar)- hidrostatski tlak plina stupca metana ili smjese realnog plina (bar)+ sigurnosna margina zatvaranja (bar)
Proizvodna bušotina sa slobodnim plinom	projektirani tlak (bar)=ležišni tlak (bar)- hidrostatski tlak smjese plina (bar)+ sigurnosna margina zatvaranja (bar)
Proizvodna bušotina bez slobodnog plina	projektirani tlak (bar)=simulacija se izvodi pri zatvorenoj bušotini na temelju sastava ležišnog fluida i omjer volumena proizvedenog plina i volumena proizvedene nafte (engl. *Gas Oil Ratio*)+ sigurnosna margina zatvaranja (bar)
Plinski lift (engl. *gas lift*), utisna bušotina	projektirani tlak (bar)= ako je tlak utiskivanja veći od ležišnog tlaka, tada se za projektirani tlak uzima najveća vrijednost tlaka utiskivanja (bar)

Ukoliko sigurnosna margina zatvarnja (engl. *kill margin*) nije prethodno izračunata, preporučuje se uzimanje vrijednosti od 35 bar. Za istražne bušotine i HPHT bušotine potrebno je uzeti povećanu vrijednost margine zatvaranja. Također prilikom planiranja, potrebno je pratiti promjene u tlakovima i količini protoka uslijed utiskivanja odnosno pridobivanja fluida u različitim zonama ležišta tijekom životnog ciklusa bušotine (Norsok Standard D-010, 2013).

2.1.2.2. Projektiranje integriteta s obzirom na opterećenja i naprezanja

Dozvoljena granica korištenja pojedinih komponenata opreme temelji se na osnovu tri čimbenika:

- API standardu za referentnu komponentu,
- Von Mieses elipsi naprezanja,
- dozvoljenom opterećenju spojnica, slika 2-5.



Slika 2-5. Elipsa naprezanja prilikom odabira opreme (Norsok Standard D-010, 2013)

Prilikom projektiranja opreme potrebno je izvršiti ispitivanja na aksijalno opterećenje, triaksijalno opterećenje, te otpornost na gnječenje i rasprskavanje. Svako od prethodnih opterećenja ima svoj vlastiti faktor koji je potrebno ubaciti u proračun prilikom projektiranja. U tablici 2-2 prikazani su faktori prethodno navedenih opterećenja sa odgovarajućim dodatnim informacijama. Također potrebno je provesti ispitivanja s obzirom na koroziju i trošenje materijala (Norsok Standard D-010, 2013).

Tablica 2-2. Faktori opterećenja pri projektiranju opreme za održavanje integriteta bušotine (Norsok Standard D-010, 2013)

Vrsta opterećenja	Faktor pri proračunu/projektiranju	Dodatne informacije
Rasprskavanje	1,10	
Gnječenje	1,10	
Aksijalno	1,25	Prilikom izvlačenja pakera treba uzeti faktor 1,50
Triaksijalno	1,25	Faktor pri triaksijalnom opterećenju nisu relevantni za spojnice

2.1.3. Operativni postupci

Operativni postupci nalažu da se aktivnosti u naftnoj i plinskoj industriji moraju provoditi na siguran način. Stoga prilikom obavljanja aktivnost trebali bi postojati programi i postupci kako bi se izbjegle rizične situacije. Prema standardima potrebno je uvijek raditi u granicama projektiranog opterećenja. Radni parametri tijekom aktivnosti pridobivanja ili utiskivanja fluida trebaju uvijek ostati unutar dozvoljenih ograničenja bušotine i izvedbenog projekta. Operativna ograničenja mogu biti neočekivane vrijednosti temperature, tlaka, protoka i sastava fluida. Nadalje, potrebno je nadzirati kritične parametre u bušotini kako bi se mogao utvrditi status barijera u bušotini. Program održavanja barijera treba se temeljiti na kritičnim vrijednostima opreme. Također, potrebno je konstantno nadgledati parametre koji bi mogli imati

negativan utjecati na integritet bušotine. Na temelju procjene i analize rizika potrebno je uskladiti strategiju za izvanredne rizične i opasne situacije. Operativnim postupcima definiran je način kako postupati u slučaju popuštanja barijera, te prilikom mogućih opasnosti i nezgoda. Od izrazite je važnosti međusobna komunikacija, te je postojećim procedurama jasno definirano koje informacije treba prenijeti i na koji način. To se posebno odnosi na preuzimanje bušotina između kompanija s obzirom na različite operativne radove za koje je zadužena određena kompanija, a također i za prijenos informacija među radnim osobljem ili prilikom rada osoblja u smjenama (Norwegian oil and gas, 2017).

2.1.4. Upravljanje podacima

Informacijski sustavi i procesi koji zadovoljavaju potrebe za obradom i širenjem podataka i informacija tijekom cijelog životnog vijeka bušotine moraju biti uspostavljeni. Od faze izrade bušotine pa sve do faze radnih aktivnosti bušotine potrebno je svaku pojedinačnu fazu provjeriti i dokumentirati. Bilo bi korisno uključiti i ograničenja u sustavu praćenja integriteta bušotina, kako bi se znalo da ona nisu prekoračena. S obzirom na pokazatelje razine rizika, stručno osoblje treba provoditi treninge kako bi se unaprijed znale poduzeti radnje kojima se osigurava trajni integritet bušotine. Za lakše razumijevanje stanja bušotine razvijen je shematski prikaz barijera bušotine kao dio praktične metode kojim se definira prisutnost određenih primarnih i sekundarnih barijera u bušotini. Prije početka pojedine operacije potrebno je provesti izradu shematskog prikaza, zbog mogućnosti promjene elemenata i za buduće trajno napuštanje bušotine. Također podaci o stanju zdravlja osoblja, sigurnosti i okoliša trebaju biti javno dostupni (Norwegian oil and gas, 2017).

2.1.5. Analiza nadziranja bušotina

Analizu nadziranja integriteta bušotine treba provesti uz pomoć podataka koji služe za procjenu rizika, kako bi se osiguralo kontinuirano poboljšanje u svim fazama životnog vijeka bušotine. Analiza podataka trebala bi biti osnova na temelju čega se donose odluke kada je u pitanju poboljšanje i održavanje sustava, planiranje radova, radni procesi, preventivna održavanja, te radovi na povećanju kvalitete zdravlja osoblja, sigurnosti i okoliša. U takvom slučaju, treba slijediti regulativno načelo za sigurnost tako da je preostali rizik „onoliko mali koliko je to razumno izvedivo“ - ALARP (engl. *As Low As Reasonably Practicable*), te uz pomoću njega treba provesti mjere za ublažavanje i otklanjanje nepravilnosti. Rizik vezan uz bušotinu treba kombinirati s ostalim rizicima na postrojenju kako bi se procijenio kumulativni efekt. Kada rezultati analize pokazuju da je došlo do povećane razine rizika, odgovorna stranka dužna je pozabaviti se time kako bi se ažurirao pregled profila rizika. Potrebno je uključiti sve strane koje su sudjelovale u provedbama operacija za bolje razumijevanje, komunikaciju i analiziranje integriteta bušotine. Razne metode procjene rizika, regulativno načelo za sigurnost (ALARP) i ostale stavke koje su povezane sa rizikom dodatno su objašnjene u posebnom poglavlju u nastavku teksta (Norwegian oil and gas, 2017).

2.2. Barijere za održavanje hidrauličkog i mehaničkog integriteta bušotine

Bušotinske barijere služe za sprječavanje nekontroliranog istjecanje fluida i smanjuju rizične situacije do kojih može doći prilikom operacija bušenja, proizvodnje i opremanja kanala bušotine. Prema NORSOK D-010 standardu barijere su zapravo sustavi jednog ili više neovisnih elemenata koji sprječavaju nekontrolirani dotok tekućina ili plinova iz jedne u drugu formaciji ili nekontrolirani dotok na površinu. Glavne zadaće koje bušotinske barijere trebaju ispuniti prilikom očuvanja integriteta bušotine su:

- sprječavanje većeg curenja ugljikovodika iz bušotine u vanjsko okruženje tijekom eksploatacije ležišta ili opremanja bušotina;
- zatvaranje kanala bušotine odlukom operatora za vrijeme nužnog isključenja čime se sprječava istjecanje ugljikovodika iz bušotine.

Sustav bušotinskih barijera sastoji se od jednog ili više elemenata barijere. Da bi se osigurao kvalitetan integritet bušotine, barijere se sastoje od nekoliko elemenata koji u kombinaciji osiguravaju da bušotinska barijera obavlja svoje predviđene funkcije. Zadaće barijera mogu biti trenutne ili kontinuirane. Primjer trenutne zadaće barijere je da ukoliko dođe do neželjene situacije u kanalu bušotine ili okruženju, sustav za hitno isključenje mora imati mogućnost zatvoriti jednu ili više bušotinskih barijera ili ako to situacija zahtjeva može doći i do zatvaranja bušotine. Dok kontinuirana zadaća barijere može biti konstantni visoki tlak koji barijera mora izdržati da ne dođe do propuštanja. Glavne karakteristike svake barijere su funkcionalnost, pouzdanost i vijek trajanja. Regulatorna tijela donose opće zadaće barijera u svojim propisima i pozivaju se na smjernice i priznate nacionalne i međunarodne standarde za detaljnije operativne zadaće. Norveška uprava za naftnu sigurnost (engl. *Norwegian Petroleum Safety Authority*) koristi, sljedeću regulatornu hijerarhiju:

1) propisi,
2) smjernice (za propise),
3) nacionalni i međunarodni standardi koji su navedeni u smjernicama, kao što su NORSOK standardi, ISO standardi, API standardi i IEC standardi.

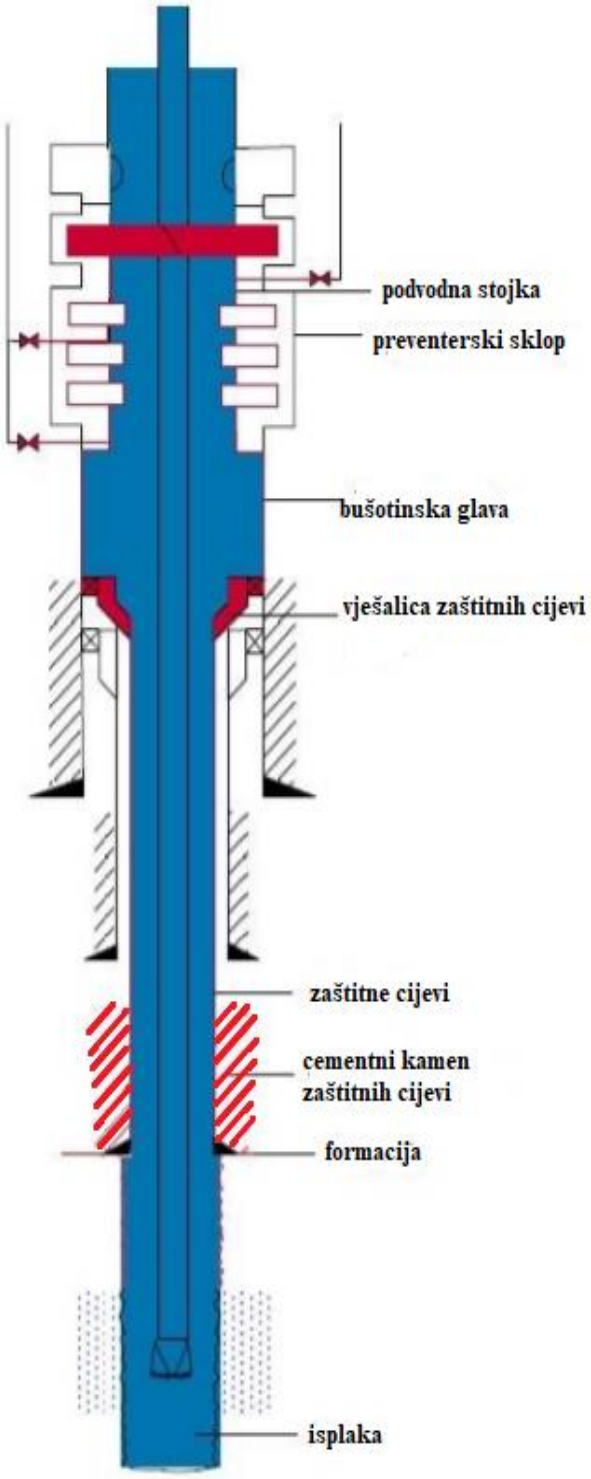
Pridružene smjernice pozivaju se na određene dijelove raznih nacionalnih i međunarodnih standarada. Kao primjer može se vidjeti da smjernice "Pravilnika o objektima", koje je objavila Norveška uprava za naftnu sigurnost odnose se na određena poglavlja iz NORSOK D-010 standarda. Iz prethodno navedenog pravilnika koji se zasniva na NORSOK D-010 standardu, glavni kriteriji koje barijere moraju ispunjavati su (WIF, NTNU & UiS, 2012):

- trebaju podnijeti maksimalni diferencijalni tlak i temperaturu kojima mogu biti izložene;
- moraju biti testirane na tlak i funkcije za koje su namijenjene ili trebaju biti potvrđene drugim metodama;
- u pravilu trebaju biti dostupne najmanje dvije neovisne i provjerene barijere kako bi mogle spriječiti nekontrolirani dotok slojnog fluida iz bušotine tijekom bušenja i drugih radova u bušotini;
- barijere moraju biti dizajnirane tako da omoguće brzo ponovno uspostavljanje izgubljene barijere;

- u slučaju kvara na barijeri, trebaju se poduzeti određene mjere kako bi se održala dovoljna razina sigurnosti sve dok se ponovno uspostave dvije neovisne sigurne barijere. Nikakve druge aktivnosti u kanalu bušotine osim ponovnog uspostavljanja dviju barijera ne smiju se izvoditi;
- potrebno je definirati barijere i njihovu granicu kritičnosti;
- u svakom trenutku treba imati informacije o položaju i stanju barijera;
- treba postojati mogućnost ispitavanja barijera.

2.2.1. Funkcije barijera

Prilikom provedbe analize bušotinskih barijera važno je razumjeti njihove funkcije i njihove slabe točke. Prema NORSOK D-010 standardu, barijere se s obzirom na njihove funkcije mogu podijeliti na primarne i sekundarne. Primarna bušotinska barijera je barijera koja je fizički u dodiru sa ugljikovodicima koji su pod tlakom. Kada primarna barijera funkcionira kako je predviđeno, ona mora zadržavati ugljikovodike koji su pod tlakom da ne dođe do propuštanja. Ako primarna barijera ne funkcionira dobro (npr. dolazi do propuštanja tubinga ili je nemoguće zatvoriti ventil), tada sekundarna barijera mora spriječiti nekontrolirano istjecanje fluida iz bušotine. Postoji mogućnost i tercijarne barijere koja nije obavezna. Ona se samo koristi ukoliko postoji mogućnost propuštanja sekundarne barijere. Ovisno o operacijama koje se izvode u kanalu bušotine, uloga barijera je promjenjiva. Na slici 2-6 prikazane su primarna i sekundarna barijera pri izvođenju operacije bušenja kanala bušotine. Plavom bojom je označena primarna barijera, dok je crvenom bojom označena sekundarna barijere. Jasno može se vidjeti da prilikom operacije bušenja, hidrostatski tlak stupca isplake čini primarnu barijeru, dok sekundarnu barijeru čini preventerski sklop, cementirane zaštitne cijevi posljednje ugrađene kolone i vješalica zaštitnih cijevi.

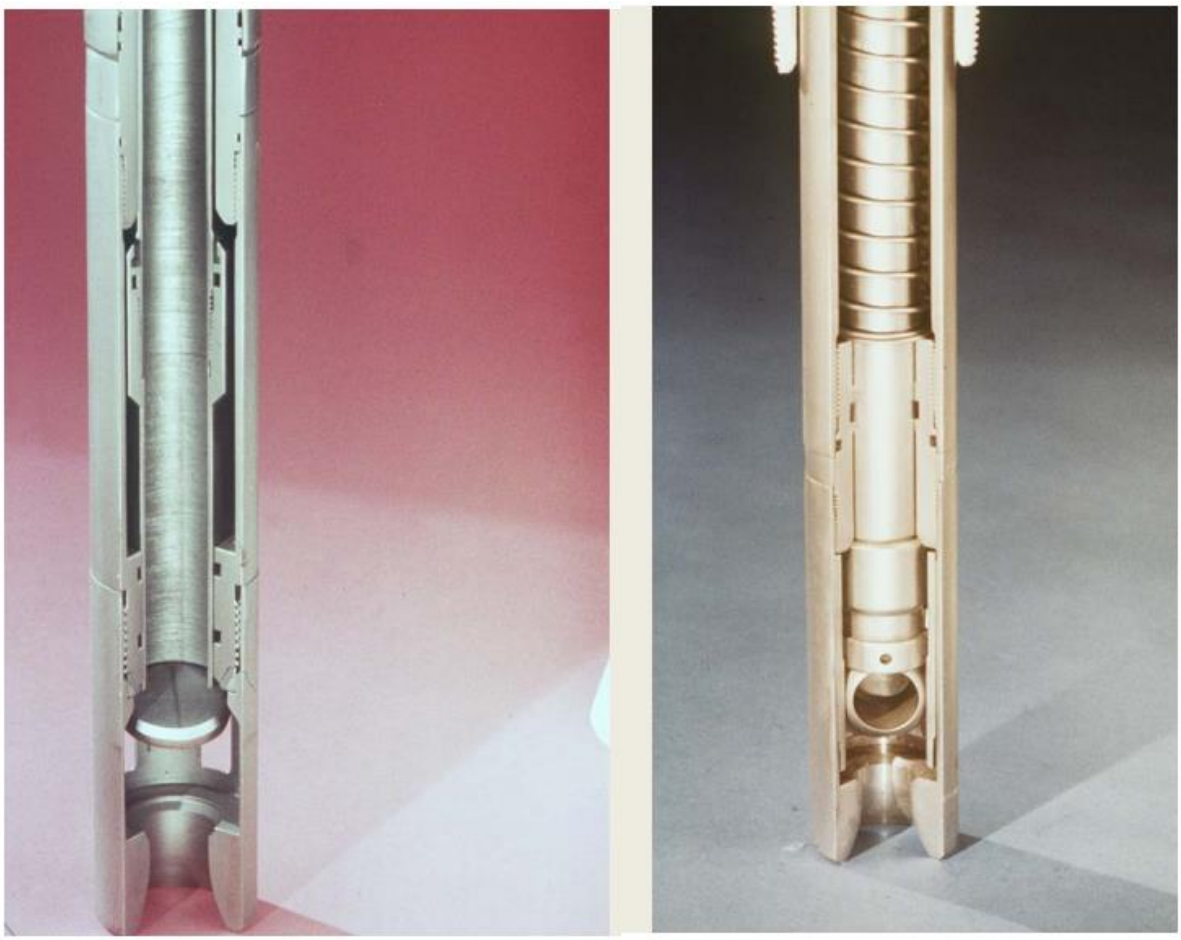


Slika 2-6. Shematski prikaz barijera tijekom bušenja odobalne bušotine (WIF, NTNU & UiS, 2012)

Elementi bušotinskih barijera koji uključuju električnu, elektroničku i računalnu tehnologiju posjeduju sigurnosno-instrumentalni sustav. Sigurnosno-instrumentalni sustav elemenata barijera sastoji se od tri glavna podsustava (WIF, NTNU & UiS, 2012):

a) ulazni elementi; senzori (automatsko aktiviranje) ili tipke (ručno aktiviranje);
b) prijenosnici (obrađivači) signala; elektronički ili neelektronički uređaj koji obrađuje signale iz ulaznih elementa i šalje ih relevantnim završnim elementima;
c) završni elementi; fizički elementi koji su u izravnom kontaktu s kanalom bušotine (npr.ventili).

Na slici 2-7 je prikazan podzemni sigurnosni bušotinski ventil koji je također jedan od elemenata bušotinske barijere sa sigurnosno-instrumentalnim sustavom.



