

Optimizacija konstrukcije bušotine uklanjanjem tehničkog niza zaštitnih cijevi

Radišić, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:169:496585>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**



Repository / Repozitorij:

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



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

**OPTIMIZACIJA KONSTRUKCIJE BUŠOTINE
UKLANJANJEM TEHNIČKOG NIZA ZAŠTITNIH
CIJEVI**

Diplomski rad

Ante Radišić

N 370

Zagreb, 2023.

OPTIMIZACIJA KONSTRUKCIJE BUŠOTINE UKLANJANJEM TEHNIČKOG NIZA ZAŠTITNIH CIJEVI

Ante Radišić

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

Sažetak

Izrada bušotina uključuje složeni niz poslova s ciljem dosezanja ležišta ugljikovodika ili geotermalne vode. Kako bi bušotina bila kvalitetno i sigurno izrađena te omogućila buduću eksploataciju ležišta, potrebno ju je pravilno konstruirati. Naftne kompanije posljednjih desetljeća pokušavaju optimizirati uobičajene prakse pri projektiranju bušotina te tako uštediti financijska sredstva. Jedan od dijelova projektiranja konstrukcije jest i projektiranje zacjevljenja bušotine, odnosno pravilni odabir promjera i dubina ugradnje zaštitnih cijevi određenih mehaničkih karakteristika kako bi odoljevale promjenjivim uvjetima tijekom cijelog radnog vijeka bušotine. Trošak nabave zaštitnih cijevi te njihova ugradnja i cementiranje predstavlja veliki dio troškova izrade bušotine. Stoga, projektantski je izazov dizajnirati takvo zacjevljenje koje će izdržati sva naprezanja uz što manji trošak. U radu je obrađen teoretski pristup pri konstruiranju zacjevljenja i mogući uzroci odstupanja završne konstrukcije bušotine od projektiranih vrijednosti. U sklopu toga, izrađene su i uspoređene dvije konstrukcije bušotine X na istražnom polju Y, s različitim brojem nizova zaštitnih cijevi. Za potrebe projektiranja konstrukcije bušotine korišten je softverski paket Landmark, modul StressCheck™.

Ključne riječi: konstrukcija bušotine, zaštitne cijevi, naprezanja, optimizacija zacjevljenja kanala bušotine, StressCheck™

Diplomski rad sadrži: 78 stranica, 21 tablicu, 23 slike i 27 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad je pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Mentor: Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNf-a

Komentor: Dr. sc. Petar Mijić, poslijedoktorand RGNf-a

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

Datum obrane: 17. 2. 2023., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

WELL CONSTRUCTION OPTIMIZATION BY ELIMINATING INTERMEDIATE CASING STRING

Ante Radišić

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

Drilling wells involves a complex series of operations with the goal of reaching hydrocarbon or geothermal water reservoirs. In order for the well to be properly and safely made and to enable the future exploitation of the reservoir, it must be correctly constructed. In recent decades, oil companies have been trying to optimize the usual practice when constructing wells and thus save financial resources. One part of well construction is the casing design, that is, the correct selection of the diameter and installation depth of casing strings with certain mechanical characteristics in order to withstand changing conditions during the entire life of the well. The cost of procuring casings and their installation and cementing represents a large part of the well construction costs. Therefore, the challenge is to design such casing strings that will withstand all stresses with the least possible cost. The thesis deals with the theoretical approach of casing design and the possible causes of the deviation of the final construction of the well from the designed values. As a part of this, two constructions of well X on the exploratory field Y, with different number of casing strings, were made and compared. Landmark software, the StressCheck™ module, was used for the well construction purposes.

Keywords: well construction, casing, stresses, optimization of casing design,
StressCheck™

Thesis contains: 78 pages, 21 tables, 23 figures and 27 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Co-mentor: Postdoctoral Researcher Petar Mijić, PhD

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

Date of defense: February 17, 2023, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA.....	IV
1. UVOD	1
2. TEMELJNI PRINCIPI KONSTRUKCIJE ZACJEVLJENJA BUŠOTINE	3
2.1. Funkcije zaštitnih cijevi	5
2.2. Vrste nizova zaštitnih cijevi.....	6
2.2.1. <i>Usmjerivač ili konduktor niz zaštitnih cijevi</i>	<i>7</i>
2.2.2. <i>Površinski ili strukturalni niz zaštitnih cijevi</i>	<i>8</i>
2.2.3. <i>Uvodni niz zaštitnih cijevi</i>	<i>8</i>
2.2.4. <i>Tehnički niz zaštitnih cijevi.....</i>	<i>9</i>
2.2.5. <i>Proizvodni ili eksploatacijski niz zaštitnih cijevi.....</i>	<i>9</i>
2.2.6. <i>Lajner ili „izgubljeni niz“ zaštitnih cijevi</i>	<i>10</i>
2.3. Tehničke karakteristike zaštitnih cijevi	10
2.4. Odabir dubine dna niza zaštitnih cijevi.....	12
2.4.1. <i>Odabir dubine dna tehničkog i dubljih nizova zaštitnih cijevi</i>	<i>14</i>
2.4.2. <i>Odabir dubine dna uvodnog niza zaštitnih cijevi</i>	<i>15</i>
2.4.3. <i>Odabir dubine dna usmjerivača</i>	<i>16</i>
2.5. Odnosi promjera dlijeta i zaštitnih cijevi	16
2.6. Spojnice zaštitnih cijevi	18
3. SUVREMENE METODE PROJEKTIRANJA ZACJEVLJENJA.....	19
3.1. Unutarnji tlak	25
3.2. Vanjski tlak	27
3.3. Uzdužna opterećenja	29
3.4. Kombinirana opterećenja	30
4. UZROCI ODSUPANJA KONSTRUKCIJE BUŠOTINE OD POČETNIH PROJEKTIRANIH VRIJEDNOSTI	32
4.1. Klasifikacija bušotine	33
4.2. Ušteda vremena.....	34
4.3. Ušteda financijskih sredstava.....	34

4.4.	Dostupnost cijevnog alata i opreme	34
4.5.	Vrijednosti naprezanja	35
4.6.	Radovi u bušotini	35
4.7.	Način proizvodnog opremanja bušotine	36
4.8.	Geološke karakteristike područja.....	36
5.	KONSTRUKCIJE ZACJEVLJENJA BUŠOTINE X	38
5.1.	Planirana konstrukcija bušotine	39
5.1.1.	<i>Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm (uvodni niz zaštitnih cijevi).....</i>	<i>45</i>
5.1.2.	<i>Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm (tehnički niz zaštitnih cijevi)</i>	<i>49</i>
5.1.3.	<i>Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm (proizvodni (eksploatacijski) niz zaštitnih cijevi)</i>	<i>53</i>
5.2.	Optimizirana konstrukcija bušotine X	58
5.2.1.	<i>Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm (uvodni niz zaštitnih cijevi).....</i>	<i>61</i>
5.2.2.	<i>Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm (proizvodni (eksploatacijski) niz zaštitnih cijevi)</i>	<i>65</i>
6.	USPOREDBA DVAJU KONSTRUKCIJA BUŠOTINA.....	70
6.1.	Predviđeno vrijeme trajanja bušačkih operacija	70
6.2.	Planirani troškovi izrade bušotine X.....	73
7.	ZAKLJUČAK	75
8.	IZVORI	77

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Nizovi zaštitnih cijevi.....	7
Slika 2-2. Određivanje dubina peta nizova zaštitnih cijevi na temelju gradijenata pornog tlaka i tlaka raspucavanja naslaga.....	13
Slika 2-3. Odabir dubine dna uvodnog niza zaštitnih cijevi	16
Slika 3-1. Dizajn zacjevljenja s obzirom na unutarnji tlak (uvodni niz).....	27
Slika 3-2. Dizajn zacjevljenja s obzirom na vanjski tlak (tehnički niz).....	29
Slika 3-3. Elipsa traksijalnih naprezanja popuštanja.....	31
Slika 4-1. Prikaz ugrađenih i cementiranih nizova zaštitnih cijevi – 339,7 mm – 244,5 mm – 139,7 mm.....	32
Slika 5-1. Prognozni geološki stup istražne bušotine X.....	39
Slika 5-2. Shema planirane konstrukcije bušotine X	41
Slika 5-3. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu	47
Slika 5-4. Prikaz elipse naprezanja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm	48
Slika 5-5. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu	51
Slika 5-6. Prikaz elipse naprezanja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm	52
Slika 5-7. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu	55
Slika 5-8. Prikaz elipse naprezanja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm	56
Slika 5-9. Shema optimizirane konstrukcije bušotine X.....	59
Slika 5-10. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu	63
Slika 5-11. Prikaz elipse naprezanja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm	64
Slika 5-12. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu	67
Slika 5-13. Prikaz elipse naprezanja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm	68

Slika 6-1. Grafički prikaz vremenskog plana izrade bušotine X s planiranom konstrukcijom bušotine	71
Slika 6-2. Grafički prikaz vremenskog plana izrade bušotine X s optimiziranom konstrukcijom bušotine	72
Slika 6-3. Usporedba planiranih troškova prvotno planirane i optimizirane konstrukcije .	74

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Minimalne i maksimalne vrijednosti granice tečenja te minimalna granica kidanja za različite kvalitete čelika zaštitnih cijevi	11
Tablica 2-2. Uobičajene konstrukcije zacjevljenja kanala bušotine	17
Tablica 2-3. Uobičajene kombinacije dlijeta i zaštitnih cijevi u kompaniji INA d.d.	18
Tablica 5-1. Planirana konstrukcija bušotine X.....	40
Tablica 5-2. Tehnički podaci o cijevima promjera 508,0 mm odabranim za konduktorski niz zaštitnih cijevi	43
Tablica 5-3. Tehnički podaci o cijevima promjera 339,7 mm odabranim za uvodni niz zaštitnih cijevi.....	43
Tablica 5-4. Tehnički podaci o cijevima promjera 244,5 mm odabranim za tehnički niz zaštitnih cijevi.....	44
Tablica 5-5. Tehnički podaci o cijevima promjera 177,8 mm odabranim za proizvodni (eksploatacijski) niz zaštitnih cijevi	45
Tablica 5-6. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm ..	45
Tablica 5-7. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm ..	49
Tablica 5-8. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm ..	53
Tablica 5-9. Minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti	57
Tablica 5-10. Optimizirana konstrukcija bušotine X.....	58
Tablica 5-11. Tehnički podaci o cijevima promjera 339,7 mm odabranim za konduktorski niz zaštitnih cijevi.....	60
Tablica 5-12. Tehnički podaci o cijevima promjera 244,5 mm odabranim za uvodni niz zaštitnih cijevi.....	60
Tablica 5-13. Tehnički podaci o cijevima promjera 139,7 mm odabranim za proizvodni (eksploatacijski) niz zaštitnih cijevi	61
Tablica 5-14. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm	62
Tablica 5-15. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm	65
Tablica 5-16. Minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti	69
Tablica 6-1. Prikaz vremenskog plana izrade bušotine X s početno planiranom konstrukcijom bušotine	71
Tablica 6-2. Prikaz vremenskog plana izrade bušotine X s optimiziranom konstrukcijom bušotine.....	72

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

OZNAKA	OPIS	JEDINICA
$\frac{D_n}{t}$	omjer nominalnog vanjskog promjera i debljine stijenke	/
API	Američki naftni institut (engl. <i>American Petroleum Institute</i>)	/
DF	Konstruktivski koeficijent naprezanja (engl. <i>Design Factor</i>)	/
D_n	Nominalni vanjski promjer cijevi	m
ECD	Ekvivalentna gustoća isplake (engl. <i>Equivalent Circulating Density</i>)	kg/m ³
H	Dubina	m
H_e	Dubina razmatranja	m
p	Tlak	MPa
p_{cr}	Kritični dozvoljeni tlak gnječenja	MPa
p_r	Tlak rasprskavanja	MPa
SF	Sigurnosni koeficijent (engl. <i>Safety Factor</i>)	/
SF_{min}	Minimalni sigurnosni koeficijent (engl. <i>Minimum Safety Factor</i>)	/
t	Nominalna debljina stijenke cijevi	m
$\Delta\rho_e$	Povećanje gustoće isplake zbog erupcije fluida	kg/m ³
ρ	Gustoća isplake	kg/m ³
ρ_{ekv}	Ekvivalentna gustoća isplake na dubini razmatranja	kg/m ³
σ_d	Minimalna čvrstoća cijevi do granice tečenja	MPa

1. UVOD

Različite industrije posljednjih godina puno napora ulažu u povećanje efikasnosti procesa ili proizvoda. Povećane cijene sirovina, tehnoloških procesa izrade konačnih proizvoda i projekata općenito dovele su do strožih završnih ispitivanja kao i evaluacije standardiziranih procedura pri provedbi samih projekata. Takav je trend i u naftnoj industriji, gdje se pokušavaju izraditi što dublje i kompleksnije bušotine na što isplativiji način te pritom uvesti nova poboljšanja u čitavom procesu.

Od kraja 19. stoljeća pa sve do danas napravljena su mnoga istraživanja s ciljem pronalaska naftnih i plinskih ležišta iz kojih je ekonomski isplativo pridobivanje ležišnih fluida. Prilikom toga, izbušen je veliki broj bušotina. Iako su seizmička istraživanja i dalje prisutna u pronalasku novih ležišta, izazov naftne industrije 21. stoljeća je iz postojećih polja proizvesti dodatne količine ugljikovodika (i geotermalne vode), odnosno pronaći što kvalitetniju i još neiskorištenu kolektorsku naslagu te ju privesti eksploataciji.

Uspješno poslovanje svake naftne kompanije temelji se na pronalasku i razradi naftnih i plinskih polja (i geotermalnih voda) dok je glavni zadatak odgovornih projekatara i bušaćih inženjera doseći željene geološke formacije uz najmanji mogući trošak. Ispravno projektiranje bušotine ključna je stvar za optimiziranje bušaćih operacija i smanjivanje troškova (Pašić, 2020). Kako bi se ostvarili navedeni ciljevi, projektiranje bušotine i samo bušenje zahtijevaju neprekidna poboljšanja te naftni inženjeri trebaju biti upoznati s bušaćim praksama na prostoru gdje se bušotina izrađuje. No, uobičajene prakse na pojedinom istražnom ili razradnom prostoru nisu uvijek dovoljne, odnosno nije dozvoljeno oslanjati se izričito na njih pri projektiranju i izvedbi novih bušotina. Stoga je neophodno da projektantska služba bude prilagodljiva i spremna na izazove te da iz svakog projekta izvede određene zaključke kako bi smanjila ukupne troškove budućih projekata.

Kako bi se ugljikovodici (i geotermalna voda) mogli proizvoditi, potrebno je izraditi bušotinu. Sam projekt izrade bušotine predstavlja iznimno skup i zahtjevan proces. Nadalje, broj problema koji se javljaju tijekom normalne izrade bušotine povećava se s većim dubinama zalijeganja kolektorskih stijena. Stupanj istraženosti određenog područja, saznanja stečena na temelju prethodno izrađenih bušotina, obavljena geofizička i druga mjerenja ili ispitivanja prije i tijekom njihove izrade utječu na pouzdanost podataka koji se koriste za izradu novih bušotina (Krištafor, 2009). Bušotina treba biti izrađena na siguran način kako se ne bi ugrozili osoblje i oprema tijekom procesa bušenja do željenih geoloških

formacija. Stoga, projekt bušotine treba omogućiti sigurnu izradu kanala bušotine uz minimalne financijske troškove.