Slika 2-7. Sigurnosni podzemni bušotinski ventil (Production technology, 2020)

Postoji mogućnost da se isti obrađivač signala koristi za aktiviranje nekoliko izolacijskih ventila. Pri tome je vrlo važno da elementi primarne i sekundarne barijere imaju svaki svoj vlastiti neovisni sigurnosno-instrumentalni sustav kako ne bi došlo do istovremenog aktiviranja završnog elementa (npr.ventila) ili do istodobnog kvara obje barijere (WIF, NTNU & UiS, 2012).

2.2.2. Shematski i dijagramski prikaz barijera

Kako bi imali bolji uvid u stanje barijera i njihovu ulogu pri sprječavanju ili djelovanju na nekotnrolirani dotok fluida, za bolje razumijevanje barijera koriste se razni načini njihova prikaza. Dva najčešća načina prikaza barijera su:

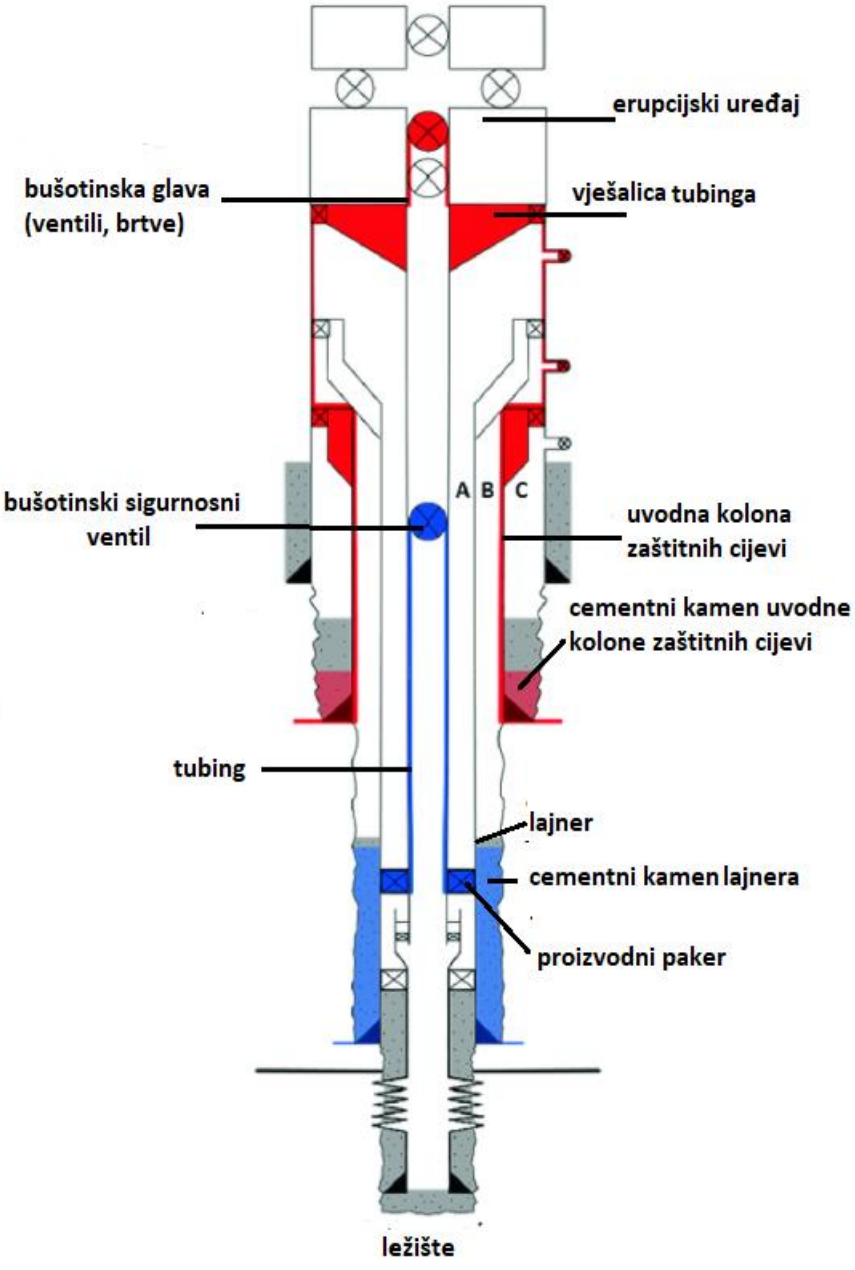
a) shematski prikaz barijera,
b) dijagram barijera.

Shematski prikaz i dijagram barijera važni su alati za procjenu pouzdanosti i rizika bušotine u svim fazama njezinog životnog ciklusa, a isto tako i za procjenu integriteta bušotine.

2.2.2.1. Shematski prikaz barijera

Shematski prikaz barijera bušotine (engl. *Well Barrier Schematics)* je statična ilustracija bušotine i glavnih elemenata primarne i sekundarne barijere, gdje su svi primarni i sekundarni elementi barijera kanala bušotine označeni različitom bojom. Uglavnom svi shematski prikazi barijera plavom bojom označuju primarne barijere, dok crvenom bojom označuju sekundarne barijere. Na slici 2-8 prikazan je shematski prikaz barijera za standardnu eksploatacijsku bušotinu. Primarna barijera eksploatacijsku bušotine označena je plavom bojom, a elementi koji čine primarnu barijeru su: pokrovna stijena, cementni kamen lajnera, lajner, proizvodni paker, tubing, komponente tubinga i bušotinski sigurnosni ventil. Crvenom bojom naznačena je sekundarna barijera ekploatacijske bušotine, a elementi koji čine sekundarnu barijeru su: cementni kamen uvodne kolone zaštitnih cijevi, uvodna kolona zaštitnih cijevi, bušotinska

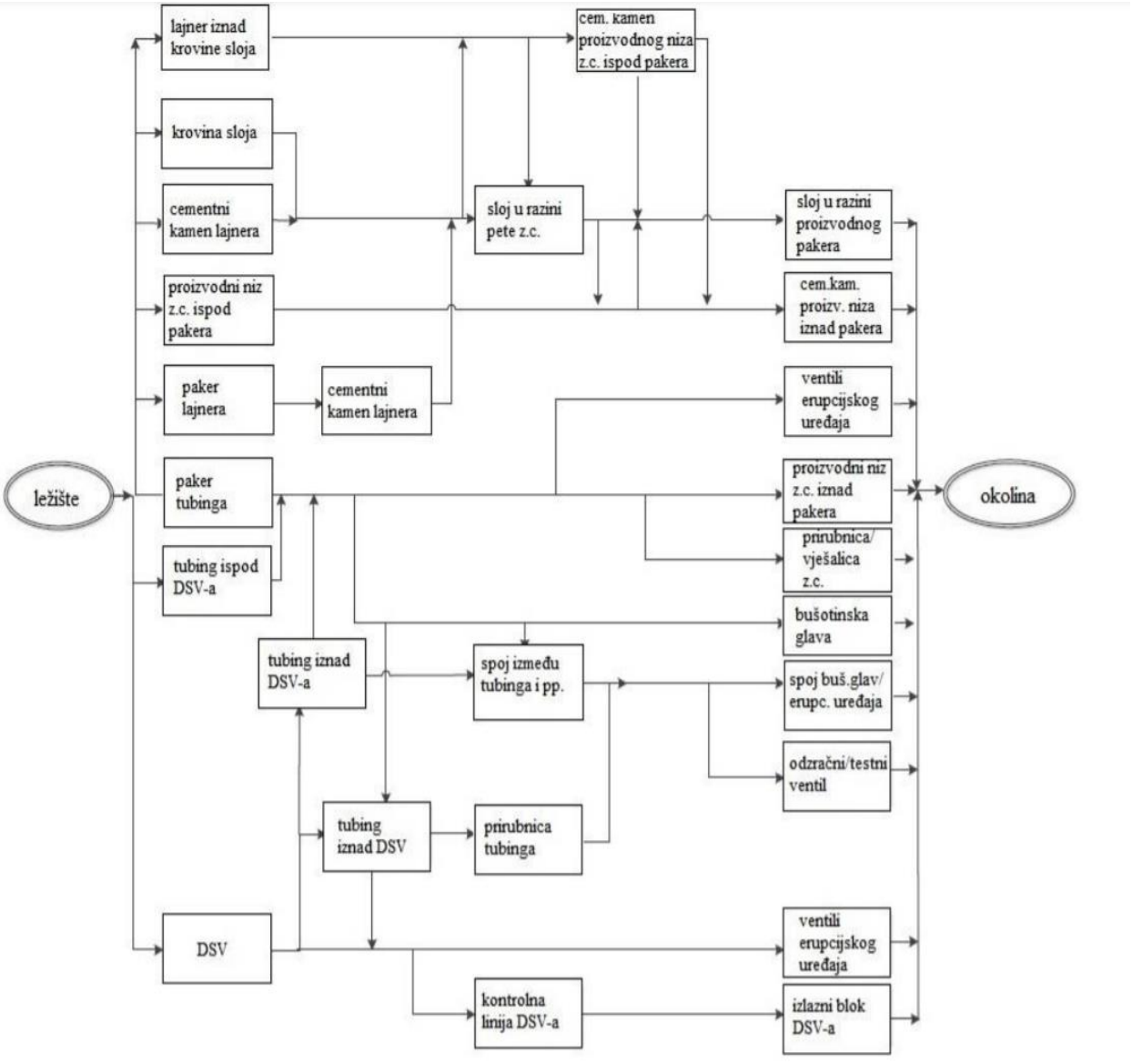
glava, elementi bušotinske glave (ventili i brtve), vješalica tubinga i erupcijski uređaj (engl. *christmas tree*).



Slika 2-8. Shematski prikaz barijera u eksploatacijskoj bušotini (Khalifeh i Saasen, 2020)

2.2.2.2. Dijagram barijera

Barijera bušotine može se također prikazati uz pomoć dijagrama. Dijagram barijera predstavlja mrežu koja prikazuje moguće puteve nekontroliranog propuštanja fluida iz ležišta u okolinu. Dijagram barijere može se prikazati na mnogo različitih načina, ali najpraktičnija opcija je nacrtati dijagram okomito s ležištem na dnu i okolinom na vrhu. Slika 2-9 prikazuje vodoravni dijagram barijera iste proizvodne bušotine koja je bila prikazana shematskim prikazom na prethodnoj slici (WIF, NTNU & UiS, 2012).



Slika 2-9. Dijagram barijera (WIF, NTNU & UiS, 2012)

2.2.3. Ispitivanje barijera

Nakon što se postave svi elementi barijere potrebno je provjeriti njihov integritet tlačnim ispitivanjem primjenom diferencijalnog tlaka ili nekim drugim metodama. Naknadno ispitivanje integriteta elemenata barijere treba izvršiti svaki put kada dođe do promjene stanja pojedinog elementa ili ako dođe do promjene očekivanog opterećenja u sustavu. Elemente barijere koji se aktiviraju fluidom, djelovanjem tlaka ili mehaničkim djelovanjem, potrebno je također ispitati s obzirom na njihovu djelotvornost. Ispitivanje integriteta barijera tlakom vrši se na način da se, prije visokotlačnog ispitivanja tijekom operacije bušenja, održavanja ili opremanja, ispitivanje obavi pri niskom tlaku od 15 do 20 bara u trajanju od 5 minuta. Zatim slijedi visokotlačno ispitivanje s najvećim dopuštenim diferencijalnim tlakom pod kojim će element barijere biti izložen. Statički tlak ispitivanja mora se promatrati i bilježiti najmanje 10 minuta uz stabilno očitanje. Kvalitetan integritet barijere ima razinu dopuštenog propuštanja jednaku nuli, a samo ispitivanje integriteta barijera se uvijek vrši u smjeru protjecanja. Elementi barijera koji zahtijevaju aktivaciju, moraju se provjeriti, a provjera funkcionalnosti tih elemenata vrši se:

- prije ugradnje podzemne ili površinske opreme,
- nakon ugradnje opreme,
- ukoliko je element izložen abnormlanim opterećenjima,
- nakon popravka opreme,
- periodično prema preporuci proizvođača.

Također tijekom ispitivanja integriteta barijera, bitno je imati podatke o stijenama koje okružuju kanal bušotine. Mehanički podaci o stijenama sustavno se prikupljaju kako bi se osigurao integritet bušotine tijekom faze eksploatacije, utiskivanja i napuštanja bušotine. U tablici 2-3 prikazani su najčešće metode određivanja integriteta stijena koje okružuju kanal bušotine.

Tablica 2-3. Metode određivanja integriteta stijena koje okružuju kanal bušotine (Norsok Standard D-010, 2013)

Metoda	Cilj metode	Dodatne informacije
Tlačni test integriteta stijene	za potvrđivanje da formacija odnosno cementi kamen zaštitnih cijevi mogu izdržati narinuti tlak	prati se stabilnost formacije, a vrijednost tlaka testiranja je unaprijed određena
Test primanja stijene, LOT (engl. *leak off test*)	da bi se utvrdio najveći tlaka kojeg stijena, cementi kamen, zaštitne cijevi mogu izdržati, a da ne dođe do propuštanja	test se zaustavlja kada se na grafičkom prikazu LOT testa ustanovi odstupanje linearnosti volumena utiskivanja i porasta tlaka
Produženi test primanja stijene, XLOT (engl. *extended leak off test*)	za određivanje opterećenja koje in-situ formacija može izdržati	test stvara pukotinu u stijeni te se određuje tlak frakturiranja stijene

Ispitivanja i metode za uspostavu integriteta koje su prethodno bile izvedene potrebno je dokumentirati. Identifikaciju dokumenata obavljaju osobe koje su odgovorne za mjerodavnu operaciju (Norsok Standard D-010, 2013).

2.2.4. Nadziranje barijera

Svi parametri koji su bitni za sprečavanje nekontroliranog protoka iz bušotine moraju se redovito nadzirati, a metode ispitivanja stanja elemenata barijera moraju se obavezno definirati i dokumentirati. Važno je nadzirati volumen isplake koja djelovanjem hidrostatskog tlaka ostvaruje primarnu barijeru prilikom operacije bušenja. Također treba pratiti i bilježiti tlak u prstenastom prostoru. Svi instrumenti koji se koriste za praćenje parametara moraju se često provjeravati i kalibrirati. Za svaki pojedini element barijere potrebno je ispuniti tablicu kriterija prihvatljivosti, tablica 2-4. U nastavku je prikazana tablica prihvatljivosti elemenata barijere, te je bitno napomenuti da prijedlozi i kriterij prihvatljivosti u tablici ne služe za zamjenu tehničkih i operativnih zahtjeva operatora već imaju svrhu odabira i ugradnje elemenata.

Tablica 2-4. Kriterij prihvatljivosti određenog elementa barijere (Norsok Standard D-010, 2013)

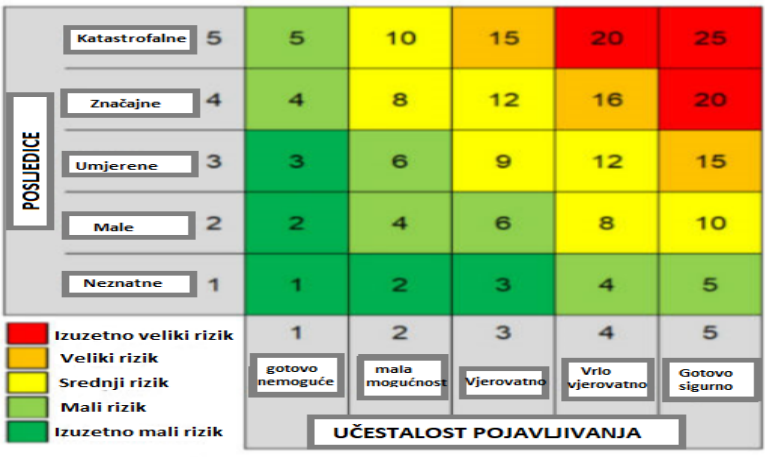
Značajke	Kriterij prihvatljivosti	Veza
A: Opis	Opis elementa barijere	
B: Funkcija	Opis funkcija elementa barijere	
C: Dizajn (kapacitet, rang i funkcija), konstrukcija i odabir	a) Za odabrane elemente barijere koji su izrađeni na terenu (npr. cementni kamen, isplaka): -kriterij maksimalnog opterećenja i radni vijek djelotvornosti elementa -zahtjevi izrade elementa s obzirom na normativne standardne; b) Za elemente koji su izrađeni u tvorničkoj proizvodnji (npr. ventili, pakeri): -odabir pravilne opreme i postupaka ugradnje s obzirom na parametre.	Nazivi odgovarajućih standarada
D: Početno ispitivanje i potvrda	Opis metodologije za potvrđivanje spremnosti i učinkovitosti elementa barijere	
E: Upotreba	Opis pravilnog korištenja elementa barijere	
F: Nadziranje	Opis postupaka za provjeru i potvrđivanje da će element barijere ispunjavati zadane kriterije	
G: Zajednička barijere	Opis dodatnih kriterija ako odabrani element čini zajedničku barijeru	

2.3. Procjena rizika

Tijekom planiranja i pripreme obavljanja određene operacije u kanalu bušotine, najprije je potrebno napraviti sustavnu procjenu mogućih rizika koji mogu narušiti integritet i kontrolu nad kanalom bušotine. Prilikom procjene rizika integriteta bušotine, potrebno je razmotriti moguće načine kvara pojedinih elemenata barijera, a istovremeno treba provjeriti dostupnost sekundarne barijere. Ako je došlo do oštećenja ili popuštanja barijere, treba provesti procjenu rizika uzimajući u obzir sljedeće stavke:

a) uzrok oštećenja,
b) mogućnost nastanka rizika,
c) pouzdanost i načini mogućeg oštećivanja elemenata primarne barijere,
d) dostupnost i pouzdanost elemenata sekundarne barijere,
e) okvirni plan popravka ili zamjene oštećene barijere.

Kritične aktivnosti i postupci koji mogu prouzročiti gubitak ili ozbiljno oštećenje integriteta barijere odnosno kanala bušotine, moraju se temeljito planirati analizirati i izvoditi s ciljem ograničavanja nastanka dodatnog rizika. Takve aktivnosti mogu biti: podizanje teških predmeta iznad kanala bušotine, građevinske aktivnosti, bušenje u blizini postojećih bušotina, prestanak rada sigurnosnih alarma ili privremeno isključenje napajanja sustava koji upravlja radom elemenata barijera. Jedna od čestih metoda procjene rizika je matrica procjene rizika koja je prikazana na slici 2-10.



Slika 2-10. Matrica procjene rizika (Xenon group, 2021)

Okolnosti tijekom raznih aktivnosti u kanalu bušotine i njenom okruženju koje su dovele do nastanka kvara ili oštećenja predstavljaju uzrok oštećenja. Najčešće metode koje se koriste za otkrivanje uzroka oštećenja elemenata bušotinskih barijera su analiza uzroka i posljedica oštećenja, FMECA (engl. *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) i analiza stabla kvarova FTA (engl. *Fault Tree Analysis*) (Norsok Standard D-010, 2013).

2.3.1. FMECA analiza

FMECA analiza za otkrivanje uzroka oštećenja je metoda koju je jednostavno provoditi i lako razumjeti bez ikakvih naprednih analitičkih podataka. Analizu provodi stručno osoblje koje se sastoji od osoba sa sistematskim vještinama, djelatnicima koji su upoznati s konstrukcijom bušotine i voditeljem FMECA analize. Stručno osoblje FMECA metode (otkrivanje mogućih kvarova, uzroka i posljedica) mora imati osnovno znanje o konceptima kvarova i analizi, uključujući razumijevanje glavnih pojmova kao što su:

- način nastanka oštećenja,
- ishodišni uzroci oštećenja,
- prepoznavanje oštećenja,
- posljedica oštećenja elementa barijere na cjelokupni sustav,
- stupanj opasnosti na ljude, okoliš i opremu.

Postupak FMECA analize se dijeli na pripremnu i provedbenu fazu. Priprema FMECA analize se sastoji od odabira odgovarajuće osobe za provedbu i podataka vezanih za problem, uključujući dodatne informacije o oštećenju s obzirom na iskustva stručnih osoba ili prethodnih sličnih situacija. Faza provedbe obuhvaća: određivanje granica i komponenata, definiranje i opisivanje svrhe sustava, raščlambu na podsustave s ciljem određivanja elemenata, definiranje utjecaja između podsustava, ispunjavanje radnog lista FMECA analize i predaju rezultata. Radni list FMECA analize prikazan je u tablici 2-5 (WIF, NTNU & UiS, 2012).