Jedan od glavnih dijelova projekta bušotine jest sama konstrukcija zacjevljenja. Zacjevljenje predstavlja ugradnju niza zaštitnih cijevi (engl. *casing string*) odgovarajućeg promjera do projektirane dubine i njegovu cementaciju, i to nakon svake izbušene sekcije (dionice) kanala bušotine. Dubina ugradnje pete, odnosno dna niza zaštitnih cijevi te odabir kvalitete čelika samih cijevi najbitnije su stavke u projektiranju zacjevljenja kako bi cijevi izdržale sva naprezanja tijekom čitavog radnog vijeka bušotine. Općenito, tehnički ispravno i svrsishodno zacjevljenje bušotine predstavlja garanciju uspješne realizacije predviđenih zahvata i privođenja bušotine njezinom cilju, što će najbolje opravdati uložena sredstva (Borzatti et al., 1989).

U radu će biti objašnjena uloga zaštitnih cijevi te osnovna načela konstrukcije zacjevljenja. Cilj rada je optimiziranje zacjevljenja kanala bušotine uklanjanjem jednog niza zaštitnih cijevi, u ovom slučaju tehničkog niza. Također, analizirat će se uzroci odstupanja od projektirane konstrukcije bušotine te će se sukladno tome obraditi i usporediti dva projekta konstrukcije bušotine, prvotno projektiran te naknadno optimiziran projekt konstrukcije kanala bušotine na primjeru bušotine X na istražnom polju Y. Za projektiranje zacjevljenja korišten je programski paket Landmark, modul StressCheckTM.

2. TEMELJNI PRINCIPI KONSTRUKCIJE ZACJEVLJENJA BUŠOTINE

Prilikom izrade kanala bušotine obavljaju se mnoge tehnološke operacije i postupci koje bi trebale biti izvedene uz minimalne (ili nikakve) probleme i uz poštivanje svih zakonskih regulativa države u kojoj se radovi izvode. Neke od glavnih operacija prilikom izrade bušotine na kopnu su: priprema bušotinskog radnog prostora i montaža postrojenja, bušenje, mjerenja u kanalu bušotine, ugradnja i cementacija zaštitnih cijevi te u slučaju pronalaska ekonomski isplativih količina ugljikovodika (i geotermalne vode) – proizvodno opremanje bušotine i privođenje bušotine proizvodnji. Kako bi se navedene operacije izvodile u skladu s projektom i određenim tijekom, potrebno je prethodno izraditi projekt bušotine u kojem će svi radovi na lokaciji bušotine biti detaljno opisani, od početka do kraja projekta. Kao što je rečeno, jedna od glavnih operacija tijekom izrade bušotine, odnosno samog projekta bušotine, jest njeno zacjevljenje. Projekt bušotine vrlo je složen tehničko-tehnološki zadatak u kojem se velika pažnja treba posvetiti ispravnom i svrsishodnom odabiru zaštitnih cijevi. One će morati, i u najnepovoljnijem okružju, izdržati opterećenja u svim uvjetima, kako tijekom bušenja, ispitivanja i opremanja bušotine, tako i tijekom njenog cjelokupnog radnog vijeka (Krištafor, 2009).

Kako su istraživanja u cilju pronalaska ležišta s akumuliranim komercijalnim količinama ugljikovodika (i geotermalne vode) dosegla sve veće dubine, tako su porasli promjeri i ukupan broj nizova zaštitnih cijevi potrebnih za uspješnu izradu i opremanje takvih dubokih bušotina. Ugradnja zaštitnih cijevi, odnosno operacija samog zacjevljenja jest jedna od najskupljih stavki u projektu bušotine; neke studije su pokazale da troškovi cijevne opreme (engl. *tubulars*) u prosjeku iznose od 15% do 35% ukupnog troška projekta bušotine (Halal et al., 1996). Shodno tome, odgovornost je projektanta da izradi projekt sa što jeftinijem programom zacjevljenja koji će omogućiti da bušotina bude sigurno izrađena te da budući radovi u bušotini mogu biti sigurno obavljani tijekom njenog cijelog radnog vijeka. Uštede koje mogu biti ostvarene izradom optimalnog programa zacjevljenja, kao i rizici neodgovarajućeg odabira, su bitni faktori koji opravdavaju znatan inženjerski napor prilikom te faze projektiranja.

Čak i pri dobro utemeljenoj i ažuriranoj dokumentaciji, karakterističnoj za aktivna eksploatacijska polja, svaka naredna bušotina predstavlja novi inženjerski izazov. Bez obzira na stupanj istraženosti određenog područja, uvijek se pojavljuju nove okolnosti na koje treba

promptno reagirati i koje se često u vrlo kratkom periodu moraju prevladati. U tom su kontekstu postavljeni sljedeći ciljevi (Krištafor, 2009):

- kroz sveobuhvatnu analizu vezanu za usporedbu prognoznih i realnih uvjeta u bušotinama opravdati pridavanje važnosti odabiru smještanja dna zaštitnih cijevi, što je preduvjet za uspješnu realizaciju projekta bušotine, odnosno omogućavanje nastavka bušenja bez većih poteškoća;
- dati kritički osvrt na postojeće metode i postupke dizajniranja zaštitnih cijevi uz razmatranje svrsishodnosti primjene pojedinih kriterija ili skupa uvjeta unutar važećih i primjenjivanih metoda u naftaškoj praksi. To se posebice odnosi na slučajeve kad se njihovim striktnim pridržavanjem ne može doći do odgovarajućeg ili barem racionalnog rješenja;
- prilagoditi kriterije odabira zaštitnih cijevi, u što je moguće većoj mjeri, uvjetima okruženja bušotina te
- predložiti nove elemente unutar pojedinih kriterija odabira s ciljem smanjenja troškova, a uz zadržavanje potrebnog stupnja sigurnosti, te razmatranje drugih elemenata u cilju poboljšanja ili olakšavanja realizacije projekta bušotine.

Konstrukcija bušotine podrazumijeva (Krištafor, 2018) odabir:

- promjera dlijeta za bušenje pojedine dionice kanala bušotine,
- sastava i promjera bušačkih alatki kojima se izrađuje kanal bušotine od ušća do dna,
- broja, duljine, promjera i debljine stijenke zaštitnih cijevi,
- dubine dna niza zaštitnih cijevi,
- tipova zaštitnih cijevi te
- minimalne kvalitete čelika.

Cilj izrade programa zacjevljenja je postizanje takve konstrukcije bušotine kroz koju će se ekonomično odvijati pridobivanje ugljikovodika (i geotermalnih voda) iz ležišta uz uvažavanje svih mogućih problema koji se mogu pojaviti pri dosezanju ležišta. Uz konačnu dubinu i promjer bušotine, izbor zaštitnih cijevi ovisi o još nekoliko faktora kao što su: svojstva stijena i slojnih fluida, kontrola tlaka u bušotini, zakonski zahtjevi pojedinih država na čijem se teritoriju obavlja bušenje i dr. Uz navedene faktore, potrebno je i naglasiti proizvodnu zonu kao željeni geološki objekt iz kojeg će se ubuduće pridobivati ugljikovodici (i geotermalna voda) te je potrebno izvesti takvo zacjevljenje bušotine koje će odgovarati uvjetima tlaka i temperature u podzemlju, svojstvima ležišnih fluida te kasnije ugrađenoj

proizvodnoj opremi. Stoga se postupak projektiranja zacjevljenja provodi principom „odozdo prema gore“ odnosno prvi niz koji se projektira je proizvodni niz zaštitnih cijevi unutar kojeg će biti ugrađen uzlazni niz cijevi (engl. *tubing*). Nakon proizvodnog niza, slijedi projektiranje tehničkog niza zaštitnih cijevi radi sigurnijeg dosezanja proizvodne naslage te na kraju projektiranje uvodnog niza cijevi. Geometrijske karakteristike uvodnog i tehničkih nizova zaštitnih cijevi određeni su karakteristikama svakog ugrađenog niza manjeg promjera te zahtjevima kod oblikovanja ušća bušotine (Krištafor, 2009). Projektiranje obrnutim redoslijedom nerijetko dovodi do ograničenja u proizvodnji pa do čak i trajnog napuštanja bušotine. U tehničkom smislu konstrukcija zacjevljenja temelji se na (Borzatti et al., 1989):

- predviđenom zadatku i cilju bušotine,
- hidrodinamičkim uvjetima koji se očekuju pri raskrivanju naslaga stijena,
- kritičnim vrijednostima termodinamičkih i geometrijskih parametara,
- tehničkim zahvatima vezanim uz različite postupke koji se namjeravaju obavljati te
- proizvodnom vijeku bušotine.

Svaka bušotina je složen naftno - rudarski objekt te je, ovisno o točnosti geološke prognoze, potrebno paralelno održavati određeni stupanj sigurnosti odabirom tehnički najpovoljnijih zaštitnih cijevi uz minimalnu cijenu njihova koštanja.

2.1. Funkcije zaštitnih cijevi

Zaštitne cijevi služe za obavljanje više funkcija tijekom izrade kanala i tijekom samog opremanja i proizvodnje iz bušotine. Zadaće zaštitnih cijevi su (Krištafor, 2009):

- 1) odjeljivanje i izoliranje probušenih naslaga radi onemogućavanja komunikacije fluida između različitih hidrodinamičkih cjelina. To se uglavnom postiže cementiranjem prstenastog prostora oko zaštitnih cijevi. Omogućava se, dakle, maksimiziranje pridobivanja ležišnog fluida iz jedne ili više naslaga istih ili različitih kolektorskih svojstava;
- 2) smanjenje problema tijekom bušenja odnosno premošćivanje kritičnih mjesta probušenih naslaga. Osiguravanje potpore stijenama kanala bušotine u stijenama sklonim zarušavanju, premošćivanje kaverni ili voluminoznih ispranih područja te izoliranje mjesta djelomičnih ili potpunih gubljenja optoka isplake u slabim ili raspucanim naslagama, mogu znatno olakšati daljnju izradu kanala uspostavljanjem stabilnih hidrodinamičkih uvjeta u bušotini. U slučaju nezaštićenog kanala moglo bi

zbog zarušavanja doći do gubitka kanala bušotine i potrebe za ponovnim bušenjem istog ili novog kanala;

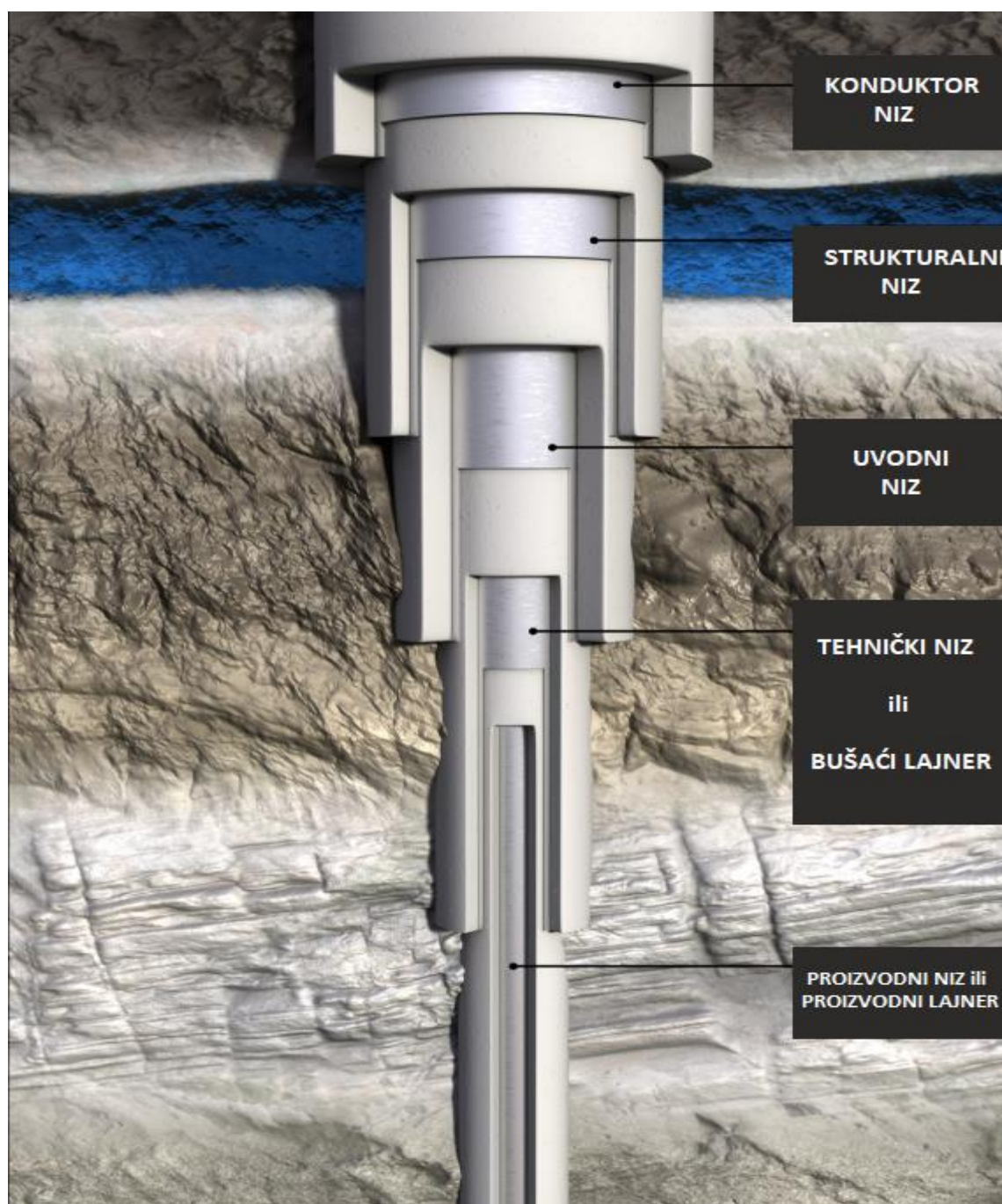
- 3) osiguravanje stabilne bušotine poznatog promjera i dubine kroz koju će se moći izvoditi daljnje produbljivanje, ispitivanje i opremanje;
- 4) uspostavljanje pouzdane veze s opremom ušća bušotine i zaštita od neočekivanih i nekontroliranih erupcija fluida tijekom bušenja;
- 5) omogućavanje toka fluida s dna bušotine do ušća uz što manje hidrauličke otpore te
- 6) sprječavanje zagađenja potpovršinskih vodonosnika pitke ili geotermalne vode.

2.2. Vrste nizova zaštitnih cijevi

Pri izradi bušotina, često se nailazi na problematična okruženja, kao što su zone visokog tlaka, slabe i raspucane te nekonsolidirane formacije i sl. Stoga je potrebno izraditi kanal bušotine i ugraditi zaštitne cijevi u nekoliko koraka kako bi se izolirale navedene problematične zone i omogućilo daljnje bušenje. Pri projektiranju zacjevljenja, potrebno je koristiti više vrsta nizova zaštitnih cijevi kako bi se, uzimajući u obzir uvjete u bušotini, doseglo željeno ležište ugljikovodika (i geotermalnih voda) na određenoj dubini. Cijevi se postavljaju na različitim dubinama i ponekad se neke od njih mogu izostaviti, ovisno o uvjetima bušenja. Tako se razlikuju sljedeći nizovi zaštitnih cijevi (Adams i Charrier, 1985):

1. usmjerivač/konduktor niz zaštitnih cijevi (engl. *drive pipe; conductor casing*)
2. površinski/strukturni niz zaštitnih cijevi (engl. *structural casing*)
3. uvodni niz zaštitnih cijevi (engl. *surface casing*)
4. tehnički niz(ovi) zaštitnih cijevi (engl. *intermediate casing*)
5. proizvodni niz zaštitnih cijevi (engl. *production casing; oil string*)
6. lajner ili „izgubljeni niz“ zaštitnih cijevi (engl. *liner casing*)

Navedeni nizovi prikazani su na Slici 2-1. Površinski/strukturni niz zaštitnih cijevi se uobičajeno ne koristi pri izradi bušotina u Republici Hrvatskoj.