Tablica 2-5. Radni list FMECA analize (WIF, NTNU & UiS, 2012)

Opis stavke			Opis oštećenja			Posljedica oštećenja		Učestalost oštećenja	Rang ozbiljnosti oštećenja	Mjere za smanjenje rizika	Dodatne informacije
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L

Opis oznaka:

A- Referentni broj stavke- jedinsteni broj za određenu stavku ili element;

B- Funkcija- obuhvaća sve funkcije ili podfunkcije stavke ili elementa;

C- Operativni postupci- opis operativnog postupka (npr. integritet bušotine je oštećen, integritet bušotine je održavan, integritet bušotine je izgubljen);

D- Stanje oštećenja- uzrok nastanka oštećenja, odnosi se na prethodno navedene pojmove koje stručno osoblje FMECA analize treba razumjeti (npr. nemogućnost otvaranja ili zatvaranja ventila zbog oštećenja ventila)

E- Uzrok oštećenja- objašnjenje nastanka oštećenje (npr. uzrok je ljudska greška ili uzrok je potrošenost materijala, korozija, erozija, itd.).

F- Detekcija oštećenja- da li je oštećenje otkriveno ili neotkriveno, skriveno ili evidentirano.

G- Utjecaj na podsustave- Posljedice na podsustave mogu se klasificirati kao sigurne ili opasne.

H- Utjecaj na cijeli sustav- Ista klasifikacija posljedica kao i za podsustave (sigurno ili opasno).

I- Učestalost oštećenja- broj oštećenja u određenom vremenskom period (npr. jedno oštećenje u 10 godina, 5 oštećenja u 100 godina).

J- Rang ozbiljnosti oštećenja- razmjer oštećenja i moguće posljedice (npr. degradiranje sustava izvan prihvatljivih granica, oštećenje dovodi do ozljeda i nemogućnosti provedbe planiranog).

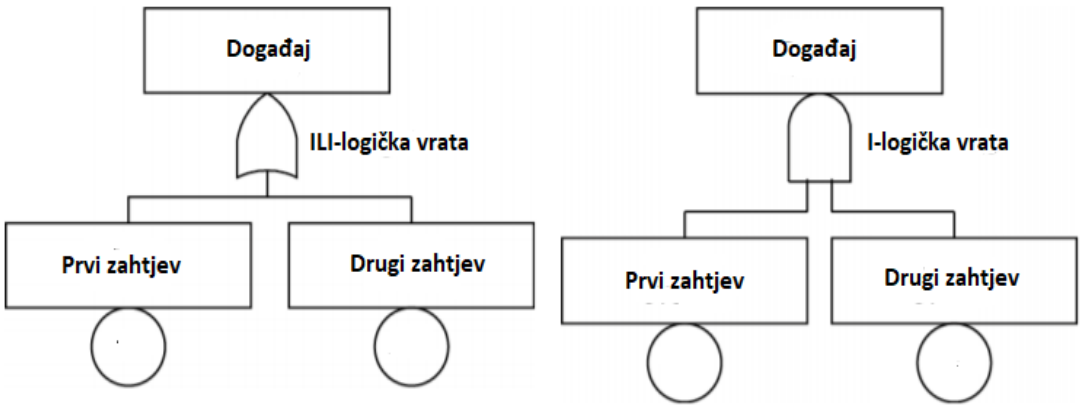
K- Mjere za smanjenje rizika- podjela na mjere koje sprječavaju oštećenje i mjere koje smanjuju rang ozbiljnosti oštećenja.

L- Dodatne informacije- dodatni komentari, napomene.

2.3.2. Analiza FTA

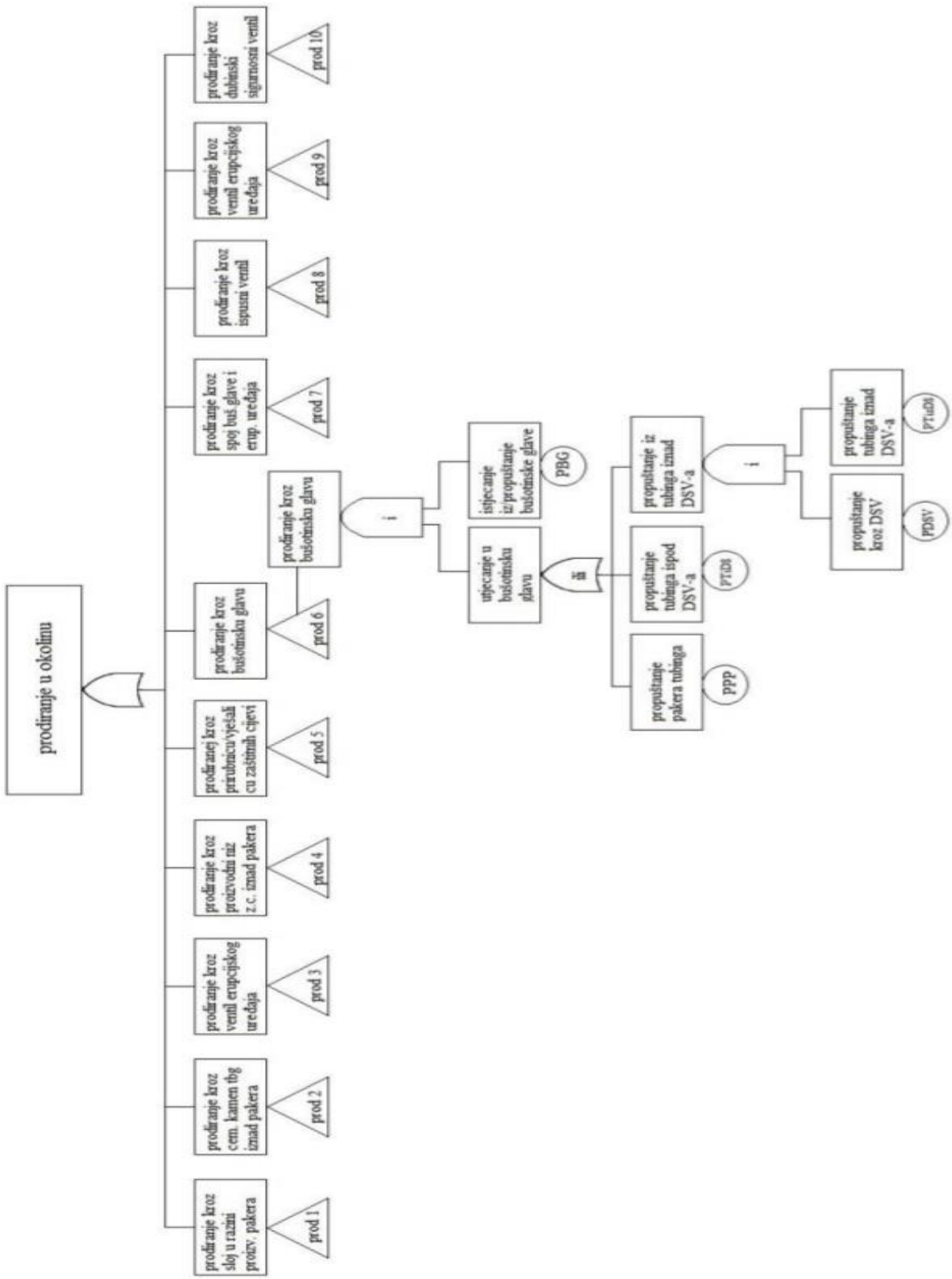
Analiza stabla kvarova je hibridna tehnika koja objedinjuje kvalitativne i kvantitativne metode prilikom analize pouzdanosti integriteta bušotine. Glavna namjena analize stabla kvarova je otkriti zašto je došlo do određenog kvara. Provedba analize temelji se na deduktivnom pristupu koji se bazira na definiranju kvara sustava, te se ispituju događaji koji mogu uzrokovati kvar sustava. Glavni elementi analize stabla kvarova su:

1. vršni događaj - opisuje vrstu kvara sustava, gdje se nalazi pozicija kvara (npr. na bušotinskoj glavi), te predviđa kada se kvar može dogoditi;
2. logička vrata - podjela: a) i (engl. *and*)- definira ostvarenje događaja ako se ostvari jedan ili drugi zahtjev, preduvjet
   b) ili (engl. *or*)- definira ostvarenje događaja ako se ispuni i prvi i drugi zahtjev, preduvjet (slika 2-11).



Slika 2-11. Grafički prikaz logičkih vrata (WIF, NTNU & UiS, 2012).

Osnovni događaj analize stabla kvarova predstavlja najnižu razinu događaja (npr. ljudska greška, kvar opreme, vanjski utjecaji) koji mogu pokrenuti razvoj oštećenja sustava. Na slici 2-12 je prikazan grafički način razvoja analize stabla kvarova na osnovu dijagrama barijera s prethodne slike 2-9.



Slika 2-12. Grafički prikaz analize stabla kvarova (WIF, NTNU & UiS, 2012).

Nomenklatura slike 2-12:

a) prod- prodiranje;
b) PBG- propuštanje bušotinske glave;
c) PPP- propuštanje pakera tubinga;
d) DSV- dubinski sigurnosni ventil;
e) PtiDS- propuštanje tubinga ispod dubinskog sigurnosnog ventila;
f) PtizDS- propuštanje tubinga iznad dubinskog sigunosnog ventila;
g) PDSV- propuštanje tubinga kroz dubinski sigurnosni ventil.

Najveća prednost analize stabla kvarova leži u tome što većina osoblja može razumjeti analizu zbog svoje jednostavnosti, a ujedno i zbog kvalitativnih i kvantitativnih tehnika analiziranja svih mogućih prodora integriteta barijere. Stoga je analiza stabla kvarova najčeća metoda koja se koristi za otkrivanje uzroka oštećenja integriteta barijera kanala bušotine (WIF, NTNU & UiS, 2012).

Prema NORSOK D-010 standardu postoje kriteriji zaustavljanja bušotinskih operacija ili drugih aktivnosti, ukoliko postoj mogućnost rizika koji će dovesti do nepoželjne situacija i narušavanja integriteta bušotine čija posljedica može biti pogubna za ljudstvo, okoliš i opremu. Kriteriji za zaustavljanje uobičajenih operacija i aktivnost su sljedeći (Norsok Standard D-010, 2013):

a) oslabljenje elementa barijere/barijere ili gubitak barijere/elementa barijere;
b) kada postoji mogućnost prekoračenje radnih granica opreme za kontrolu bušotine;
c) kada količine sadržaja H_2S-a i CO_2 u tekućem ili u plinovitom stanju prelaze dopuštene vrijednosti kojima ljudi, oprema i okoliš mogu biti izloženi.

3. BARIJERE I ELEMENTI ZA ODRŽAVANJE INTEGRITETA TIJEKOM OPERACIJA U BUŠOTINI

Hidraulički i mehanički elementi primarnih i sekundarnih barijera imaju glavnu svrhu spriječiti nekontrolirani dotok fluida i gubitak cjelokupnog integriteta kanala bušotine. Slika 3-1 prikazuje požar poluuronjive platforme "Deepwater Horizont" u Meksičkom zaljevu koja se desila uslijed gubitka integriteta kanala bušotine. Tijekom operacija i aktivnosti u kanalu bušotine, važna je činjenica da se pojedine primarne i sekundarne barijere ne koriste prilikom samo jedne operacije, nego tijekom cijelog životnog ciklusa bušotine s time da se uloga barijere može mijenjati istovremeno s operacijom koja se izvodi u bušotini. Pri tome se misli da barijera koja je bila primarna u pojedinoj operaciji, može imati sekundarnu funkciju u nekoj drugoj operaciji u kanalu bušotine i obrnuto. U ovom poglavlju fokus će biti usmjeren na hidrauličke i mehaničke elemente barijera koji su obavezni i učestali prilikom različitih operacija u bušotini, te će ujedno biti opisana konstrukcija primarnih i sekundarnih barijera prilikom glavnih operacija u bušotini kao što su sama izrada kanala bušotine odnosno bušenje, eksploatacija ležišta ugljikovodika, opremanje i održavanje kanala bušotine i privremeno ili trajno napuštanje bušotine.



Slika 3-1. Požar poluuronjive platforme „Deepwater Horizon" u Meksičkom zaljevu (Wellcem, 2017a)

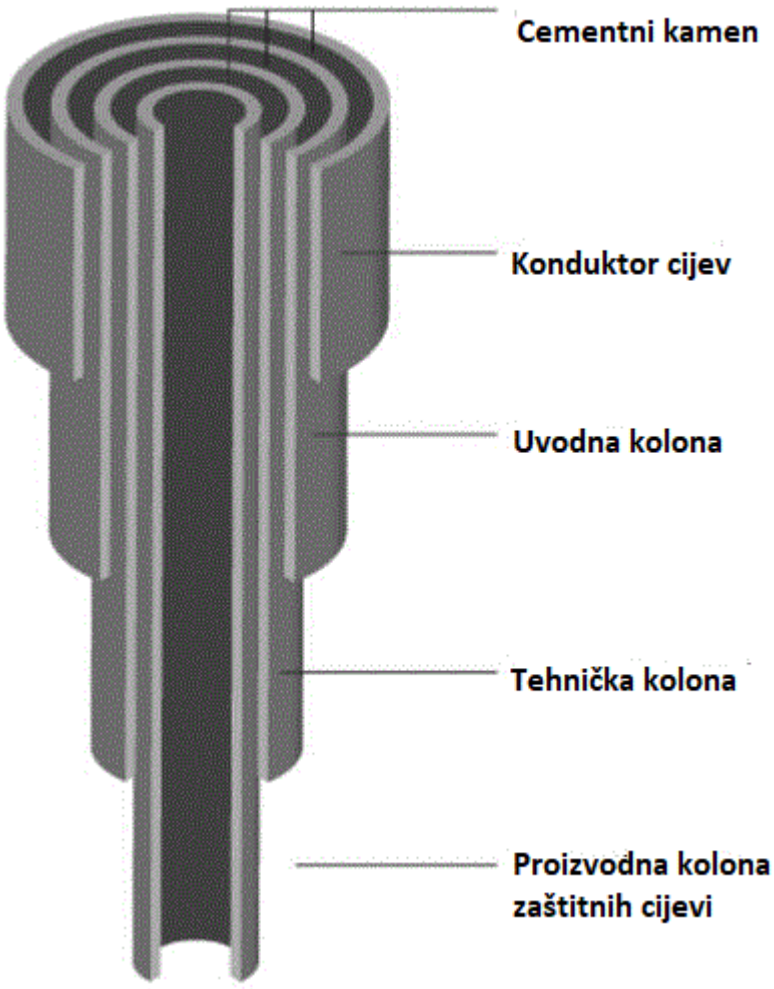
3.1. Elementi barijera za uspostavljanje integriteta kanala bušotine

Elementi barijera su zaštitni dijelovi koji izgrađuju sustav primarnih i sekundarnih barijera i fizički osiguravaju hidraulički i mehanički integritet kanala bušotine. Svi elementi barijere moraju se ispitati i provjeriti kako bi se mogli koristiti kao elementi barijere. Neki elementi se koriste tijekom cijelog životnog ciklusa bušotine, poput zaštitnih cijevi i cementnog kamena, dok se neki koriste samo prilikom određenih operacija u bušotini kao što su isplaka za bušenje i tubing tijekom eksploatacije ležišta. Održivi integritet kanala bušotine se sastoji od širokog spektra elemenata koji se mogu mijenjati s obzirom na operacije povezane s kanalom bušotine, stoga oni najvažniji elementi barijera od same izrade kanala bušotine pa sve do napuštanja će biti opisani u nastavku teksta. Osnovni elementi barijera koji ostvaruju hidraulički i mehanički integritet kanala bušotine i bez kojih konstrukcija i aktivnosti unutar bušotine bi bile nezamislive su sljedeći:

a) kolona zaštitnih cijevi (engl. *casing*);
b) cementni kamen (engl. *casing cement*);
c) isplaka pri izradi bušotine (engl. *drilling mud*);
d) tubing (engl. *tubing*);
e) preventerski sklop (engl. *blowout preventer*);
f) bušotinska glava i erupcijski uređaj (engl. *wellhead and christmas tree*);
g) dubinski sigurnosni ventil (engl. *downhole safety valve*);
h) vješalica tubinga i zaštitnih cijevi (engl. *tubing and casing hanger*);
i) proizvodni paker (engl. *production packer*);
j) cementni čep (engl. *casing cement plug*);
k) ostali elementi.

3.1.1. Kolona zaštitnih cijevi

Zaštitne cijevi su masivne cijevi velikog promjera koje se prilikom bušenja ugrađuju u kanal bušotine. Osnovni im je zadatak spriječiti urušavanje kanala bušotine i frakturiranje formacija u okruženju bušotine do kojeg može doći prilikom povećanja ekvivalentne gustoće isplake pri bušenju koja je potrebna za uravnoteženje ležišnog tlaka koji se povećava s dubinom. Konstrukcije zaštitnih cijevi međusobno se razlikuju s obzirom na unutarnji i vanjski promjer, debljinu stijenke, kvalitetu materijala i vrstu navojnih spojeva. S obzirom na različite konstrukcije i namjene bušotina, dubine, očekivane tlakove i temperature, konstrukcija kolone zaštitnih cijevi se razlikuje od bušotine do bušotine. Na slici 3-2 prikazana je uobičajena konstrukcija kanala bušotine.



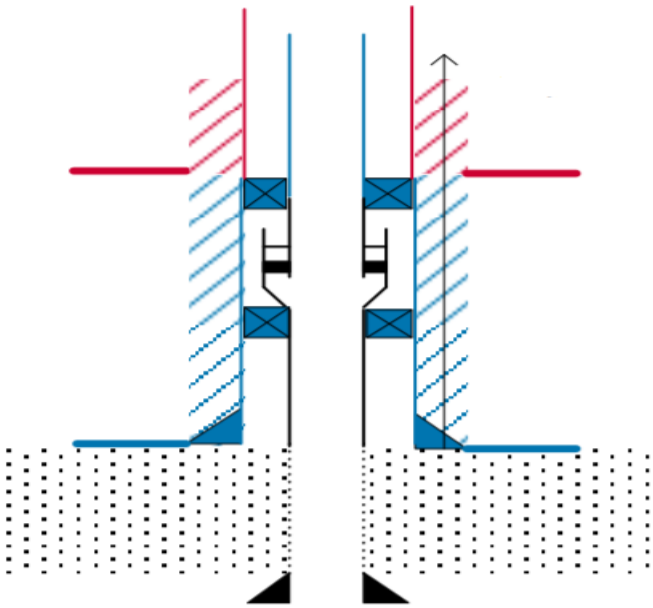
Slika 3-2. Klasična konstrukcija kanala bušotine (Seg library, 2018)

Prilikom izbora zaštitne cijevi bitno je uzeti u obzir otpornost cijevi na gnječenje, rasprskavanje, vlačna i tlačna opterećenja. Zaštitne cijevi tijekom cijelog životnog vijeka bušotine čine barijeru koja osigurava integritet kanala bušotine. Tijekom operacije bušenja, zaštitne cijevi su sekundarna barijera, a prilikom aktivnosti održavanja i opremanja, proizvodnje i napuštanja bušotine objedinjuju funkcije održavanja integriteta kao mehanički element primarne i sekundarne barijere kanala bušotine (Wikiwand, 2017).

3.1.2. Cementni kamen

Cementni kamen je izuzetno važan element primarne i sekundarne barijere bušotine za održavanje integriteta bušotine od same faze izrade kanala bušotine do faze privremenog i trajnog napuštanja bušotine (slika 3-3). Kako bi se osigurao kvalitetan integritet kanala bušotine, važno je da se cementni kamen dobro veže za okolne stijene i zaštitne cijevi. Postupak provjere kvalitete veze između cementa i zaštitnih cijevi odnosno okolnih stijena obavlja se uz pomoć karotaže kvalitete cementne veze (engl. *cement bond log*) i uređaja koji emitiraju zvučne valove (engl. *sonic logging tool*). Provjeru kvalitete cementne veze treba redovito obavljati tijekom aktivnosti u kanalu bušotine zbog činjenice što tlačna ispitivanja integriteta cementnog kamena mogu provjeriti integritet cementnog kamena samo na razini pete kolone zaštitnih cijevi. Također udaljenost između primarne i sekundarne barijere mora se procijeniti tako da svaki rizik od urušavanja formacije ne uzrokuje istovremeno oštećenje cementnog kamena u sastavu primarne barijere i cementnog kamena kao elementa sekundarne barijere. Prema NORSOK D-010 standardu cementna barijera mora imati sljedeća svojstva:

- nepropusnost,
- dugoročni integritet,
- duktilnost, tj. sposobnost da izdrži mehanička opterećenja,
- otpornost na različite kemikalije i kemijske spojeve (npr. plinove H_2S, CO_2),
- vlažnost, tj. svojstvo koje omogućuje bolje vezanje za čelik,
- mehaničku stabilnost.



Slika 3-3. Cementi kamen kao element primarne i sekundarne barijere (WIF, NTNU & UiS, 2012)

Visina cementnog kamena ovisi o tlaku, ali postoje minimalni zahtjevi visine cementnog kamena koje treba ispuniti. Opći pristup nalaže da visina cementnog kamena treba biti najmanje 100 metara u odnosu na petu kolone zaštitnih cijevi koja se cementira. Konduktor kolona se cementira ovisno o integritetu formacije. Uvodna kolona zašitinih cijevi cementira se cijelom visinom od pete kolone do ušće bušotine, dok proizvodna kolona zahtjeva cementiranje minimalno 200 metara u odnosu na petu proizvodne kolone zaštitnih cijevi (Norsok Standard D-010, 2013).

3.1.3. Isplaka pri bušenju

Isplaka koja se koristi tijekom bušenja je viskozna mješavina aditiva i tekućina (voda, ulje, sintetički spojevi) čiji osnovni zadatak je ostvarivanje hidrauličke, primarne barijere prilikom izrade kanala bušotine uz pomoć hidrostatskog tlaka kojim ostvaruje protutlak na nabušene stijene sprječavajući nekontrolirani dotok fluida i urušavanje slojeva. Prilikom bušenje omogućuje iznošenje nabušenih krhotina, održava stabilnost kanala bušotine, te podmazuje i hladi dlijeto (engl. *drill bit).* S obzirom da isplaka osigurava primarnu barijeru kanala bušotine

tijekom bušenja, tablica 3-1 prikazuje koje kriterije prema NORSOK D-010 standardu mora ispuniti kako bi bila prihvatljiva za očuvanje i održavanje integriteta bušotine.

Tablica 3-1. Kriterij prihvatljivosti isplake (Norsok Standard D-010, 2013)

Značajke	Kriterij prihvatljivosti	Veza
A: Opis	Isplaka	NORSOK D-001
B: Funkcija	Osiguravanje hidrostatskog tlaka koji će spriječiti nekontrolirani dotok fluida u bušotinu.	
C: Dizajn (kapacitet, rang i funkcija), konstrukcija i odabir	1) Hidrostatski tlak cijelo vrijeme mora biti jednak ustanovljenom ležišnom tlak uvećanom za vrijednost margine tijekom manevriranja alatkama. 2) Kritična svojstva isplake moraju biti poznata prije upotrebe. 3) Gustoća isplake u bušotini mora biti stabilna kada se ne vrši cirkulacija. 4) Hidrostatski tlak ne smije premašiti vrijednost tlaka frakturiranja uključujući i marginu kojom se sprječava dotok slojnog fluida. 5) Vrijednosti promjene tlaka tijekom spuštanja i izvlačenja alata i ekvivalentna gustoća isplaka moraju biti ustanovljeni i održani iznad sigurnosne margine.	ISO 10416
D: Početno ispitivanje i potvrda	1) Potvrda stabilne razine isplake u kanalu bušotine. 2) Potvrda kritičnih svojstava isplake, uključujući gustoću.	
E: Upotreba	1) Trebalo bi biti moguće cijelo vrijeme održavati razinu isplake u bušotini cirkulacijom ili nadopunjavanjem. 2) Potrebno je regulirati i održavati svojstva isplake na osnovu referentnih svojstava. 3) Prihvatljive količine gubitaka isplake u sloj u statičkim i dinamičkim uvjetima moraju biti unaprijed definirane. Ako postoji rizik od gubitka cirkulacije, zamjenski materijal trebao bi biti dostupan.	

Značajke	Kriterij prihvatljivosti	Veza
	4) Treba osigurati dovoljan volumen isplake, a isto tako i materijal za nepredviđene situacija. 5) Zamjena isplake za bušenje u bazenu ili bušotini treba se oprezno vršiti bez utjecaja na radna svojstva sustava. 6) Parametri koji su potrebni za ponovno uspostavljanje barijere trebaju se sustavno bilježiti i dokumentirati u radnom listu.	
F: Nadziranje	1) Konstantno nadziranje razine isplake u bušotini i bazenu za isplaku. 2) Konstantno nadziranje povratnog toka isplake. 3) Nadziranje razine protoka najmanje 10 minuta, a u HPHT bušotinama 30 minuta. 4) Redovito praćenje gustoće isplake. 5) Potrebno je svakih 12 sati mjeriti vrijednosti svojstava isplake i usporediti ih sa referentnim. 6) Nadziranje parametara za gušenje bušotine.	ISO 10414-1 ISO 10414-2
G: Zajednička barijere	Ne postoji	

Isplake su većinom na bazi slatke vode, ali postoje i isplake na bazi slane vode, ulja, sintetičkih materijala, itd. Odabir isplake ovisi o troškovima, tehničkim svojstvima i utjecaju na okoliš. Tipične isplake na bazi vode u svome sastavu sadrže mineral gline bentonit koji daje dovoljnu viskoznost isplaci za efikasno iznošenje krhotina, dok mineral barit osigurava dovoljnu gustoću da stabilizira i održava integritet kanala bušotine (Petrowiki, 2015a).

3.1.4. Tubing

Kolona uzlaznih cijevi, odnosno tubing su čelične cijevi koje su također kao i zaštitne cijevi standardizirane prema API standardu (slika 3-4). Osnovna zadaća tubinga je omogućiti

otvoren prolazak fluida iz ležišta do površine, te spriječiti prodor fluida u pripadajući prstenasti prostor. Prije ugradnje samog tubinga u kanal bušotine potrebno je definirati minimalan dozvoljeni kriterij opreme s obzirom na očekivana opterećenja, temperaturu, koroziju i trošenje. Tubing tijekom eksploatacije ležišta ostvaruje primarnu barijeru u svrhu očuvanja integriteta kanala bušotine. Brtvljenje spoja tubinga ostvaruje se dosjedom metal na metal gdje mazivo ispunjava praznine između navoja, stoga treba osigurati kvalitetan spoj kako ne bi došlo do narušavanja integriteta primarne barijere.



Slika 3-4. Tubing (Imri, 2020)

Tubing uglavnom ima nominalne vanjske promjere od 6,03 cm (2,375 in) do 11,43 cm (4,5 in). Premali unutarnji promjer tubinga uzrokuje velike gubitke uslijed trenja pri protoku fluida i ograničava protok kroz bušotinu, dok preveliki unutarnji promjer tubinga može uzrokovati nestabilan protok fluida. Vrlo je važno prilikom izbora tubinga uzeti u obzir sljedeće čimbenike: vlačno i tlačno naprezanje, otpornost na gnječenje i rasprskavanje, izvijanje, zazor spojeva, protočna svojstva, kvalitetu materijala s obzirom na abrazivne fluide i utjecaj temperature (Petrowiki, 2015b).

3.1.5. Preventerski sklop

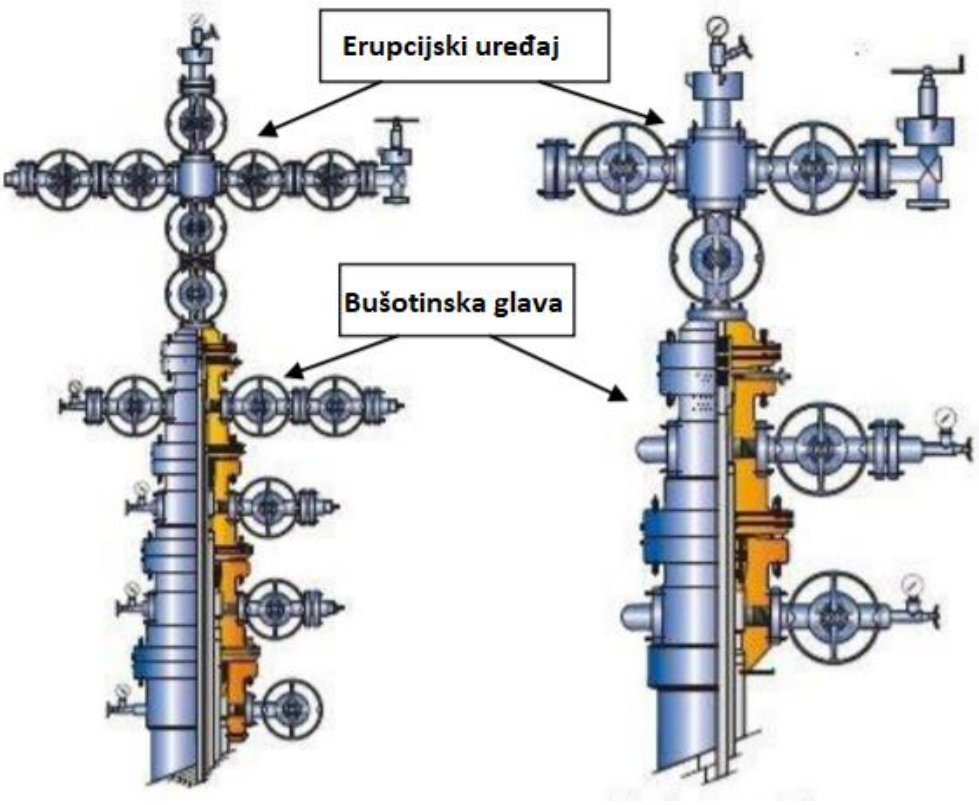
Preventerski sklop postavlja se na ušće bušotine i primarna mu je zadaća kontrola tlaka u bušotini i sprječavanje erupcije slojnog fluid na površinu. Preventerski sklop je najčešće sekundarna barijera za očuvanje integriteta bušotine. Postoje različite vrste preventerskih sklopova koji se međusobno razlikuju s obzirom na dimenzije, konfiguraciju i radne tlakove. Budući da je preventerski sklop jako važan element za zaštitu integriteta bušotine, oni se moraju redovito pregledavati i ispitivati. Standardni preventerski sklop se sastoji od prstenastog preventera i sustava čeljusnih preventera (slika 3-5). Prstenasti preventer osigurava brtvljenje oko bušaćih cijevi, tubinga, opreme na žici, itd., dok sustav čeljusnih preventera može sadržavati čeljusti za rezanje, prihvat, zatvaranje prstenastog prostora ili zatvaranje punog presjeka kanala bušotine. Prema standardima API 16A i ISO 13533, dijelovi preventerskog sklopa prilikom ispitivanja trebaju biti izloženi djelovanju fluida iz bušotine (Blaauw, 2012).



Slika 3-5. Preventeski sklop (Noia, 2020)

3.1.6. Bušotinska glava i erupcijski uređaj

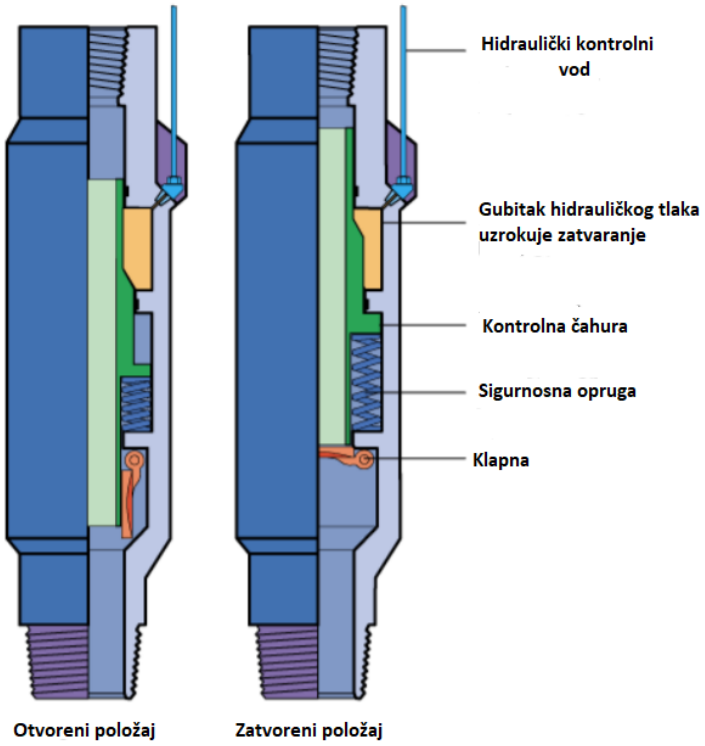
Bušotinska glava je sustav komponenti na ušću plinskih i naftnih bušotina koje se nalaze između preventerskog sklopa i vrha kolone zaštitnih cijevi. Primarna zadaća bušotinske glave je kontrola i zadržavanje tlaka iz bušotine, omogućuje potporu za sve zaštitne cijevi i tubing koji su ovješeni u pripadajućim vješalicama, te osigurava mjesto za spajanje erupcijskog uređaja. Svaka pojedina kolona zašitinih cijevi ima svoju vlastitu prirubnicu i brtvenu komponentu unutar kućišta bušotinske glave, te one predstavljaju važan element sekundarne barijere za održavanje integriteta bušotine. Na vrh bušotinske glave postavlja se erupcijski uređaj, sklop zasuna i sapnica koji osigurava površinsku kontrolu tlaka i kontrolira protok fluida koji se pridobiva. Bušotinska glava se obično zavaruje na prvu kolonu zaštitinih cijevi koja je tijekom bušenja zacementirana. Na slici 3-6 su prikazani primjeri bušotinske glave s pripadajućim erupcijskim uređajem (WIF, NTNU & UiS, 2012).



Slika 3-6. Bušotinska glava i pripadajući erupcijski uređaj (WIF, NTNU & UiS, 2012)

3.1.7. Dubinski sigurnosni ventil

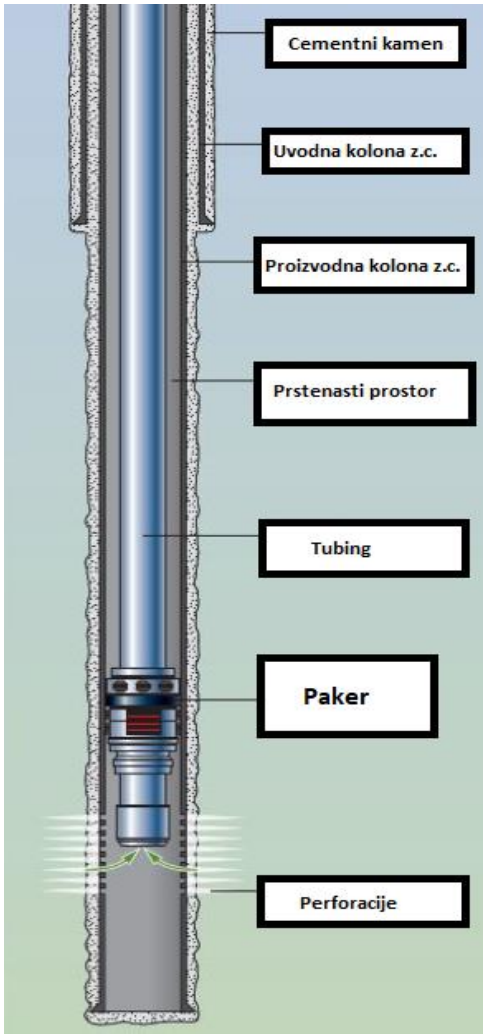
Kao dio tubinga, dubinski sigurnosni ventil je izrazito važan element primarne i sekundarne barijere u bušotini. Dubinski sigurnosni ventil je zapravo ventil koji se automatski zatvara ako dođe do pada tlaka u hidrauličkom vodu koji upravlja njegovim radom. Kada se ventil nalazi u zatvorenom položaju, tada on predstavlja primarnu barijeru i izolira prodor ležišnog fluida do površine. Glavna zadaća dubinskog sigurnosnog ventila je da sprječava nekontrolirani prodor ležišnog fluida u slučaju izvanrednog zatvaranja bušotine ili u gorem slučaju kada dođe do eksplozije na prostoru postrojenja i izgubi se ili ošteti integritet bušotinske glave i erupcijskog uređaja. Dubinski sigurnosni ventil se sastoji od hidrauličkog voda koji kontrolira tlak za otvaranje i zatvaranje s površinskog kontrolnog panela, sigurnosne opruge, kontrolne čahure i zaklopca (eng. *flapper*) (slika 3-7). Preporučeni položaj dubinskog sigurnosnog ventila unutar tubinga je između 100 i 500 metara ispod ušća bušotine (WIF, NTNU & UiS, 2012).



Slika 3-7. Dubinski sigurnosni ventil u otvorenom i zatvorenom položaju (WIF, NTNU & UiS, 2012)

3.1.8. Paker

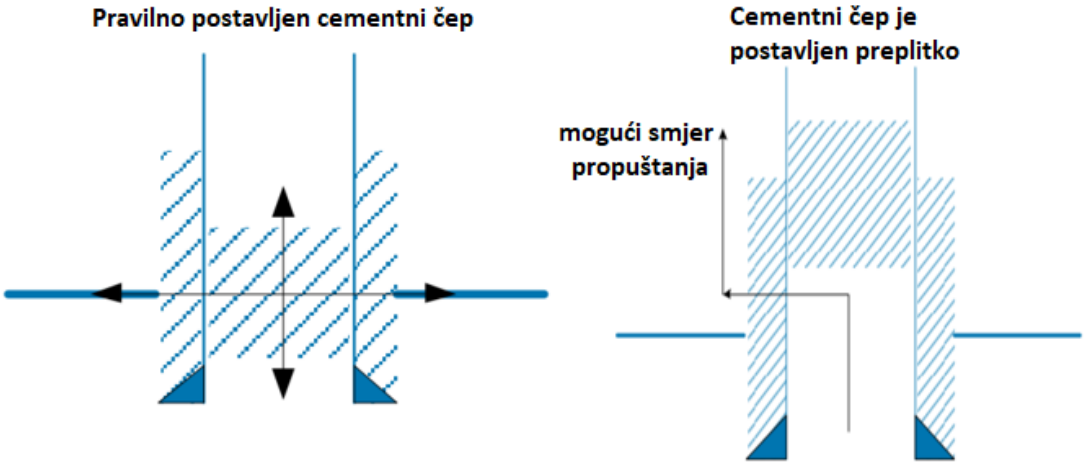
Paker je standardna komponenta tubinga u bušotini koji omogućuje brtvljenje i usmjeravanje proizvodnog fluida kroz unutrašnjost tubinga do površine. Paker se spušta u bušotinu na tubingu ili uz pomoć opreme na žici. Uobičajno je smješten u blizini završetka tubinga u bušotini ili nedaleko iznad vrha perforacija. Integritet pakera osigurava zaštitu od djelovanja tlaka i pridobivenog fluida na zaštitne cijevi, a time osigurava primarnu barijeru u bušotini. Također se može koristiti za izoliranje intervala s oštećenim zaštitnim cijevima (npr. korozija i propuštanje) ili proizvodnih intervala koji su prethodno napušteni. Slika 3-8 prikazuje položaj pakera u eksploatacijskoj bušotini.