Slika 2-1. Nizovi zaštitnih cijevi (Halliburton, 2015)

2.2.1. *Usmjerivač ili konduktor niz zaštitnih cijevi*

Prvi niz zaštitnih cijevi koji se ugrađuje u buduću bušotinu je usmjerivač ili konduktor niz, u hrvatskoj naftaškoj praksi poznat još kao i „šoder kolona“. Pri bušenju na kopnu, navedeni niz se u većini slučajeva ugrađuje prilikom pripreme bušotinskog radnog prostora, odnosno prilikom izrade temelja za ušće bušotine. Prilikom pripreme radova na kopnu i na većini odobalnih projekata bušenja, vodeći niz ugrađuje se koristeći velike diesel-čekiće. U slučaju tvrdih stijena, prvotno se buši plitka bušotina velikog promjera gdje se nakon toga

ugrađuje i cementira niz cijevi. Primarna svrha vodećeg niza je omogućiti povratni tok isplake do sustava za pročišćavanje. Na taj način sprječava se erozijsko djelovanje isplake na širi prostor oko kanala bušotine po površini lokacije, ispod same konstrukcije bušačkog postrojenja, čime bi se potencijalno ugrozila njegova stabilnost. Dodatna svrha vodećeg niza je ta što pri bušenju vrlo plitkih naslaga može doći do problema s gubitkom cirkulacije kao i do samog ispiranja i urušavanja stijenki kanala, gdje vodeći niz cijevi to tada sprječava. Ugrađuje se na dubinama od 30 do 100 m (100 do 300 ft.), u promjerima od 660,4 mm (26 in.) do 1067,0 mm (42 in.) (Adams i Charrier, 1985).

2.2.2. Površinski ili strukturalni niz zaštitnih cijevi

Površinski niz može služiti kao dodatni niz zaštitnih cijevi koji će se ugraditi od površine do manjih dubina kako bi se zaštitile potpovršinske nekonsolidirane formacije, premostili plitki vodonosnici, minimizirali problemi uslijed dotoka (engl. *kick*) plitkih plinova, omogućio optok isplake te zaštitili temelji platforme u slučaju odobalnog bušenja. Diverter, odnosno niskotlačni prstenasti protuerupcijski uređaj (engl. *preventer*), može biti ugrađen na površinski niz ako je dubina ugradnje pete niza plitka, gdje se može očekivati prisutnost plitkih plinova. Diverter omogućuje usmjeravanje bušačkog fluida ili plinskog dotoka dalje od postrojenja i osoblja u slučaju dotoka iz plitkih naslaga. Površinski niz se uvijek cementira do površine i služi kao početna potpora za odsjedanje naknadnih nizova zaštitnih cijevi i prirubnica za opremu zaštite ušća bušotine (preventerski sklop, bušotinska glava). Niz se ugrađuje na dubinama od 180 m (600 ft.) do 300 m (1000 ft.), u promjerima od 473,0 mm (18 5/8 in.) do 762,0 mm (30 in.) (Rabia, 2002).

2.2.3. Uvodni niz zaštitnih cijevi

Uvodni niz ugrađuje kako bi se premostili vodonosnici, rastresite naslage i spriječilo urušavanje stijenki kanala, izolirali slojevi plitkih plinova, minimalizirali gubitci isplake u plitkim propusnim zona te prekrile slabe naslage koje bi bile raspucane zbog svladavanja tlakova u bušotini uslijed dotoka (Adams i Charrier, 1985). Kao i površinski niz, uvodni niz također omogućava oblikovanje ušća bušotine (ugradnja preventera i bušotinskih glava) te služi za podržavanje ostalih nizova zaštitnih cijevi i njihovu zaštitu od korozije, isključujući lajner. Peta uvodnog niza ugrađuje se u dovoljno čvrste, nepropusne naslage stijena čime će se spriječiti hidrauličko raspucavanje stijena oko pete niza većim hidrostatičkim tlakovima koji će se ostvariti tijekom nastavka radova u bušotini. Uvodni nizovi se cementiraju do ušća, a uobičajeni promjeri su 339,7 mm (13 3/8 in.) do 504,0 mm (20 in.) (Krištafor, 2009).

2.2.4. Tehnički niz zaštitnih cijevi

Tehnički niz postavlja se kao niz ili nizovi cijevi između uvodnog i proizvodnog niza zaštitnih cijevi. Postavlja se u prijelazne zone prije ili nakon dosezanja formacija s abnormalno velikim tlakovima. Nadalje, štiti od naslaga gdje se mogu očekivati veliki gubitci isplake, nekonsolidiranih formacija i formacija sklonih bubrenju ili zarušavanju te štiti od pokretnih naslaga solnih doma. Pri bušenju zona abnormalnih tlakova na velikim dubinama, gdje se koristi isplaka velike gustoće, tehnički niz cijevi služi kao zaštita plitkih formacija od mogućeg frakturiranja zbog postizanja visokog hidrostatskog tlaka kao i zaštita od mogućeg diferencijalnog prihvata (Krištafor, 2009). Slično tome, pri bušenju zona normalnih tlakova (ispod zona abnormalnih tlakova), tehnički niz se postavlja kako bi se mogla koristiti isplaka manje gustoće. Dobro cementiranje tehničkog niza cijevi mora biti osigurano kako bi se spriječila komunikacija između različitih hidrodinamičkih cjelina iza zaštitnih cijevi, posebice između dubljih naslaga ugljikovodika (i geotermalnih voda) i plićih vodonosnika. Ponekad je potrebna primjena višestupanjske cementacije kako bi se zaštitile slabe formacije od velikog hidrostatskog tlaka uzrokovanog velikom duljinom stupca cementne kaše. Prilikom određivanja dubine ugradnje treba voditi računa da se peta niza smjesti u nepropusne naslage. Dubine ugradnje tehničkih nizova zaštitnih cijevi variraju od 2 000 m (7 000 ft.) do 4 500 m (15 000 ft.) (Rahman i Chilingarian, 1995), no mogu biti i pliće ugrađene, dok su najčešći promjeri 244,5 mm (9 5/8 in.) i 339,7 mm (13 3/8 in.).

2.2.5. Proizvodni ili eksploatacijski niz zaštitnih cijevi

Proizvodni niz zaštitnih cijevi postavlja se kroz potencijalno ležište koje će u slučaju pozitivnih rezultata ispitivanja postati proizvodna zona, ali ne i onda kada će se proizvodna zona opremiti unutar otvorenog kanala bušotine. Proizvodni niz je zadnji niz ugrađen u bušotinu, a peta niza se nalazi iznad ili ispod proizvodnih naslaga. Služi za izoliranje proizvodnih naslaga, omogućuje selektivno pridobivanje slojnog fluida iz višeslojnih ležišta, kao i za samo opremanje bušotine, odnosno ugradnju uzlaznog niza. Dizajniran je da izdrži tlak gušenja eksploatacijske bušotine te da bude otporan na tlakove koji se mogu javiti u slučaju stimulacije bušotine, prilikom opremanja ili održavanja. Sastav slojnog fluida, odnosno prisutnost agresivnih komponenti posebno se razmatra te izravno utječe na kvalitetu odabranog čelika. Dubina ugradnje ovisi o dubini proizvodnog ili istražnog intervala, a uobičajeni promjeri proizvodnog niza iznose 139,7 mm (5 1/2 in.) i 177,8 mm (7 in.).

2.2.6. Lajner ili „izgubljeni niz“ zaštitnih cijevi

Lajner je skraćeni niz zaštitnih cijevi koji ne doseže do ušća bušotine nego se ugrađuje pomoću vješalice lajnera od 50 do 150 m unutar prethodnog niza. Služi za izoliranje otvorenog dijela kanala bušotine ispod prethodno ugrađenog niza zaštitnih cijevi. Isto tako, ugrađuje se zbog prisutnosti zahtjevnih uvjeta (veliki tlakovi, kiseli plinovi). Koristi se kao dio tehničkog (bušaći lajner) ili proizvodnog niza (proizvodni lajner). Osnovna prednost lajnera je u smanjenim troškovima u odnosu na ugradnju niza po cijeloj visini kanala bušotine i manjeg vremena potrebnog za njegovu ugradnju (Matanović, 2007).

2.3. Tehničke karakteristike zaštitnih cijevi

Zaštitne cijevi koje se ugrađuju u bušotinu izrađene su od čelika, iako postoji i mogućnost njihove izrade od kompozitnih materijala. Čelik je metalna legura koja se ponajviše sastoji od željeza s primjesom ugljika u sastavu od 0,2% do 2,1%, ovisno o željenim svojstvima konačnog čeličnog proizvoda (Mitchell, 2006). Ostale primjese u legiranom čeliku koje se također koriste su mangan, krom i aluminij. Zaštitne cijevi koje se koriste u naftnoj industriji su većinom izrađene od čelika s 0,3% ugljika te s malom primjesom mangana kako bi mu se povećala čvrstoća. Mnogi proizvođači podižu čvrstoću čelika procesom kaljenja i popuštanja, tzv. Q&T procesom (engl. *quenching and tempering*) te je utvrđeno da količina fosfora u kemijskom sastavu čelika ne smije prijeći 0,04%, dok količina sumpora ne smije prijeći 0,06% kako bi kvaliteta čelika bila zadovoljavajuća (Bourgoyne et al., 1986). Američki naftni institut, u nastavku rada API (engl. *American Petroleum Institute*) razvio je standarde za zaštitne cijevi koji su prihvaćeni i primjenjuju se u svim zemljama koji se bave istraživanjem i proizvodnjom nafte i plina. Zaštitne cijevi se klasificiraju prema sljedećim karakteristikama (API 5CT, 1992):

- načinu izrade,
- kvaliteti čelika,
- vrsti spojnice,
- rasponu duljine te
- debljini stijenke (i jediničnoj masi).

Kvaliteta čelika određuje osnovna mehanička svojstva cijevi, dok dodavanjem primjesa čeliku i termičkom obradom poboljšavamo primarna mehanička i kemijska svojstva. Standardi API-a određuju minimalne i maksimalne zahtjeve za kvalitetu čelika zaštitne cijevi. Kvaliteta čelika se označava velikim slovom s popraćenom brojkom. Slovo

označava oznaku čelika koju je API svojevrijedno predložio za jedinstveno označavanje kvalitete koja se koristi u preporučenim standardima (naziv), dok brojka označava minimalnu čvrstoću čelika do granice elastičnosti (engl. *yield strength*) izraženu u tisućama psi-a (engl. *pounds-per-square-inch*), a navedenu vrijednost u psi-ma potrebno je pomnožiti konverzijskim faktorom 6 895 kako bi se dobila vrijednost u Pa. Granica elastičnosti definira se kao vlačno naprezanje koje produljuje materijal čelika za 0,5% u odnosu na njegovu početnu duljinu. To se primjenjuje za većinu standardnih kvaliteta čelika prema API standardu, osim za kvalitetu P-110, za koju se granica elastičnosti definira kao vlačno naprezanje koje će produljiti materijal čelika za 0,6% (Mitchell, 2006). U tablici 2-1 prikazane su minimalne i maksimalne vrijednosti čvrstoće čelika do granice elastičnosti i minimalna vlačna čvrstoća do granice kidanja (engl. *tensile strength*) za različite kvalitete čelika zaštitnih cijevi.

Tablica 2-1. Minimalne i maksimalne vrijednosti granice tečenja te minimalna granica kidanja za različite kvalitete čelika zaštitnih cijevi (API 5CT, 2005)

Kvaliteta čelika	Granica elastičnosti				Minimalna granica kidanja	
	Minimalna		Maksimalna		MPa	psi
	MPa	psi	MPa	psi		
H-40	276	40 000	551	80 000	413	60 000
J-55	379	55 000	551	80 000	517	75 000
K-55	379	55 000	551	80 000	655	95 000
N-80	551	80 000	758	110 000	689	110 000
M-65	448	65 000	586	85 000	586	85 000
L-80	551	80 000	655	95 000	655	95 000
C-90	620	90 000	724	105 000	689	100 000
C-95	655	95 000	758	110 000	724	105 000
T-95	655	95 000	758	110 000	724	105 000
P-110	758	110 000	965	140 000	862	125 000
Q-125	862	125 000	1034	150 000	931	135 000

Kao dodatak API standardima za kvalitete čelika vezanih uz zaštitne cijevi, postoje mnogi čelici (kvalitete čelika) koji nisu u skladu s API standardima, a da se široko koriste u

naftnoj industriji. Mehanička svojstva takvih cijevi nisu definirana prema API preporukama. Cijevi od takvog visokokvalitetnog čelika koriste se za specijalne namjene poput ugradnje zaštitnih cijevi unutar zona zasićenih agresivnim medijima (ugljikov dioksid, sumporovodik, kloridi), kada je potrebna iznimno visoka granica kidanja te kada se pokaže potreba za visokom otpornošću na gnječenje (Bourgoyne et al., 1986).

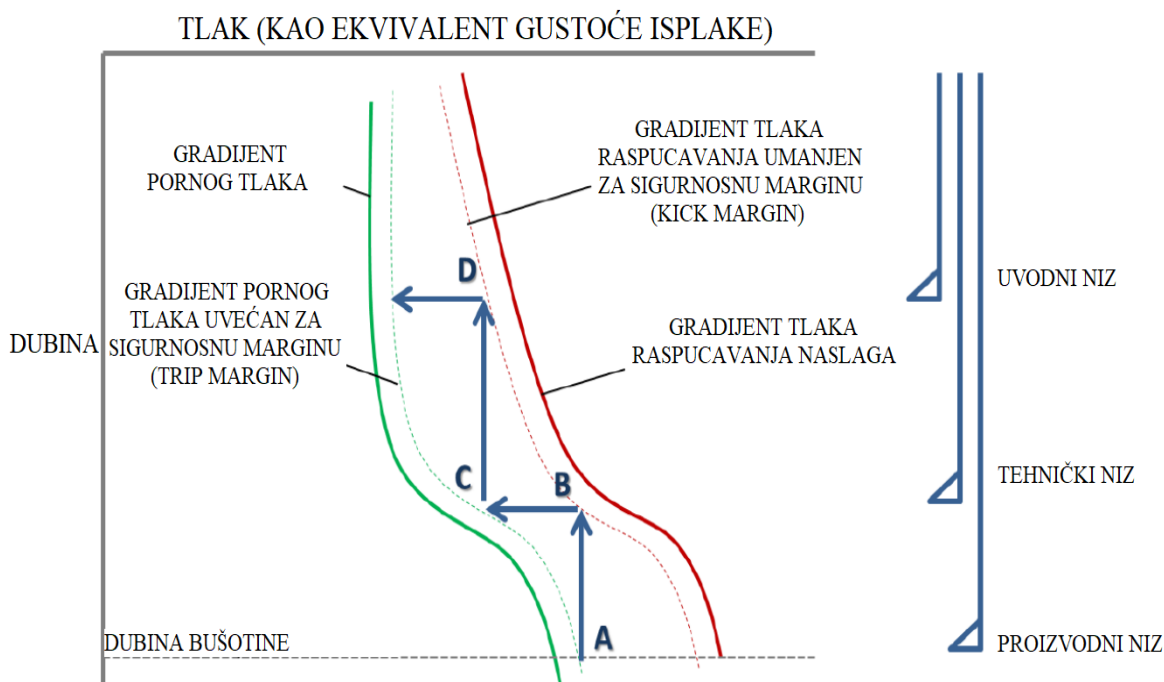
2.4. Odabir dubine dna niza zaštitnih cijevi

Temeljna informacija potrebna prilikom projektiranja zacjevljenja jest odabir adekvatne dubine ugradnje nizova zaštitnih cijevi, odnosno adekvatno postavljanje dna (pete) pojedinog niza. Posljedice preplitke ili preduboke ugradnje zaštitnih cijevi mogu biti veliki problemi tijekom izrade kanala bušotine (kao npr. erupcije, zarušavanja, gubljenja optoka fluida, diferencijalni prihvat, hidrauličko raspucavanje naslaga, ograničene mogućnosti primjene različitih tehnoloških rješenja i slično), što znatno poskupljuje ukupnu cijenu koštanja bušotine, a i sigurnost izrade dovodi se u pitanje (Krištafor, 2009). Dakle, određivanje dubine ugradnje pete zaštitnih cijevi treba biti određeno na način da se omogući uspješno bušenje iduće sekcije kanala bušotine bez potencijalnih dodatnih akcidenata. Stoga je nekoliko faktora potrebno uzeti u obzir kao što su geološki profil podzemlja, zone povećanog slojnog tlaka, prisustvo plitkih plinova, moguće zone gubljenja optoka isplake, poteškoće u bušotini koji se javljaju prilikom bušenja, trajektorija bušotine te zakonske regulative (Santos et al., 1995).