Slika 3-8. Položaj pakera u eksploatacijskoj bušotini (Schlumberger, 2015)

3.1.9. Cementni čep

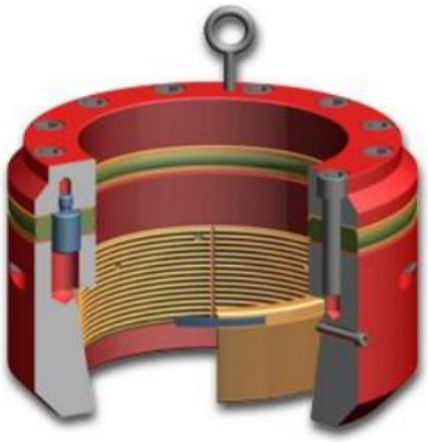
Cementni čep se obično koristi kao element primarne barijere prilikom privremenog napuštanja bušotine zajedno sa zacementiranim zaštitnim cijevima i vanjskim integritetom okolnih formacija. Cementni čep ima svrhu barijere koja će spriječiti protok fluida iz kanala bušotine kroz sami čep, a naknadno i na površinu. Minimalna dubina postavljanja cementnog čepa je propisana NORSOK D-010 standardom, dok dubina postavljanja za pojedinu bušotinu ovisi o tlaku i vertikalnoj dubini bušotine. Slika 3-9 prikazuje pravilno i nepravilno postavljen cementni čep (WIF, NTNU & UiS, 2012).



Slika 3-9. Pravilan i nepravilan položaj cementnog čepa u kanalu bušotine (WIF, NTNU & UiS, 2012)

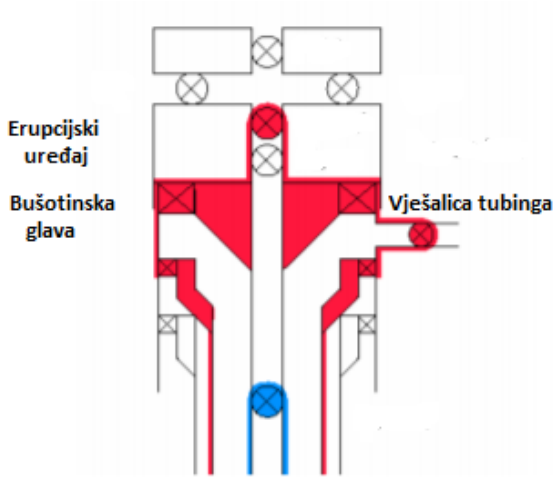
3.1.10. Vješalica zaštitnih cijevi i tubinga

Vješalice zaštitinih cijevi su komponente bušotinske glave koje osiguravaju potporu pojedine kolone zaštitinih cijevi spuštene u kanal bušotine. Zaštitne cijevi su tijekom ugradnje u kanal bušotine ovješene ili slobodne od strane vješalice zaštitinih cijevi koja je pričvršćena na ramenima pripadajuće prirubnice unutar kućišta bušotinske glave. Vješalice se obično ugrađuju zavarivanjem ili pričvršćivanjem na vrh zaštitnih cijevi. Ugradnja vješalice zaštitnih cijevi unutar prirubnice koja sadrži brtvene elemente, predstavlja sekundarnu barijeru pri konstrukciji proizvodnih bušotina. Slika 3-10 prikazuje vješalicu zaštitnih cijevi s brtvenim elementima.



Slika 3-10. Vješalica zaštitnih cijevi (WIF, NTNU & UiS, 2012)

Vješalica tubinga je izrađena od čeličnog tijela s vanjskim brtvenim elementima, te je kao i vješalica zaštitnih cijevi obješena u kućištu bušotinske glave. Namjena vješalice tubinga je da podupire težinu tubinga u bušotini, osigura brtvljenje između tubinga i bušotinske glave odnosno erupcijskog uređaja i da omogući prolazak kablova i uređaja za mjerenje temperature i tlaka kroz tubing. Slika 3-11 prikazuje vješalicu tubinga ugrađenu u bušotinsku glavu kao dio sekundarne barijere (crvena boja) za održavanje integriteta kanala bušotine (WIF, NTNU & UiS, 2012)



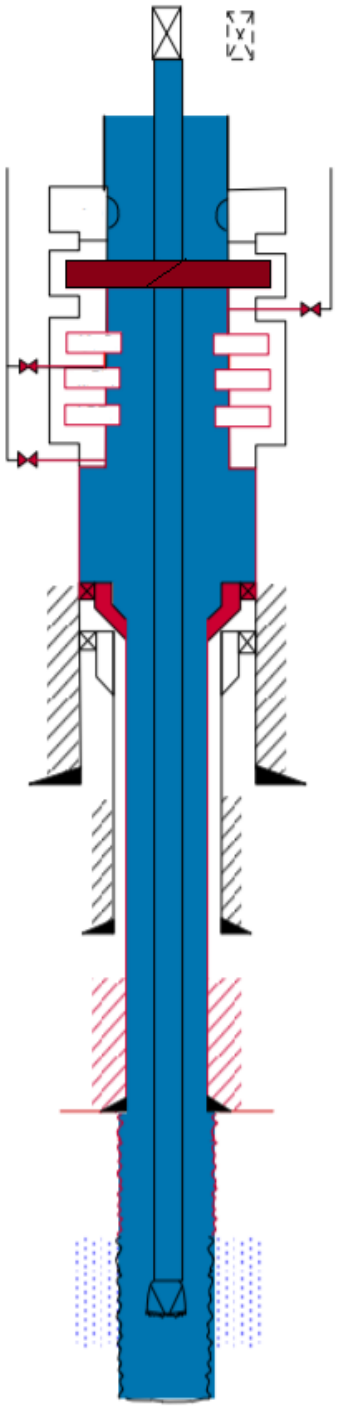
Slika 3-11. Vješalica tubinga (WIF, NTNU & UiS, 2012)

3.2. Primarne i sekundarne barijere pojedinih operacija u bušotini

Važnost kontrole sigurnosti tijekom raznih operacija u bušotini ne smije se nikako podcijeniti, stoga međunarodna i državna regulatorna tijela i standardi preporučuju postojanje dvije neovisne barijere koje će očuvati integritet kanala bušotine i spriječiti nekontrolirani dotok fluida iz formacija u bušotinu, odnosno nekontroliranu erupciju na površinu. Norsok D-010 standard definira zahtjeve za integritet bušotine i to za svaku pojedinu operaciju, uključujući tablice o dozvoljenom korištenju barijera koje su definirane tehničkim i operativnim zahtjevima i koje je potrebno ispuniti kako bi se pripadajućoj barijeri potvrdila temeljna namjena. Postupak planiranja operacija od izrade bušotine pa sve do njenog napuštanja, podrazumijeva postojanje dvije neovisne barijere koje će s obzirom na operativnu aktivnost uključivati razne uloge i elemente čiji zajednički cilj je održati cjelokupan integritet kanala bušotine.

3.2.1. Primarne i sekundarne barijere tijekom bušenja

Tijekom faze bušenja izrazito je važno da se integritet bušotine održava kontroliranjem stabilnosti kanala bušotine hidrostatskim tlakom isplake koji čini primarnu barijere, te sprječava urušavanje naslaga u okruženju bušotine. Također, treba osigurati da su kolone zaštitnih cijevi pravilno ugrađene, tako da opterećenja i naprezanja koja djeluju na kolonu zaštitinih cijevi ne ugrožavaju njihov integritet. Bušenje dubokih kanala bušotine i rotacija dlijeta može uzrokovati habanje i trošenje kolone zaštitnih cijevi, stoga tijekom planiranja izrade bušotine te čimbenike treba uzeti u obzir, a naročito prilikom izrade koso usmjerenih ili horizontalnih kanala bušotine. Na slici 3-12 je prikazan shematski prikaz primarnih i sekundarnih barijera tijekom bušenja. Plavom bojom je označen fluid za bušenje (isplaka) koji ostvaruje hidrauličku primarnu barijeru, dok cementni kamen, preventerski sklop, vješalica zaštitnih cijevi i bušotinska glava predstavljaju sekundarnu barijeru koja je označena crvenom bojom. U zadnjem desnom stupcu tablice sa slike nalazi se opis potvrde da element odgovara svojoj namjeni, obično su to ispitivanja koja treba obaviti nakon ugradnje elementa u kanal bušotine.



Podaci o bušotini:			
Ležišno polje		xxxxx	
Broj bušotine	xx/xx-xx	Datum početka bušenja	DD.MM.YYYY
Vrsta bušotine		npr. proizvodnja nafte	
MDTUB:		xxx bar	
Broj revizije:	x	Datum:	DD.MM.YYYY
Stanje bušotine:		BUŠENJE	
Priprema:		xxxxx (Ime i potpis)	
Potvrda:		xxxxx (Ime i potpis)	

Elementi barijera bušotine:		Potvrda elementa barijere:
Primarna barijera		
Fluida za bušenje:		Provjera protoka/stabilna razina fluida
Sekundarna barijera		
Formacija kod pete kolone:		FIT to x.xx kg/m3 EMW
Cementni kamen proizvodne kolone zaštitnih cijevi		Duljina : xx mMD > peta kolone Metoda: mjerenje volumena/kontrola i FIT/LOTdo x.xx kg/m3 EMW na peti kolone
Proizvodna kolona z.c.		PT: xxx bar sa x.x kg/m3
Vješalica tubinga sa brtvenim elementima		PT: xxx bar sa x.x kg/m3
Bušotinska glava		PT: xxx bar sa x.x kg/m3
Uvodna kolona z.c.		PT: xxx bar sa x.x kg/m3
Preventerski sklop		PT: xxx bar sa x.x kg/m3

Nomenklatura:

MD- mjerena dubina;
MDTUB- maksimalni dozvoljeni tlak na ušću bušotine;
EMW- ekvivalentna gustoća isplake (engl. *Equivalent Mud Weight*)
FIT- tlačni test integriteta stijene (engl. *Formation Integrity Test*)
LOT- test primanja stijena (engl. *Leak Off Test)*
PT- tlak ispitivanja

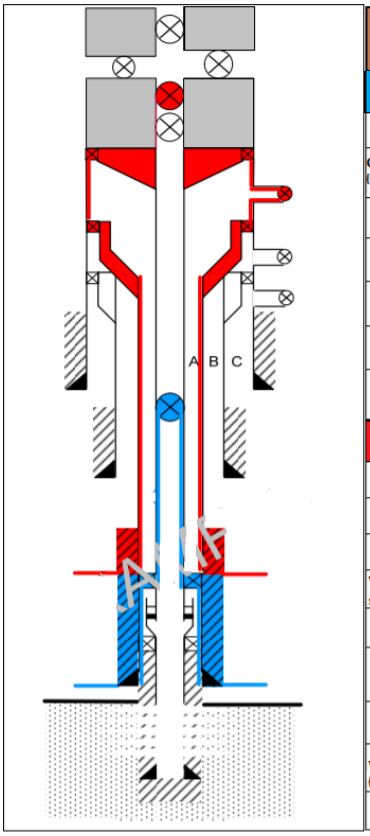
Zabilješke:

Problemi vezani za integritet bušotine:	Komentari:

Slika 3-12. Primarne i sekundarne barijere tijekom bušenja (WIF, NTNU & UiS, 2012)

3.2.2. Primarne i sekundarne barijere tijekom eksploatacije ležišta

Operacija eksploatacije ležišta započinje nakon što je izbušen kanal bušotine do proizvodnog sloja, te je ugrađen tubing određenog unutarnjeg promjera, proizvodni paker i svi ostali elementi eksploatacijske bušotine. Tijekom faze eksploatacije, shematski prikaz elemenata barijera je znatno drugačiji u odnosu na shematski prikaz tijekom bušenja. U usporedbi s fazom bušenja, puno je više elemenata ugrađeno unutar samog kanala bušotine, te je na površini postavljen erupcijski uređaj. Najviše problema koji mogu uzrokovati oštećenje ili gubitak integriteta kanala bušotine nastaje u eksploatacijskoj fazi bušotine. Razlog tomu je što eksploatacija ležišta čini najduži dio životnog ciklusa rada bušotine, a istovremeno tijekom pridobivanja fluida različitih viskoznosti, tlakova i temperature koji protječu kroz kanala bušotine može doći do dodatnih rizika. Na slici 3-13 prikazani su elementi primarne i sekundarne barijere tijekom eksploatacijske faze (WIF, NTNU & UiS, 2012).

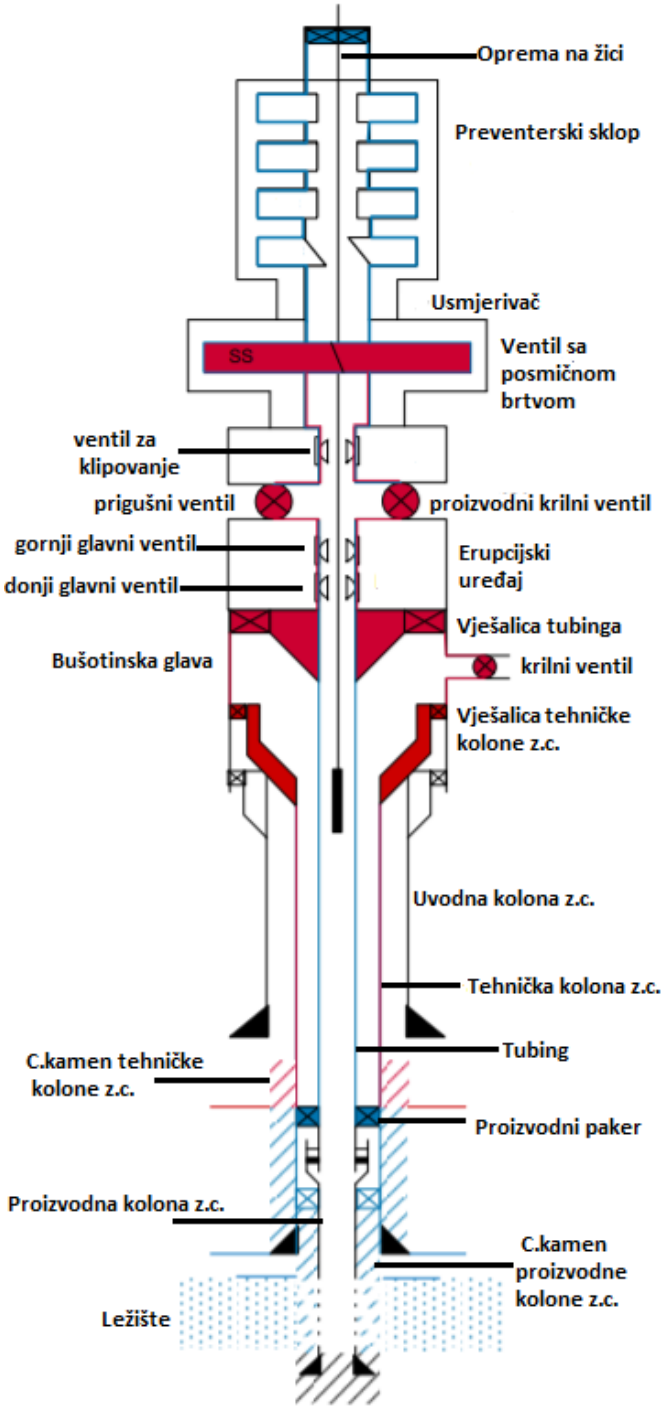


Elementi barijera bušotine:		Potvrda/Nadziranje:
Primarna barijera		
Nabušena formacija		Nije primjenjivo nakon početne potvrde
Cementni kamen (Od pete kolone z.c. do proizvodnog pakera)		Nije primjenjivo nakon početne potvrde
Zaštitne cijevi (ispod proizvodnog pakera)		Nije primjenjivo nakon početne potvrde
Proizvodni paker		Konstantno praćenje tlaka u A-prstenastom prostoru
Tubing		Konstantno praćenje tlaka u A-prstenastom prostoru
Komponente u sastavu tubinga		Periodično ispitivanje na propuštanje
Podzemni sigurnosni ventil		Periodično ispitivanje na propuštanje
Sekundarna barijera		
In situ formacija		Nije primjenjivo nakon početne potvrde
Cementni kamen (Iznad proizvodnog pakera)		Dnevno praćenje B-prstenastog prostora
Proizvodna kolona z.c. (Iznad proizvodnog pakera)		Dnevno praćenje B-prstenastog prostora
Vješalica proizvodne kolone z.c. sa brtvenim elementima		Dnevno praćenje B-p.p. /Periodično ispitivanje na propuštanje
Bušotinska glava (ventil prstenastog prostora)		Periodično ispitivanje ventila na propuštanje
Vješalica tubinga (tijelo vješalice)		Periodično ispitivanje na propuštanje i konstantno praćenje tlaka u A-prstenastom prostoru
Bušotinska glava (spoj sa erupcijskim uređajem)		Periodično ispitivanje na propuštanje
Vješalica tubinga (Vrat vješalice)		Periodično ispitivanje na propuštanje
Erupcijski uređaj		Periodično ispitivanje ventila na propuštanje

Slika 3-13. Primarne i sekundarne barijere tijekom eksploatacije ležišta (Norsok Standard D-010, 2013)

3.2.3. Primarne i sekundarne barijere tijekom opremanja i održavanja bušotina

Operacije opremanja i održavanja unutar kanala bušotine imaju primarni cilj ostvariti, održati ili povećati pridobivanje fluida, te ostvariti maksimalan profit uz minimalne troškove. Faza opremanja predstavlja opremanje izbušenog kanala bušotine prije faze eksploatacije. Opremanje ovisi o postupcima koji mu prethode ili slijede, a ovisno o tome sama faza opremanja uključuje sljedeće aktivnosti: povezivanje bušotine i proizvodne formacije, obradu proizvodne zone, opremanje bušotine tubingom i osvajanje bušotine ostvarivanjem proizvodnje. Faza održavanja djeli se na tekuće i kapitalne radove. Tekuće održavanje podrazumijeva radove u samom kanalu bušotine, dok kapitalno održavanje uključuje radove izvan same bušotine s ciljem povećanja proizvodnje ili promjene statusa bušotine. Održavanje obuhvaća sljedeće radove: ponovno perforiranje, kiselinske obrade, frakturiranje, uklanjanje kamenaca i parafina i utiskivanje fluida u bušotinu kako bi se potisnulo zavodnjenje i omogućila proizvodnja. U današnje vrijeme većina radova održavanja obavlja se uz pomoć postrojenja za rad s opremom na žici. Pokretna postrojenja za rad s opremom na žici omogućuju rad bez obzira na vrijednosti tlaka i temperature, te omogućuju ugradnju i vađenje razne opreme unutar kanala bušotine. Odabir i raspored elemenata primarne i sekundarne barijere tijekom opremanja uz pomoć opreme na žici vrlo je sličan kao i tijekom faze proizvodnje. Na slici 3-14 su prikazani tipični elementi primarne i sekundarne barijere tijekom održavanja bušotine uz pomoć opreme na žici. Kada je žica spuštena u kanala bušotine, tada su dubinski sigurnosni ventili van funckije, stoga treba na površini osigurati efektivnu primarnu barijeru u sklopu preventerskog sklopa koji također osigurava brtvljenja oko žice. Faza održavanja zahtijeva detaljnu procjenu rizika za svaku intervenciju unutar kanala bušotine (Pašić, 2018).