Dubina postavljanja pete niza zaštitnih cijevi direktno je povezana s geološkim uvjetima na razmatranoj lokaciji. Ponekad je glavni kriterij za odabir dubine ugradnje pete niza prekrivanje zona gubljenja cirkulacije. S druge strane, nekad je dubina ugradnje određena na temelju drugih kriterija kao što je izbjegavanje problema diferencijalnog prihvata cijevnog alata, kao npr. u slučaju prekomjerne iscrpljenosti ležišta. Kod dubokih bušotina glavni kriterij je kontrola zona s povećanim tlakom te sprječavanje utjecaja navedenog tlaka na zone s manjim pornim tlakovima (Adams i Charrier, 1985).

Najčešći kriterij vezan uz dubinu ugradnje jest kontrola slojnih tlakova, odnosno poznavanje realnih vrijednosti pornog tlaka i tlaka raspucavanja (frakturiranja) naslaga stijena duž kanala bušotine. Navedeni tlakovi izražavaju se u gradijentima koji predstavljaju odnose pornog tlaka i tlaka raspucavanja s dubinom zalijeganja naslaga. Točnije, u naftaškoj praksi gradijenti tlakova izražavaju se ekvivalentnim gustoćama isplake, a jednostavni prikaz dubina određivanja dna nizova zaštitnih cijevi prikazan je na Slici 2-2. Ekvivalentna gustoća isplake (engl. *Equivalent Circulating Density, ECD*) predstavlja prividno povećanje gustoće

isplake tijekom njene cirkulacije uslijed otpora protjecanju prstenastim prostorom (Gaurina-Međimurec, 2020). Određivanje dubina ugradnje zaštitnih cijevi u domaćoj praksi pri bušenju na kopnu može se odrediti koristeći grafičku metodu, koja na osima sadrži dubinu bušotine i gradijent tlaka kao ekvivalent gustoće isplake.



Slika 2-2. Određivanje dubina peti nizova zaštitnih cijevi na temelju gradijenata pornog tlaka i tlaka raspucavanja naslaga (Rojas Mikheeva, 2017)

Zelena krivulja predstavlja gradijent pornog tlaka duž bušotine, povećan za sigurnosnu marginu (zelena crtkana krivulja), koji ostvaruje gustoća isplake u procesu bušenja. Navedena margina iznad pornog tlaka (engl. *trip margin*) potrebna je kako bi se kontrolirali tlakovi klipovanja koji se javljaju prilikom smanjenja ekvivalentne gustoće isplake tijekom kretanja cijevnog alata prema gore. Uobičajena vrijednost margine iznosi 60 kg/m^3 kojom se ostvaruje tlak od 1,5 do 3,5 MPa veći od pornog (Krištafor, 2009).

Crvena krivulja predstavlja gradijent tlaka raspucavanja naslaga duž bušotine, umanjen za sigurnosnu marginu (crvena crtkana krivulja), koji je također prikazan ekvivalentnom gustoćom isplake. Navedena margina (engl. *kick margin*) potrebna je za gušenje bušotine bez hidrauličkog raspucavanja naslaga i nastajanja podzemnih erupcija fluida. Uobičajena vrijednost margine jednaka je onoj za svladavanje tlakova klipovanja, a ovisi o volumenu i vrsti fluida koji je utekao u bušotinu te o odabranoj metodi gušenja bušotine. Također, crvena krivulja sadrži sigurnosnu marginu i iz razloga što prilikom spuštanja cijevnog alata u bušotinu, može doći do frakturiranja naslaga, uslijed kolebanja tlakova.

U cilju dosezanja projektirane dubine ugradnje proizvodnog niza, potrebno je koristiti gustoću isplake s vrijednosti u točki A koja sprječava utok slojnog fluida. Takva gustoća isplake neće prouzročiti frakturiranje najslabije naslage u kanalu bušotine onda kada je tehnički niz zaštitnih cijevi ugrađen minimalno do točke B, gdje je gradijent tlaka raspucavanja jednak gustoći isplake za ispiranje kanala bušotine do točke A. Sukladno tome, za bušenje dionice kanala bušotine za tehnički niz zaštitnih cijevi (do točke B) potrebna je gustoća isplake s vrijednosti u točki C. Ta će gustoća odrediti dubinu pete uvodnog niza barem do dubine u točki D. Navedeni postupak služi za okvirno određivanja dubine postavljanja peta nizova zaštitnih cijevi.

2.4.1. Odabir dubine dna tehničkog i dubljih nizova zaštitnih cijevi

Pri određivanju dubina ugradnje svakog niza zaštitnih cijevi, glavni kriterij je određivanje gustoće isplake potrebne za svladavanje pornih tlakova prilikom čega neće doći do raspucavanja slabijih i plićih naslaga. Procedura se izvodi od dna prema ušću bušotine (engl. *bottoms-up*). Uz prije navedena smanjenja ekvivalentne gustoće isplake uslijed klipovanja (engl. *swab pressure*) te povećanja ekvivalentne gustoće isplake uslijed otpora protjecanju prstenastim prostorom i pulsiranja tlaka (engl. *surge pressure*), potrebno je u procjenu pornih tlakova uvrstiti i koeficijent sigurnosti. Stvarni tlakovi na dnu bušotine tada uključuju gustoću isplake za uravnoteženje slojnog tlaka i povećanje gustoće za oko 72 do 108 kg/m³ (0,6 do 0,9 lb/gal) zbog kolebanja tlakova i koeficijenta sigurnosti (Adams i Charrier, 1985). Nakon određivanja dubina, potrebno je uzeti u obzir mogućnost diferencijalnog prihvata uslijed djelovanja diferencijalnog tlaka tijekom spuštanja cijevi u bušotinu. Diferencijalni tlak predstavlja razliku između hidrostatskog tlaka stupca isplake i slojnog tlaka. Procedura se izvodi od vrha prema dnu. Diferencijalni prihvati najčešće se javlja na prijelazu u zone s manjim tlakom, gdje je vrijednost diferencijalnog tlaka najveća. Ispitivanja su pokazala da se diferencijalni tlakovi u vrijednostima od 14 do 16 MPa mogu tolerirati u područjima normalnog tlaka, dok se za područja povećanog tlaka toleriraju vrijednosti od 21 do 23 MPa (Krištafor, 2009). Tlak koji ostvaruje stupac slojne vode gustoće oko 1080 kg/m³ (9 lb/gal) razgraničuje područja normalnog i većeg slojnog tlaka. Iako je gustoća slojne vode u praksi obično manja, neke stroge metode dizajniranja ne dozvoljavaju da bude manja od navedene vrijednosti. Ako se proračunom utvrdi da je diferencijalni tlak veći od dozvoljenog, tada ta dubina predstavlja pokusnu dubinu ugradnje tehničkog niza, odnosno dubinu dna najplićeg bušačkog lajnera. Daljnjim proračunom određuje se nova dubina dna tehničkog niza.