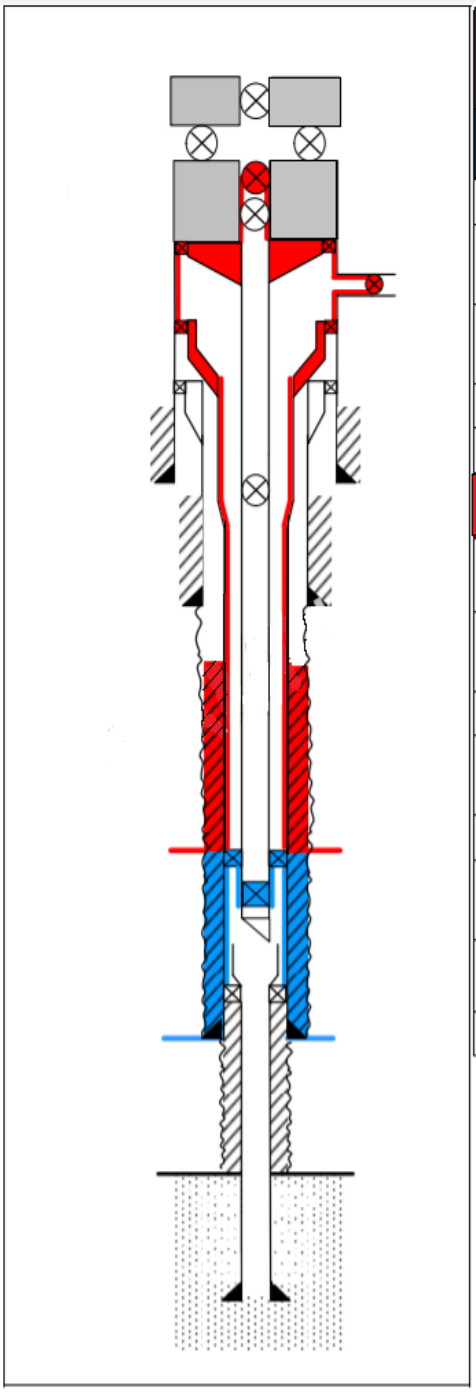
Slika 3-14. Primarne i sekundarne barijere tijekom izvođenja zahvata u bušotini primjenom postrojenja za rad s opremom na žici (WIF, NTNU & UiS, 2012)

3.2.4. Primarne i sekundarne barijere tijekom napuštanja bušotine

Prilikom operacije napuštanja bušotine, nakon postavljanja barijera kako bi se izolirale formacije jedne od drugih i površinski prostor bez namjere da ikad ponovno obavljamo radove u napuštenoj bušotini, napuštanje se smatra trajnim. Tamo gdje postoji namjera naknadnih operativnih aktivnosti u bušotini nakon napuštanja, to se naziva privremenim napuštanjem (obično nekoliko mjeseci). Osim podjele s obzirom na vremenski period napuštanja, jedina druga razlika između trajnog i privremenog napuštanja jest ta da barijera (uglavnom cementni kamen) koja održava integritet tijekom privremenog napuštanja ne treba ispunjavati cijeli kanala bušotine i prstenasti prostor kao kod trajnog napuštanja gdje cementni kamen ili alternativni materijal mora ispunjavati puni presjek bušotine, uključujući prstenasti prostor. Osim cementa, materijali koji se mogu koristiti kao barijere prilikom trajnog napuštanja su: termički polimeri, termoplastični polimeri, elastični polimeri, modificirani materijali, itd. Za privremena napuštanja uglavnom se koristi mehanička barijera koja mora biti dizajnirana za očekivano vrijeme trajanja napuštanja bušotine. Uostalom mehanički element predstavlja primarnu barijeru tijekom privremenog napuštanja, ali s obzirom na njegov propisani vremenski rok korištenja, potrebno je da privremeno napušteni kanal bušotine sadrži i ostale primarne i sekundarne barijere. Glavni ciljevi napuštanja bušotine su: zaštita rezervi koje su preostale u ležištu, zaštita slojeva slatke vode kroz koje prolazi kanal bušotine, sprječavanje površinskog onečišćenja i udovoljavanjem svim propisima (Wellcem, 2017b). Prema NORSOK D-010 standardu, privremeno napuštanje može se podjeliti na:

a) privremeno napuštanje - uz nadzor: status bušotine, gdje je bušotina napuštena, te se primarne i sekundarne barijere kontinuirano nadgledaju i rutinski ispituju. Ako se kriteriji nadzora ne mogu ispuniti, bušotina mora biti kategorizirana kao privremena napuštena bušotina bez nadzora;
b) privremeno napuštanje - bez nadzora: status bušotine, gdje je bušotina napuštena, a primarne i sekundarne barijere nisu kontinuirano pod nadzorom i nisu rutinski ispitane. Maksimalno razdoblje privremenog napuštanja može biti tri godine (Norsok Standard D-010, 2013).

Slika 3-15 prikazuje primarne i sekundarne barijere privremeno napuštene proizvodne bušotine uz daljnji nadzor.



Elementi barijere bušotine:	EAC tablice:	Potvrda/ nadziranje
Primarna barijera:		
In-situ formacija	51	
Cementni kamen z.c. (ispod proizvodnog pakera)	22	
Zaštitne cijevi (iznad proizvodnog pakera)	2	
Proizvodni paker	7	
Mehanički čep	6	
Sekundarna barijera:		
In-situ formacija (kod proizvodnog pakera)	51	
Cementni kamen z.c. (iznad proizvodnog pakera)	22	
Zaštitne cijevi	2	
Vješalice zaštitinih cijevi	5	
Ventil prstenastog prostora	17	
Vješalica tubinga	10	
Spoj i ventili erupcijskog uređaja	31	
Erupcijski uređaj	31	

Nomenklatura:

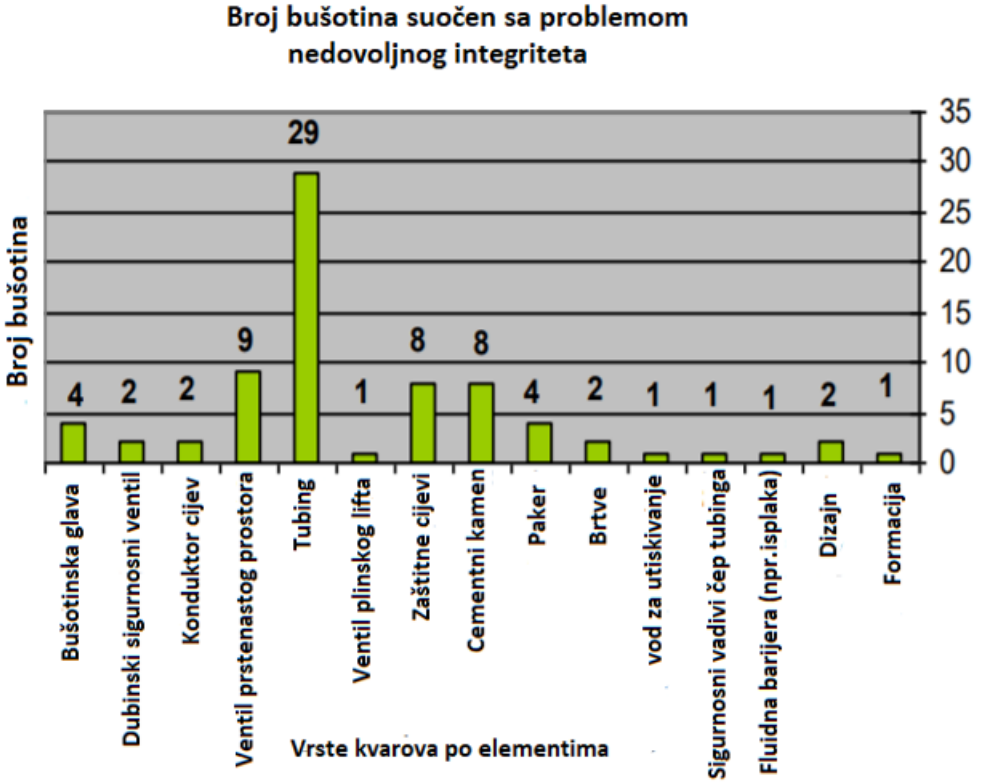
EAC-tablica kriterija prihvatljivosti elemenata barijere

Slika 3-15. Primarne i sekundarne barijere privremeno napuštene proizvodne bušotine (Norsok Standard D-010, 2013)

4. PROBLEMI UZROKOVANI NEDOVOLJNIM HIDRAULIČKIM I MEHANIČKIM INTEGRITETOM KANALA BUŠOTINE

Složeni postupak izgradnje i održavanja integriteta kanala bušotine od početnog planiranja, izrade pa sve do napuštanja bušotine, obuhvaća širok spektar procedura, aktivnosti, ali i opasnosti do kojih može doći uslijed nepoštivanja određenih propisa, ljudske greške i djelovanja vanjskih ili prirodnih sila koje mogu imati negativan utjecaj na integritet kanala bušotine. Razvojem tehnologije u naftnoj i plinskoj industriji i izradom bušotina velikih dubina, koje uključuju više elemenata i komponenti za održavanje integriteta, povećava se i rizik od mogućih kvarova ili oštećenja opreme. Postoje razni problemi koji mogu uzrokovati oštećenja ili gubitak integriteta kanala bušotine. U prošlosti naftne i plinske industrije zabilježeno je nekoliko važnih nesreća koje su uzrokovane gubitkom integriteta kanala bušotine, a iskustvo bazirano na povijesnim greškama predstavlja osnovu usredotočenosti na važnost kvalitetnog integriteta kanala bušotine, te podsjeća na potencijalne opasnosti uzrokovane gubitkom istog. Cjeloviti integritet bušotine, baziran na dvije neovisne barijere i velikom broju elemenata koji su sastavni dio barijera, izložen je velikim opterećenjima i naprezanjima, visokom tlaku, temperaturi, fluidima različitog kemijskog sastava, kemikalijama i ostalom, stoga nije veliko iznenađenje da nepravilna ugradnja, postupak ili nedovoljna kvaliteta materijala određenog elementa može za posljedicu imati najprije gubitak ili oštećenje elementa barijera, zatim propuštanje barijera, a naposljetku gubitak cijelog integriteta bušotine. Problemi uzrokovani nedovoljnim integritetom, te sami gubitak integriteta bušotine često je uzrokovan mehaničkim, hidrauličkim ili električnim kvarom elemenata ili nepravilnom primjenom uređaja. Analizom povijesnih nesreća u naftnoj i plinskoj industriji, te prethodnim problemima koji su doveli do gubitka integriteta, utvrđeno je da je tubing najkritičnija komponenta u sustavu barijera gdje se može očekivati oštećenje. To zapravo nije čudno, pošto je tubing izložen trošenju i djelovanju korozije usljed proizvodnje fluida i utiskivanju kemikalija, te također tubing sadrži veliki broj spojnica naročito u dubokim bušotinama gdje se pojavljuje rizik od mogućeg propuštanja. Grafički prikaz jedne norveške studije koja obuhvaća bušotine raznih namjena, prikazuje elemente barijera gdje su uočeni najčešći kvarovi ili neodgovarajuća primjena koji su uzrokovali probleme, oštećenja ili gubitak integriteta određenog broja bušotina (slika 4-1). Prema slici može se zaključiti da su tubing, ventil prstenastog prostora, cementni kamen i zaštitne cijevi

mjesta ili točke gdje nastaju najčešći problemi uslijed nedovoljnog hidrauličkog i mehaničkog integriteta (WIF, NTNU & UiS, 2012).



Slika 4-1. Broj bušotina na kojima se javio problem s integritetom kanala bušotine na pojedinom elementu barijere (USEA, 2014)

Nedovoljan integritet bušotine može uzrokovati erupciju i propuštanje fluida koji mogu rezultirati materijalnim oštećenjima, gubitkom proizvodnje, zagađenjem okoliša i u najgorem slučaju ozljedama ili smrti ljudi, te svaka od prethodnih negativnih posljedica uzrokuje veliki financijski trošak. U nastavku ovog poglavlja opisana je problematika pojedinih situacija i pripadajuće posljedice, u kojima je došlo do oštećenja ili gubitka integriteta bušotine koji je uzrokovan ljudskom greškom, vanjskim utjecajem ili nepravilnom primjenom postupaka i elemenata, te na kraju samog poglavlja je detaljno opisana eksplozija poluuronjive platforme "Deepwater Horizon" iz 2010. godine, koja je prouzročena gubitkom hidrauličkog i mehaničkog integriteta kanala bušotine.

4.1. Narušeni integritet bušotine uzrokovan oštećenjem proizvodne kolone zaštitnih cijevi

Ovo poglavlje opisuje primjer problema povezanog s oštećenjem proizvodne kolone zaštitnih cijevi ugrađene u odobalnoj bušotini na Sjevernom moru koja je prouzročila narušavanje integriteta kanala bušotine i dodatne posljedice koje su opisane u nastavku. Proizvodna kolona zaštitnih cijevi promjera 24,45 cm (9,625 in) ugrađena je u kanal bušotine u dvije sekcije. Prva sekcija proizvodne kolone zaštitnih cijevi spuštena je i cementirana na vertikalnoj dubini između 2515 metara i 4815 metra, dok je druga, gornja sekcija zaštitnih cijevi ugrađena u poliranu spojnicu proizvodne kolone zaštitnih cijevi koja sadrži brtvene elemente. Nakon ugradnje proizvodne kolone zaštitnih cijevi, pristupilo se tlačnom ispitivanju, te je uočeno propuštanje u sustavu koje može biti unutar polirane spojnice, površinske opreme, na mjestu spojnica između pojedinačnih zaštitnih cijevi ili na bilo kojem drugom mjestu proizvodne kolone zaštitnih cijevi. Nakon pregleda površinske opreme, mogućnost propuštanja te barijere je eliminirana, te su naposljetku napravljena dodatna ispitivanja tlaka koja su naknadno prihvaćena i bušotina je bila opremljena za fazu proizvodnje. Kasnije, tijekom proizvodnje otkriveno je da na vertikalnoj dubini od 700 metara oštećena proizvodna kolona zaštitnih cijevi koja je zbog toga izvađena na površinu i kasnije zamijenjena drugom proizvodnom kolonom zaštitnih cijevi nakon ponovnog opremanja bušotine. Nakon izvađene proizvodne kolone zaštitnih cijevi, najprije se smatralo da postoji propuštanje barijere zaštitnih cijevi ili polirane spojnice koje je moglo prouzročiti da povećani tlak tijekom testa porasta tlaka migrira iza kolone zaštitnih cijevi i uzrokuje gnječenje, ali pravo oštećenje je otkriveno nakon što je proizvodna kolona zaštitnih cijevi izvađena na površini i detaljno pregledana, slika 4-2.

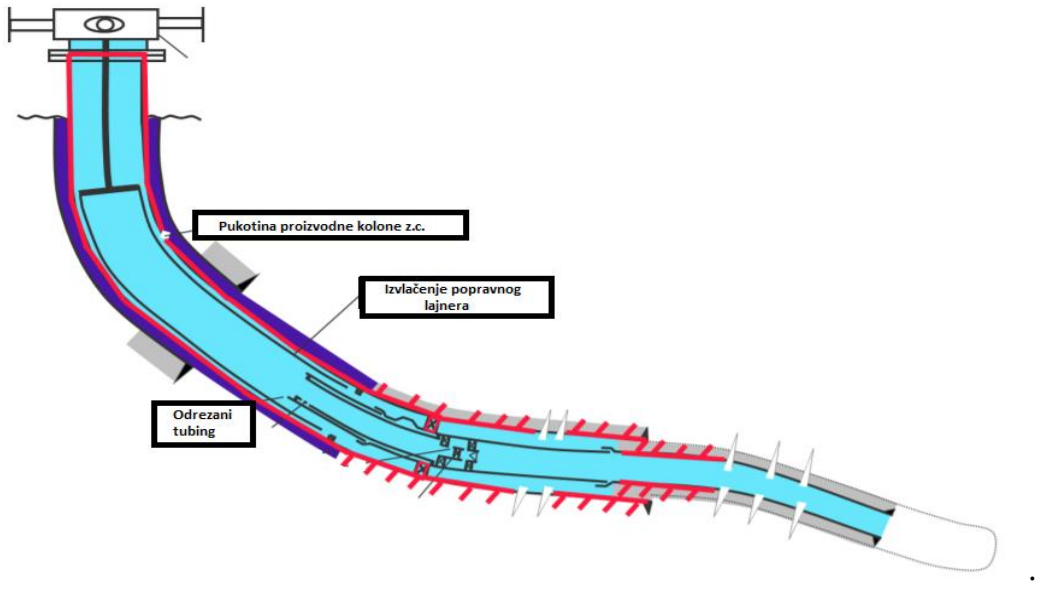


Slika 4-2. Oštećeni segement proizvodne kolone zaštitnih cijevi s tubingom (WIF, NTNU & UiS, 2012).

Nakon pregleda izvađene proizvodne kolone zaštitnih cijevi, utvrđeno je da je unutar proizvodne kolone zaštitnih cijevi promjera 24,45 cm (9,625 in), kvalitete čelika N80 i jedinične mase 79,6 kg/m (53,5 lbs/ft) ugrađen jedan dio proizvodnih zaštitnih cijevi jedinične mase 69,9 kg/m (47 lbs/ft) koje imaju 30% manju otpornost na gnječenje. Prema slici može se vidjeti da je i tubing unutar proizvodne kolone zaštitnih cijevi isto tako pretrpio oštećenja. Zaštitne cijevi, jedinične mase 79,6 kg/m (53,5 lbs/ft) imaju otpornost na gnječenje do vrijednosti tlakova od 456 bara, dok pronađeni oštećeni segment proizvodne kolone zaštitnih cijevi, jedinične težine 69,9 kg/m (47 lbs/ft) ima otpornost na gnječenje do maksimalne vrijednosti tlaka od 328 bara. S obzirom na prethodnu sliku može se uočiti da samo jedan nepravilno ugrađeni dio unutar čitave proizvodne kolone zaštitnih cijevi može narušiti integritet kanala bušotine i prouzročiti dodatne posljedice. Glavne posljedice koje su nastale zbog nepravilnog ugrađenog dijela proizvodne kolone zaštitnih cijevi su velika cijena zamjene i ponovnog opremanja bušotine proizvodnom kolonom zaštitnih cijevi, odnosno tubingom i gubitak proizvodnje na duže vrijeme, dok je pozitivna posljedica poboljšano i detaljnije ispitivanje zaštitnih cijevi, te provjeravanje operativnih postupaka ugradnje zaštitnih cijevi i opreme u sklopu zaštitnih cijevi (WIF, NTNU & UiS, 2012).

4.2. Gubitak integriteta bušotine uslijed neučinkovite primarne i sekundarne barijere

Gubitak integriteta kanala bušotine tijekom remontnih radova na odobalnoj kosoj usmjerenoj bušotini na području Sjevernog Mora, spominje se kao jedan od najvećih incidenata povezanih sa nedovoljnim integritetom bušotine na tom području. Tijekom remontnih radova na bušotini došlo je do nekontroliranog prodora plina iz bušotine do morskog dna. Na morskom dnu su nastale rupe kroz koje je plin migrirao sve do podnožja platforme stvarajući potencijalnu opasnost nastanka eksplozije koja može biti pogubna za radno osoblje, opremu i okoliš. Stručno osoblje je uspjelo ugušiti bušotinu, te je uspostavljena ponovna kontrola nad bušotinom. Postoji mnogo elemenata koji mogu biti uzrok nekontroliranog prodora plina do platforme. U početku, proizvodna kolona zaštitnih cijevi bušotine je imala pukotinu i moglo je doći do propuštanja, stoga je ugrađen popravni lajner kako bi održavao sekundarnu barijeru i izolirao pukotinu proizvodne kolone zaštitnih cijevi. Tijekom remontnih radova bilo je potrebno izvući popravni lajner na površinu, te je dubinski sigurnosni ventil tijekom opremanja bio van funkcije. Primarnu barijeru unutar bušotine su održavali remontni fluid, tubing i proizvodni paker, dok je važan element sekundarne barijere bio popravni lajner koji nakon izvlačenja nije adekvatno zamijenjen, te je tu došlo do gubljenja sekundarne barijere i stvaranja problema, slika 4-3.



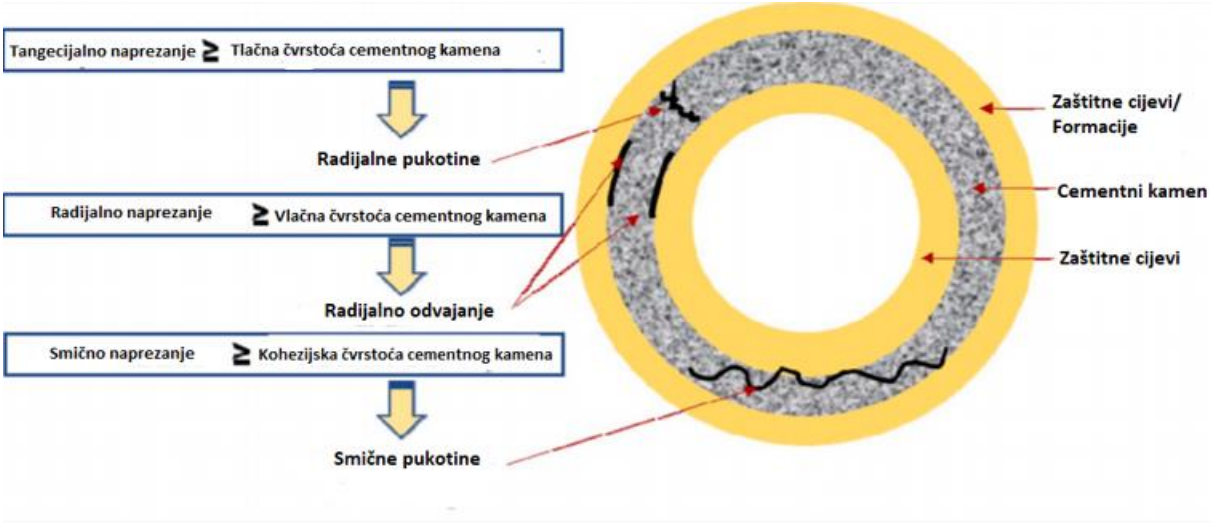
Slika 4-3. Izvlačenje popravnog lajnera i gubitak integriteta bušotine (WIF, NTNU & UiS, 2012)

Izvlačenjem popravnog lajnera i gubljenjem sekundarne barijere, istovremeno je došlo do pojave klipovanja, odnosno pada tlaka na dnu čija je posljedica bila povlačenje plina iz ležišta kroz pukotinu zaštitnih cijevi. Nekontrolirani prodor plina koji se povukao iz ležišta uslijed klipovanja, posljedično je migrirao iz bušotine kroz pukotinu proizvodne kolone zaštitnih cijevi pa sve do morskog dna, stvorivši potencijalnu opasnost od nastanka eksplozije ili požara. Taj događaj, nekontrolirane migracije plina kroz barijere bušotine značio je da su primarna i sekundarna barijera izgubljene, a samim time to je značilo da je izgubljen integritet kanala bušotine. S obzirom na ovu nesreću, vrlo je važno znati u svakom trenutku stanje svake barijere prilikom različitih faza aktivnosti unutar bušotine, kako ne bi došlo do gubitka integriteta i negativnih posljedica. Značajnih posljedica poput eksplozije nije bilo, ali zato je proizvodnja platforme bila obustavljena nekoliko tjedana, te nakon što je ponovno uspostavljena, razina proizvodnje nikad nije bila na razini prije nesreće (WIF, NTNU & UiS, 2012).

4.3. Problem narušavanja integriteta bušotine uzrokovan oštećenjem cementnog kamena

U ovom poglavlju su predstavljena uobičajena oštećenja cementnog kamena koja mogu uzrokovati narušavanje integriteta kanala bušotine. Hidraulički i mehanički integritet cementnog kamena može biti ugrožen zbog djelovanja mehaničkih naprezanja. Neodgovarajuća svojstva cementnog kamena rezultiraju njegovim degradiranjem uslijed djelovanja radijalnog, smičnog i tangencijalnog naprezanja. Djelovanja prethodno navedenih naprezanja mogu uzrokovati radijalno pucanje, radijalno odvajanje i plastičnu deformaciju cementnog kamena. Na slici 4-4. mogu se uočiti radijalne pukotine koje mogu nastati ukoliko tangencijalno naprezanje premašuje tlačno naprezanje cementnog kamena. Isto tako postoji mogućnost narušavanja veze odnosno međusobnog odvajanja cementnog kamena, kolone zaštitnih cijevi i stijene kada je veličina radijalnog naprezanja veća od vlačne čvrstoće cementnog kamena. Također, ako je kohezijska čvrstoća cementnog kamena nedovoljna, može doći do smičnih pukotina uslijed djelovanja smičnog naprezanja. Skupina znanstvenika je razvila model za procjenu kvalitete cementnog kamena u obliku neovisne barijere. Model se zasniva na parametarskim ispitivanjima raznih čimbenika kao što su: svojstva materijala cementnog kamena, količina i dimenzije cementnog kamena u prstenastom prostoru i naprezanja u bušotini. Autori ovog modela su analizom radijalnih, tangencijalnih i smičnih naprezanja pri različitim

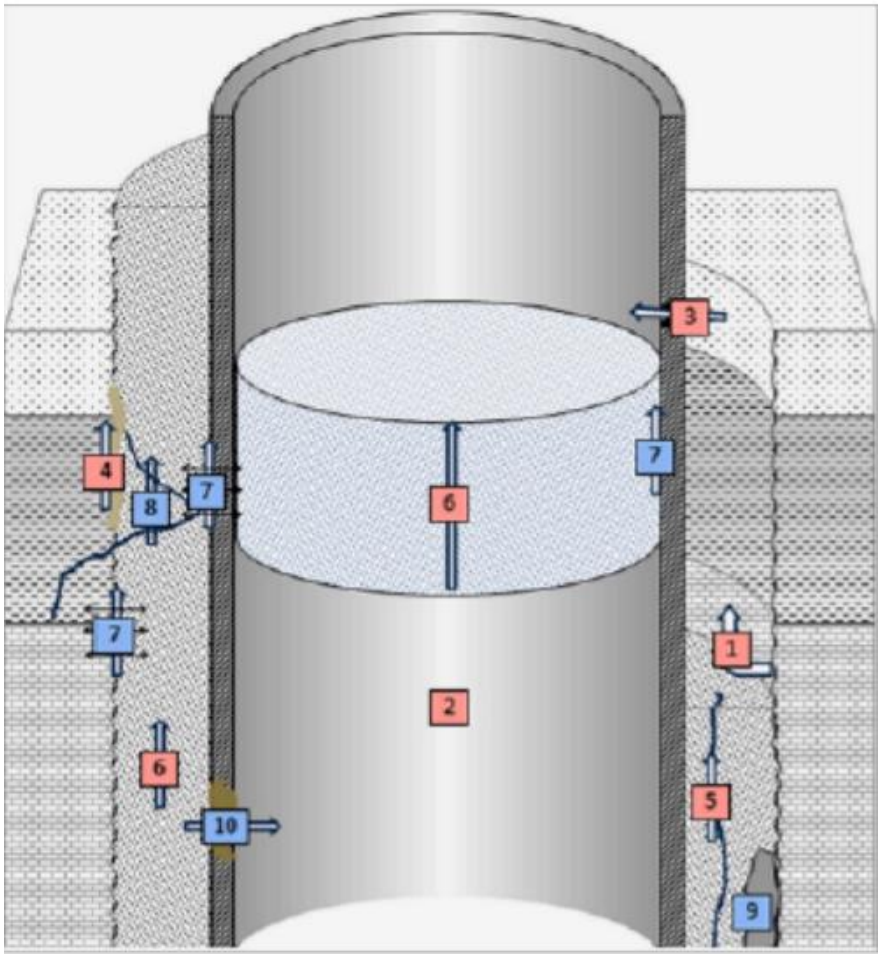
opterećenjem zaključili da na sva mehanička naprezanja cementnog kamena značajno utječu: tlak u bušotini, tlak u prstenastom prostoru, Poissonov koeficijent i Youngov modul elastičnosti.



Slika 4-4. Oštećenja cementnog kamena uslijed djelovanja različitih naprezanja (Ezeakacha et al., 2020).

Migracija plina kroz cementni kamen može uzrokovati povećanje tlaka u prstenastom prostoru pri ušću bušotine i nekontroliranu erupciju koja može dovesti do eksplozije i požara na površini. Uzroci migracije mogu biti neodgovarajuće projektiranje cementnog kamena, loše vezivanje cementnog kamena za stijenke stijene i zaštitne cijevi, te loše čišćenje prstenastog prostoru nakon bušenja prije same cementacije. Migracija plina s obzirom na oštećenja cementnog kamena može se podijeliti na primarnu i sekundarnu. Na slici 4-5 plavom bojom su označeni primarni putevi migracije koji nastaju tijekom cementiranja, a crvenom bojom je označena mogućnost sekundarne migracije plina. Do primarne migracije plina kroz cementni kamen dolazi tijekom aktivnosti cementiranja, a glavni uzroci toj pojavi su (slika 4-5): nepotpuno cementiranje prstenastog prostora (1), nedostatak cementnog čepa ili privremenog pakera (2), oštećenje zaštitnih cijevi (3), loše vezivanje uzrokovano nedovoljnim uklanjanjem isplake (4), kanalići u cementnom kamenu (5) i primarna propusnost cementnog kamena (6). Sekundarni putevi migracije kroz barijeru cementnog kamena nastaju nakon cementiranja, a uglavnom nastaju zbog: pucanja veze između cementnog kamena, zaštitnih cijevi i stijene

uzrokovano vlačnim naprezanjem (7), pukotina u cementnom kamenu i okolnim stijenama (8), kemijskog djelovanja cementnog kamena (9) i zbog korozije zaštitnih cijevi (10).

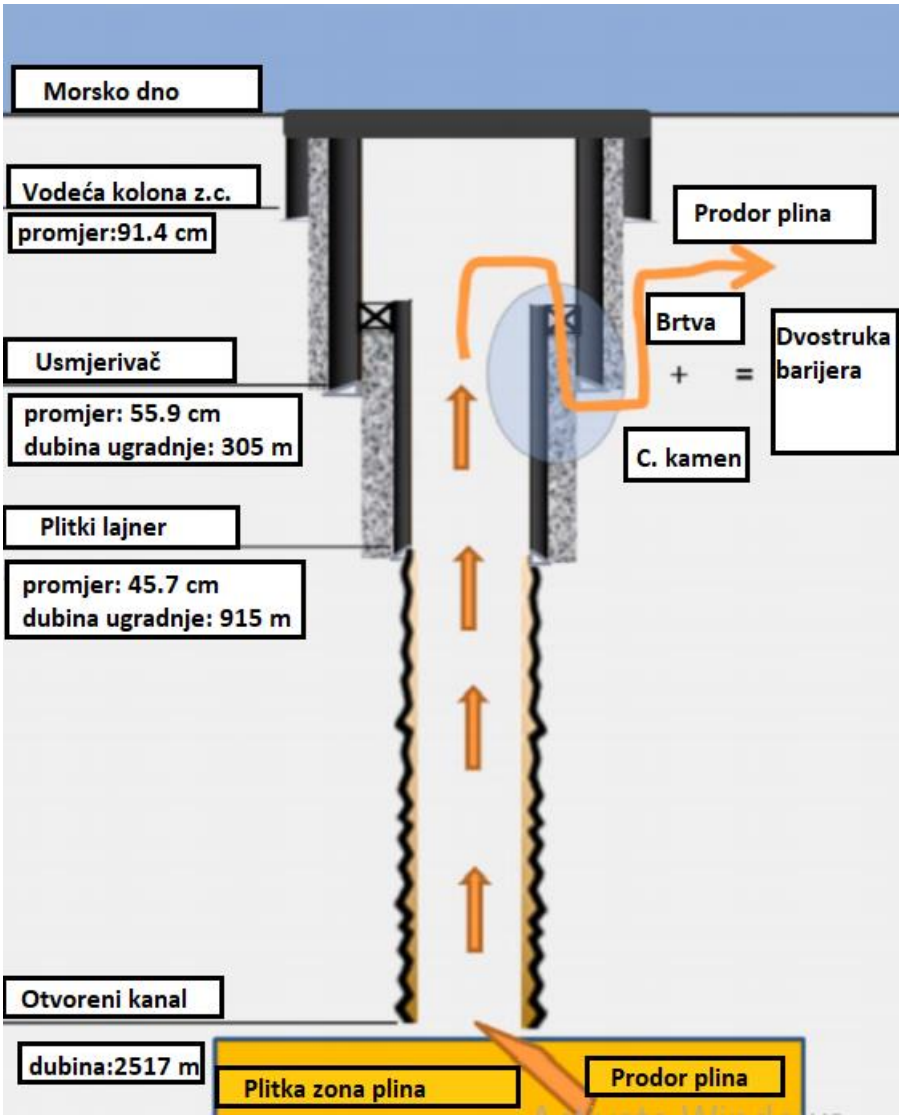


Slika 4-5. Primarni i sekundarni načini propuštanja plina kroz cementni kamen (Ezeakacha et al., 2020).

S obzirom da postoji veliki broj čimbenika koji mogu uzrokovati propuštanje cemetnog kamena, vrlo je važno dobro projektirati svojstva cementnog kamena s odgovarajućim održivim svojstvima, a isto tako je bitno da postupak cementiranja bude prilagođen uvjetima u bušotini. Cementni kamen kao element barijere ima izrazito vitalnu ulogu u održavanju integriteta bušotine. Na temelju različitih analiza utvrđeno je da je u Meksičkom zaljevu, u razdoblju između 1996. i 2006. godine, 35% incidenata bilo povezano s lošim integritetom cementnog kamena (Ezeakacha et al., 2020).

4.4. Narušeni integritet bušotine uzrokovan propuštanjem vješalice lajnera

Cjelokupan integritet bušotine može biti narušen zbog oštećenja jednog ili više elemenata barijere. Elementi barijere kod kojih su učestali kvarovi i koji mogu ugroziti integritet bušotine su vješalice lajnera (engl. *liner hanger*) i pripadajući brtveni elementi u sklopu vješalice. Statistički podaci pokazuju da se većina incidenata povezanih s bušenjem u odobalnim plitkim vodama pripisuje migraciji plina i oštećenju vješalice lajnera i cementnom kamenu koji ju dodatno učvršćuje. Prilikom nekontrolirane migracije plina kroz bušotinu, brtveni elementi u sklopu vješalice lajnera i cementni kamen djeluju kao sustav barijere kako bi se spriječilo prodiranje plina na površinu. Analizom propuštanja integriteta bušotina na terenu je ustanovljeno da su oštećenja brtve unutar sklopa lajnera, danas jedni od glavnih razlog narušavanja stabilnosti integriteta bušotine. Utvrđeno je da 18% odobalnih bušotina u svijetu ima neki oblik kvara na brtvenim elementima vješalice lajnera, te da više od 46% oštećenja u sekundarnim barijerama potječe od komponenata brtve unutar vješalice lajnera. Nakon incidenta i gubitka integriteta bušotine uslijed prodora plina kroz dvostruku barijeru vješalice lajnera i cementnog kamena do plitkih slojeva na jednoj bušotini u Meksičkom zaljevu, počela su razna istraživanja čiji je cilj bio spriječiti takve događaje u budućnosti (slika 4-6). Glavni razlog prodora plina na bušotini u Meksičkom zaljevu je propuštanje vješalice lajnera koji je rezultirao podzemnom erupcijom plina i gubitkom integriteta kanala bušotine što je predstavljalo veliki rizik širenja plina do morskog dna. U današnje vrijeme ugradnja lajnera uz pomoć vješalice donosi mnoge prednosti omogućujući ugradnju u kose bušotine, visokotemperaturne bušotine i bušotine s izrazio visokim slojnim tlakom, ali unatoč prethodnim prednostima, održavanje integriteta i stabilnost barijere lajnera i pripadajuće vješalice i dalje predstavlja izazov u naftnoj i plinskoj industriji. Prema podacima ranije spomenutog, zabilježeno je da propuštanje vješalice lajnera koja se ugrađuje konusno u prethodnu kolonu zaštitnih cijevi nastaje uglavnom zbog: neodgovarujuće dubine ugradnje lajnera, loše cementacije u djelu vješalice lajnera i korištenje brtvenih elemenata neodgovarajućih svojstava s obzirom na trošenje i koroziju (Ezeakacha et al., 2020).



Slika 4-6. Prodor plina kroz dvostruku barijeru vješalice lajnera i cementnog kamena (Ezeakacha et al., 2020)

Primjena lajnera i konusna ugradnja u prethodnu kolonu uz pomoću vješalice treba osigurati barijeru bušotine koja će spriječiti prodor plina na površinu. Brtveni elementi (elastomeri) unutar sklopa vješalice pokazali su se kao jedna od slabih točaka gdje može doći do propuštanja plina, te su istraživanja pokazala da korozivno djelovanje ugljikovog dioksida ima najveći negativni utjecaj na elastomer. Zaključno tome, prilikom ugradnje lajnera uz pomoć vješalice i pripadajućih brtvenih elemenata potrebno je detaljno istražiti uvjete u bušotini i prema tome prilagoditi opremu koja se ugrađuje kako ne bi došlo do propuštanja elementa barijere sustava vješalice lajnera i gubitka integriteta kanala bušotine (Ezeakacha et al., 2020).

4.5. Gubitak integriteta i eksplozija poluuronjive platforme “Deepwater Horizon”

Najpoznatiji primjer gubitka integriteta bušotine u novijoj povijesti naftne i plinske industrije se dogodio 20. travnja 2010. godine kada je došlo do gubitka integriteta istražne bušotine na polju Macondo i prodora plina koji je uzrokovao eksploziju i požar na poluuronjivoj platformi “Deepwater Horizon” u Meksičkom zaljevu (slika 4-7). Nesreća je uzrokovala nekontrolirano izlijevanje 794 936,07 m^3 (5 milijuna barela) nafte koje je trajalo 87 dana, te je 11 članova posade smrtno stradalo uslijed eksplozije.



Slika 4-7. Požar poluuronjive platforme “Deepwater Horizon” (Science news, 2020)

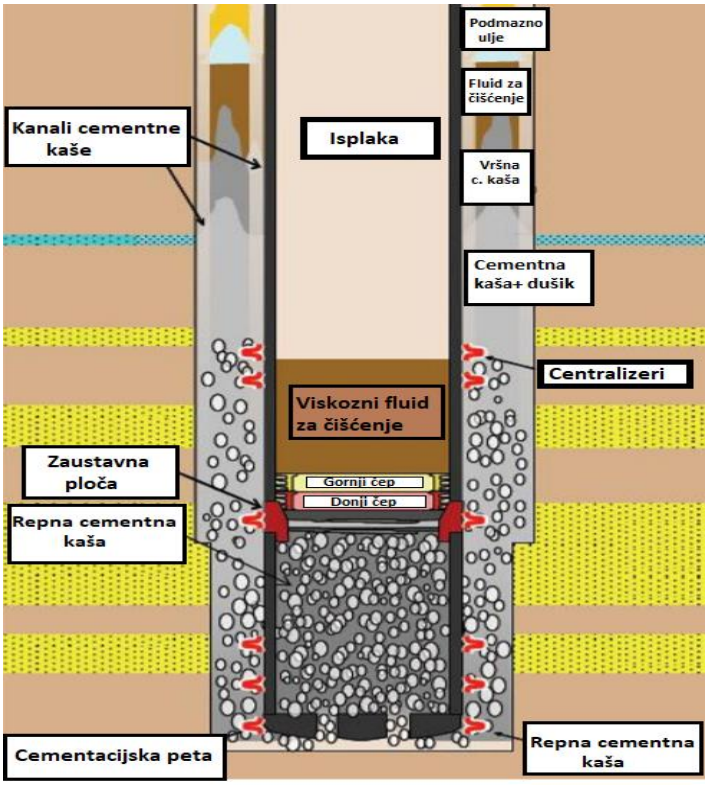
Nedugo nakon nesreće američki predsjednik u to vrijeme, a sada već bivši Barack Obama najavio je osnivanje povjerenstva zaduženog za analiziranje i pronalaženje uzroka nesreće, te da povjerenstvo preporuči reforme kako bi se odobalne aktivnosti u naftnoj i plinskoj industriji učinile sigurnijima. Iz izvješća analize povjerenstva je utvrđeno da se ova nesreća mogla spriječiti, te su otkrivene prepoznatljive greške kompanija “British Petroleum”, “Haliburton” i “Transocean” koje su bili zadužene za radne aktivnosti na platformi. Uzrok erupcije je propuštanje osam elemenata barijera koje nisu spriječile erupciju i osigurale stabilnost integriteta bušotine, isti taj podatak je utvrđen i u izvješću kompanije “British Petroleum” (Blaauw, 2012).

Istražna bušotina na polju Macondo je bila izbušena do dubine 5596 metara (18360 ft), a nakon dosezanja spomenute dubine pristupilo se ugradnji proizvodne kolone zaštitnih cijevi. Projektom je zahtijevano ugraditi 21 centralizera, ali u početku je isporučeno samo 7 centralizera. Preostali centralizeri isporučeni su naknadno od strane kompanije "Haliburton", ali su bili neodgovarajuće veličine pa se nisu koristili. Proizvodna kolona zaštitnih cijevi bila je zacementirana, te je bušotina bila privremeno napuštena i spremna za opremanje remontnim postrojenjem. Utvrdilo se da kompleksna cementna kaša komponirana od dušika i raznih aditiva koja se koristila za cementiranje proizvodne kolone zašitnih cijevi nije ispitana prije primjene, te kasnijim laboratorijskim testovima pokazalo se da je cementna kaša na tim dubinama i visokim tlakovima bila nestabilna. Zbog nestabilnosti cemetne kaše pretpostavilo se da je došlo do proboja dušika do cementacijske pete, što je omogućilo komunikaciju između ugljikovodika i kanala bušotine. Protupovratni ventil u peti kolone zaštitnih cijevi koji omogućuje samo cirkulaciju prema dolje nije bio u funkciji, te je uzrokovao neotkriveni ulazak ugljikovodika u bušotinu. Prema postupku, najprije je proveden pozitivni tlačni test, te nakon toga je proveden test negativnog tlaka kako bi se ispitala funkcionalnost barijera za visoke diferencijalne tlakove. Osoblje koje je bilo zaduženo za provođenje testa porasta tlaka nije bilo dovoljno kvalificirano da izvede i protumači postupak pozitivnog tlačnog testa propisanog od strane kompanije „British Petroleum". Tijekom pozitivnog tlačnog testa, tlak u bušaćim šipkama je narastao do 96 bar (1400 psi). Povećanje tlaka u bušaćim šipkama prema stručnom osoblju je bilo pripisanu efektu "mjehura", te se je normalan rad nastavio. Ugljikovodici su sve više nekontrolirano prodirali unutar bušotine, a tlak u bušaćim šipkama je i dalje nastavio rasti. Nakon što je isplaka uočena na podištu platforme, pristupilo se operaciji sprječavanja dotoka. Najprije se prstenasti preventer nije zatvorio, zatim su ugljikovodici bili preusmjereni u atmosferski separator isplake (engl. *mud gas separator*) te su visokotlačni plinovi izašli iz separatora što je uzrokovalo aktiviranje plinskih alarma. Dvije eksplozije na platformi uzrokovale su nestanak električne energije. Čeljusni preventer za rezanje nije se aktivirao pravilno, a požar je uzrokovao oštećenje kabla za komunikaciju s podvodnim kontrolnim razdjelnikom. Također, automatski sustav za zatvaranje preventera (engl. *automated mode function*) nije radio zbog oštećenja elektromagnetnog ventila i nedovoljnog punjenja baterija za aktiviranje preventera. Treća opcija je bila da se preventerski sklop zatvori uz pomoć daljinsko upravljanog plovila (engl. *remote operated vehicle*). Čeljusti za rezanje unutar preventerskog sklopa su se zatvorile, ali nisu

uspjele odspojiti kolonu bušaćih cijevi i zatvoriti puni presjek unutar usposnkih cijevi na odgovarajući način što je uzrokovalu nastavak dotoka ugljikovodika (British Petroleum, 2010).

Prethodni odlomak ukratko opisuje uzrok gubitka integriteta bušotine i nastanka eksplozije na platformi. Razlog nesreće na platformi „Deepwater Horizon“ je zapravo lančani niz pogrešaka koji uključuje kršenje organizacijskih postupaka i propuštanje više mehaničkih i hidrauličkih elemenata barijera koje su imale zadatak spriječiti prodor ugljikovodika i onemogućiti da dođe do ovako velike katastrofe. Prema izvješću kompanije „British Petroleum“ i povjerenstva zaduženog za analiziranje uzroka nesreće osnovanog od strane Vlade Sjedinjenih Američkih Država, utvrđeno je da je prethodno došlo do propuštanja osam kritičnih mehaničkih, hidrauličkih i organizacijskih elemenata barijera što je rezultiralo krajnjim incidentom. Razlozi nefunkcionalnosti i propuštanja osam elemenata barijera koji su doveli do gubitka cjeloukupnog integriteta bušotine su bili sljedeći:

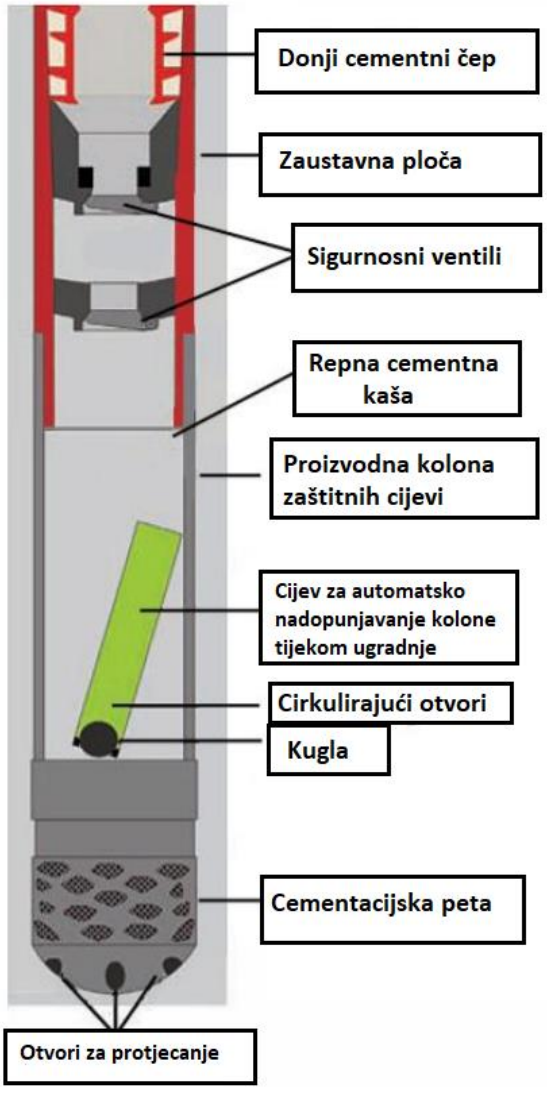
1) Cementna kaša u prstenastom prostoru oko proizvodne kolone zaštitnih cijevi zbog prodora dušika nije izolirala ugljikovodike (slika 4-8);



Slika 4-8. Prodor dušika u cementacijsku petu (British petroleum, 2010)

Izvješće je pokazalo da cementna kaša nije bila ispitana prije same cementacije, te da sonda za ispitivanje kvalitete vezivanja cementnog kamena (engl. *cement bonding log*) nije spuštena u bušotinu kako bi se izvršilo mjerenje. Očiti razlog ne spuštanja karotažne sonde za ispitivanje kvalitete vezivanja je ušteda vremena, jer radovi na platformi „Deepwater Horizon“ su kasnili 41 dan u odnosu na planirani raspored.

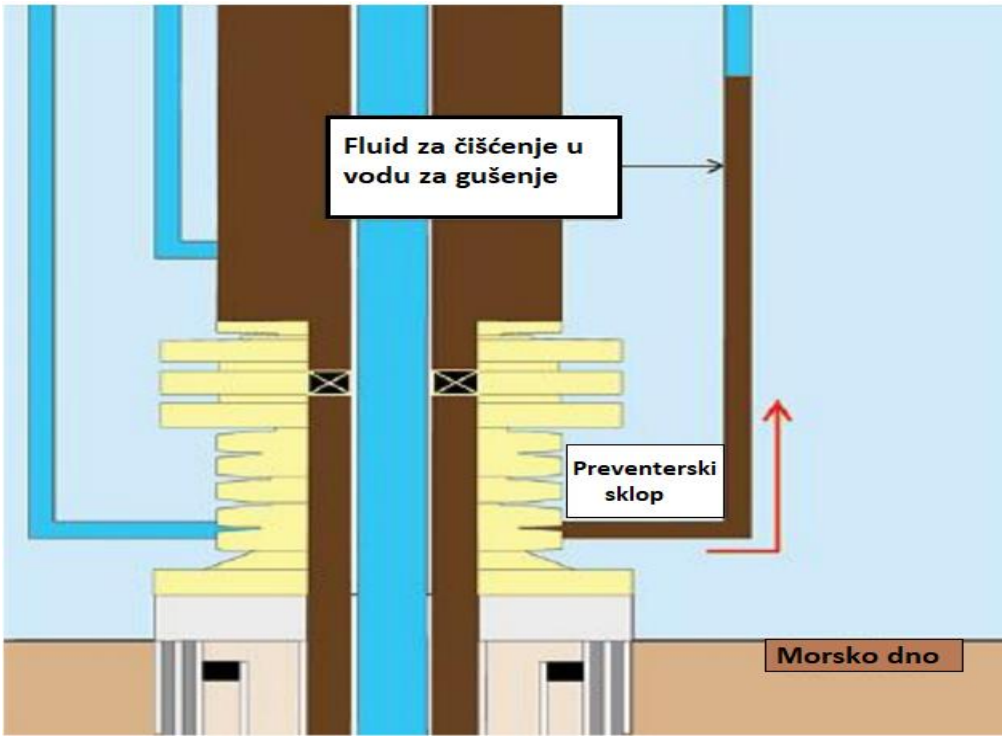
2) Cementacijska peta kao element barijere koja u sebi sadrži sigurnosne ventile, te djelomično popunjena i okružena repnom cementnom kašom bila je probijena uslijed prodora dušika, slika 4-9;



Slika 4-9. Cementacijska peta kao element barijere (British Petroleum, 2010)

3) Pogrešno tumačenje testa negativnog tlaka;

Stručno osoblje platforme nije bilo upoznato za procedurom testa negativnog tlaka kompanije British Petroleum. Po proceduri, bilo je potrebno pratiti stanje voda za gušenje, dok osoblje je pratilo tlak u bušaćim šipkama. Po procjeni osoblja, test negativnog tlaka je prihvaćen uslijed pojave velikog porasta tlaka koju su prepisali "efektu mjehura". Također, začepljen vod za gušenje može biti objašnjenje zašto nije došlo do pada tlaka uslijed pražnjenja bušotine (slika 4-10).



Slika 4-10. Uvjeti tijekom testa negativnog tlaka (British petroleum, 2010)

4) Dotok ugljikovodika nije bio uočen sve dok ugljikovodici se nisu pojavili u usponskim cijevima;

Analiza je pokazala da je dotok trebao biti uočen u 20:48 h po tadašnjem vremenu, ali dotok nije bio odmah registriran, te su se prve aktivnosti za sprječavanje dotoka poduzete tek u 21:41 h. Prema priručniku o kontroli bušotine koji je izdan od kompanije „Transocean" bilo je potrebno nadgledati bušotinu cijelo vrijeme, ali nigdje u tom priručniku nije pisalo kako i na

koji način provoditi ispitivanje protoka, čišćenje ili neke druge aktivnosti pri zatvaranju bušotine.

5) Prstenasti preventer u sklopu preventerskog sklopa nije bio u mogućnosti da spriječi dotok ugljikovodika;

Prstenasti preventer prilikom aktiviranja nije dobro zabrtvio prstenasti prostor oko bušaćih šipki, te se je dotok ugljikovodika nastavio. Također, izvješće je pokazalo da osoblje na platformi nije bilo dovoljno obučeno za ovakve situacije.

6) Preusmjeravanje dotoka u atmosferski separator (engl. *mud gas separator*) rezultiralo je ispuštanjem plina na platformi;

Atmosferski separator je konstruiran da radi s malim količinama plina i nije bio prikladan za uvjete velikih protoka poput ove situacije. U slučaju da je protok bio preusmjeren izvan platforme, a ne u atmosferski separator, osoblje bi imalo više vremena za reakciju i izbjegavanje pojave plina na samom podištu tornja.

7) Protupožarni i plinski zaštitni sustav nisu spriječili nastanak požara;

Ventilatori na platformi nisu bili konstruirani za automatsko paljenje prilikom detekcije plina, te ih je bilo potrebno ručno upaliti, kako to nije bilo učinjeno plin je uspio doći do izvora paljenja, te je nastala eksplozija i požar.

8) Preventerski sklop nije uspio izolirati bušotinu i zaustaviti prodor ugljikovodika;

Nijedan od tri način aktiviranja preventera unutar preventerskog sklopa nije bio uspješan. Najprije, aktiviranje čeljusti za rezanje unutar preventerskog sklopa i rezanje kolone bušaćih cijevi nije uspjelo zbog oštećenja kabla za aktivaciju uslijed požara. Zatim drugi automatski način aktiviranja preventera nije funkcionirao zbog nedovoljne napunjenosti baterije za aktiviranje i kvara elektromagnetskog ventila. Trećim pokušajem priključivanja daljinsko upravljanog plovila na preventer s čeljustima za odrez, namjeravalo se odrezati alat u bušotini i zabrtviti ju. Daljinsko upravljano plovilo je uspjelo aktivirati preventer, ali čeljusti za rezanje nisu uspjele odspojiti kolonu bušaćih cijevi. Mogući razlozi nefunkcionalnosti čeljusnih preventera za rezanje su: nedovoljna hidraulička snaga, nedovoljno oštre čeljusti, ali i loše održavanje preventerskog sklopa što je kasnije istragom potvrđeno (British Petroleum, 2010).

5. ZAKLJUČAK

Hidraulički i mehanički integritet bušotine je ključan element pri projektiranju, izradi, održavanju i konačnom puštanju u rad bušotine. NORSOK D-010 standard koji je zamijenio specifikacije naftnih i plinskih kompanija pruža operativne, tehničke i organizacijske okvire za očuvanje i održavanje integriteta bušotine, uključujući postojanje dviju neovisnih, tehnički ispravnih barijera čiji je temeljni zadatak spriječiti nekontrolirani dotok fluida i erupciju. Cjeloviti sustav ostvarivanja i upravljanja integritetom bušotine podrazumijeva pravilnu organizaciju, komunikaciju i znanje stručnog osoblja, efikasno projektiranje i prethodno ispitivanje funkcionalnosti opreme, te upravljanje i nadziranje bušotinskih barijera uključujući statičnu ilustraciju bušotine sa glavnim elementima primarne i sekundarne barijere s ciljem smanjenja mogućnosti pojave rizika i nastanka dugotrajnih posljedica. Od samih početaka razvoja naftne i plinske industrije, velika važnost uvijek se pripisuje očuvanju sigurnosti ljudi, opreme i okoliša, stoga izazovi razumijevanja filozofije dvostruke barijere, osposobljenost stručnog osoblja, te rukovanje i nadziranje rada opreme pri pojedinoj aktivnosti u bušotini moraju se izvoditi u skladu sa kriterijima propisanih standarda. Za očekivati je da će važnost integriteta bušotina i dalje rasti u naftnoj i plinskoj industriji narednih godina, prateći razvoj tehnologije, znanja i procedura od globalne do nacionalne razine, te da će velike ekološke nesreće i incidenti poput one na platformi "Deepwater Horizon" biti samo stvar prošlosti.

6. LITERATURA

1. BLAAUW K., 2012. Management of well barriers and challenges with regards to obtaining well integrity, University of Stavanger

2. EXPRO WELL SERVICES, 2011. Well Integrity Capability, Dyce, Aberdeen, United Kingdom

3. KHALIFEH M., SAASEN A., 2020. Introduction to Permanent Plug and Abandonment of Wells, str. 11-69, Stavanger, Norway

4. NORSOK STANDARD D-010, 2013. Well integrity in drilling and well operations, N-1326 Lysaker, Norway

5. NORWEGIAN OIL AND GAS, 2017. Recommended guidelines for well integrity, Stavanger 4068, Norway

6. PAŠIĆ, B., 2018., Opremanje i održavanje bušotina 1, Powerpoint prezentacije s kolegija Opremanje i održavanje bušotina 1, održanog u ak. god. 2017/2018 na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilište u Zagrebu

7. EZEAKACHA C,. SALEHI S., SHAWGI A., 2020. Review of gas migration and wellbore leakage in liner hanger dual barrier system: Challenges and implications for industry, School of Petroleum and Geological Engineering, The University of Oklahoma, USA

8. WIF, NTNU & UiS, 2012. An Introduction to Well Integrity, Revision 0

WEB IZVORI

9. BRITISH PETROLEUM, 2010. Deepwater Horizon Accident Investigation Report,

URL:https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/313807/000119312510216268/dex993.htm (10.12.2020.)

10. GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA, 2021. Well design and integrity for hydraulic fracturing,

URL:https://www.dmp.wa.gov.au/Petroleum/Well-design-and-integrity-for-25619.aspx (20.10.2020.)

11. IMRI, 2020. API 5CT petroleum steel tubing,

URL:https://imristeel.com/product/api-5ct-petroleum-steel-tubing-l80-9-3lb-ft-3-1-2-eue-tubing-pipe/ (02.11.2020.)

12. INTERDAM, 2017. The NORSOK Standards: a simple explanation,

URL: https://blog.van-dam.nl/norsok-standards (20.10.2020.)

13. NOIA, 2020. Well Control Rule,

URL:https://www.noia.org/policy-issues/government-affairs/well-control-rule/ (03.11.2020.)

14. OILFIELD TECHNOLOGY, 2014. D-010: The story of the world's well integrity standard,

URL:https://www.oilfieldtechnology.com/exploration/10032014/the_story_of_the_worlds_well_integrity_standard/ (20.10.2020.)

15. PETROWIKI, 2015a. Drilling fluids,

URL:https://petrowiki.spe.org/Drilling_fluids (02.11.2020.)

16. PETROWIKI, 2015b. Tubing,

URL:https://petrowiki.spe.org/Tubing (03.11.2020.)

17. PETROWIKI, 2018. Well Integrity Lifecycle,

URL:https://petrowiki.spe.org/Well_integrity_lifecycle (20.10. 2020.)

18. PETROWIKI, 2020. Well Integrity,

URL: https://petrowiki.spe.org/Well_integrity (20.10.2020.)

19. PRODUCTION TECHNOLOGY, 2020. Subsurface Safety Valve Basics,

URL:https://production-technology.org/subsurface-safety-valve/ (23.10.2020.)

20. SCHLUMBERGER, 2015. The Defining Series: Introduction to Well Completions,

URL:https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/definingcompletion (03.11.2020.)

21. SCIENCE NEWS, 2020. The Deepwater Horizon oil spill spread much farther than once thought,
URL:https://www.sciencenews.org/article/deepwater-horizon-oil-spill-extent-simulation (01.12.2020.)

22. SEG LIBRARY, 2018. Casing integrity mapping using top-casing electrodes and surface-based electromagnetic fields,

URL:https://library.seg.org/doi/10.1190/geo2018-0692.1 (30.10.2020.)

23. STANDARDS NORWAY, 2019. NORSOK standards,

URL:https://www.standard.no/en/sectors/energi-og-klima/petroleum/norsok-standards/#.X_MjRdhKhPZ (20.10.2020.)

24. USEA, 2014. Well Integrity – Basics, Prevention, Monitoring, Red Flags & Repair Options

URL:https://usea.org/sites/default/files/event/King_DOE%20Well%20Integrity%20%E2%80%93%20Basics,%20Prevention,%20Monitoring,%20Red%20Flags%20and%20Repair%20Options%2021%20Nov%202014%20v3.pdf (07.11.2020.)

25. WELLCEM, 2017a. Gas migration can cause a disaster,

URL:https://blog.wellcem.com/gas-migration-can-cause-a-disaster (30.10.2020.)

26. WELLCEM, 2017b. Plug and abandonment of oil and gas wells: Different materials,

URL:https://blog.wellcem.com/plug-and-abandonment-of-oil-and-gas-wells-different-materials (05.11.2020.)

27. WIKIWAND, 2017. Casing (borehole),

URL:https://www.wikiwand.com/en/Casing_(borehole) (30.10.2020.)

28. WILD WELL CONTROL, 2021. Well Integrity,

URL:https://wildwell.com/risk-management/well-integrity/ (20.10.2020.)

29. XENON GROUP, 2021. How to calculate the level of risk to your business,

URL:https://www.xenongroup.co.uk/knowledge-centre/risk-management/the-risk-formula-how-to-calculate-the-level-of-risk-to-your-business (25.10.2020.)

IZJAVA

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

Antonio Horaček

KLASA: 602-04/20-01/261
URBROJ: 251-70-03-21-2
U Zagrebu, 03.02.2021.

Antonio Horaček, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/261, UR. BROJ: 251-70-12-20-1 od 07.12.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

HIDRAULIČKI I MEHANIČKI INTEGRITET KANALA BUŠOTINE

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu dr. sc. Borivoje Pašić, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Borivoje Pašić
(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)