2.4.2. Odabir dubine dna uvodnog niza zaštitnih cijevi

Pliće ugrađeni nizovi zaštitnih cijevi, kao što je uvodni niz, obično su izloženi tlakovima koje je potrebno ozbiljnije obuhvatiti i razmotriti prilikom određivanja dubine dna niza, nego kao kod tehničkog niza zaštitnih cijevi ili lajnera. Obično su ti povećani tlakovi rezultat podzemne erupcije slojnih fluida nastali tijekom bušenja dubljih sekcija. Određivanje dubine ugradnje temelji se na kontroli tlakova uslijed dotoka koji se javljaju u plićim naslagama, što se razlikuje od prethodno opisane metode u slučaju dubljih nizova. Ekvivalentne gustoće isplake s većim vrijednostima glavni su razlog podzemnih erupcija jer, kada dođe do dotoka fluida, tlak zatvaranja bušotine na ušću pridodan hidrostatskom tlaku stupca isplake postane dovoljno visok čime dolazi do raspucavanja stijena i stvaranja inducirane frakture. Stoga, pri odabiru dubine ugradnje uvodnog niza, uzima se u obzir ona dubina koja će biti dostatna za izbjegavanje podzemnih erupcija tijekom kontroliranja tlakova uslijed dotoka. Terenska praksa dokazala je iterativni postupak određivanja tlakova erupcija: poznavanjem točnih veličina gradijenata tlaka raspucavanja (izračunatih na temelju brojnih raspoloživih teorijskih obrazaca ili dobivenih mjerenjem tijekom izrade kanala bušotine), višekratnim korištenjem jednadžbe 2-1 može se odrediti dubina ugradnje pete uvodnog niza na kojoj će stijene imati dovoljnu čvrstoću obzirom na tlakove erupcije (Krištafor, 2009):

$$\rho_{ekv} = \frac{H}{H_e} \times \Delta\rho_e + \rho \quad (2-1)$$

Gdje su:

ρ_{ekv} = ekvivalentna gustoća isplake na dubini razmatranja (kg/m^3),

H = dubina bušotine (m),

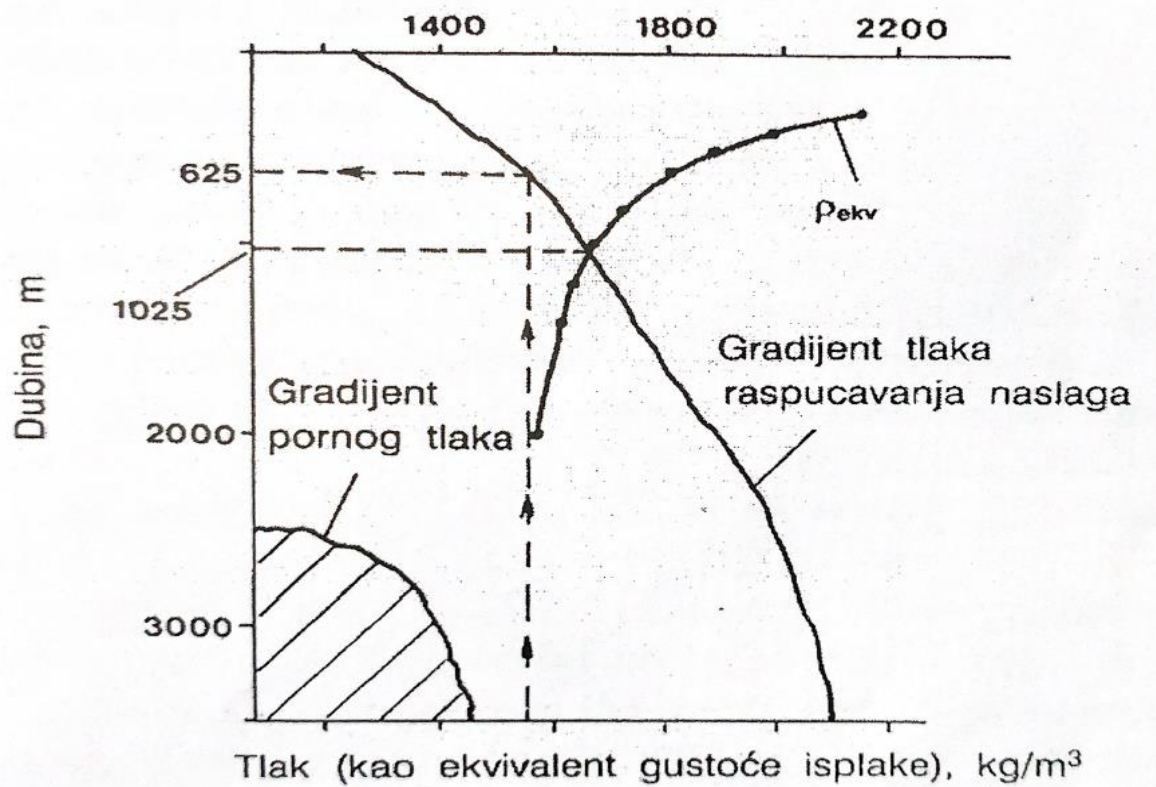
H_e = dubina razmatranja (m),

$\Delta\rho_e$ = povećanje gustoće isplake zbog gušenja erupcije (kg/m^3) i

ρ = (početna) gustoća isplake (kg/m^3).

Vrijednost $\Delta\rho_e$ iz obrasca 2-1 predstavlja prosječno (maksimalno) povećanje gustoće isplake potrebno za gušenje erupcije fluida. Usvojena je vrijednost od oko 60 kg/m^3 ($0,5 \text{ lb/gal}$) koja se, ovisno o uvjetima tijekom bušenja, može i povećati (Adams i Charrier, 1985). Prvo se odabire mala dubina za koju se izračunava gradijent tlaka raspucavanja te ekvivalentna gustoća isplake. U slučaju da je ekvivalentna gustoća isplake veća nego

gradijent raspucavanja, odabire se dublji interval te se proračun ponavlja. Procedura se ponavlja sve dok gradijent raspucavanja postane veći od tlaka ekvivalentne gustoće isplake. Slika 2-3 predočava navedeni postupak, a presjecište dobivene krivulje ekvivalentnih gustoća isplake s krivuljom gradijenta tlaka raspucavanja naslaga daje dubinu dna uvodnog niza zaštitnih cijevi.



Slika 2-3. Odabir dubine dna uvodnog niza zaštitnih cijevi (Krištafor, 2009)

2.4.3. Odabir dubine dna usmjerivača

Dubine dna usmjerivača (prije uvodnog niza zaštitnih cijevi) određuju se na temelju zakonskih regulativa te uobičajenih problema koji se očekuju tijekom bušenja na istražnom/eksploatacijskom području. Premošćivanje mjesta gubljenja isplake, plitkih vodonosnika, nekonsolidiranih formacija kao i izbjegavanje utjecaja plitkih (barskih) plinova neki su od faktora koji utječu na dubinu ugradnje, koji postaju poznati i dokumentirani tijekom bušenja na određenom lokalnom području te ih se poštuje i koristi.

2.5. Odnosi promjera dlijeta i zaštitnih cijevi

Odabir različitih promjera dlijeta i zaštitnih cijevi, kao i njihovih kombinacija, mogu utjecati na razliku između bušotine koja se mora napustiti prije proizvodnog opremanja i bušotine koja je ekonomski i inženjerski uspješno odrađen projekt (Adams i Charrier, 1985).

Neprikladna veličina dlijeta, odnosno njegov promjer, može rezultirati bušotinom toliko malom u promjeru da ju je zbog problema tijekom bušenja i opremanja potrebno napustiti. Zadaća je projektanta da dizajnira takvu konstrukciju bušotine kojom će se izbjeći navedeni problemi. No, svaka uspješno izrađena bušotina ne mora biti i ekonomski isplativa. Projekt bušotine koji omogućava zadovoljavajuće bušenje i opremanje bez previše problema može biti ekonomski neisplativ ukoliko su troškovi izrade bušotine veći od očekivanog povrata investicije.

Prilikom projektiranja konstrukcije zacjevljenja bušotine, potrebno je razmotriti (Adams i Charrier, 1985):

- unutarnji i vanjski promjer zaštitnih cijevi,
- promjer spojnica zaštitnih cijevi i
- promjer dlijeta.

Naftna industrija, točnije međunarodna bušačka praksa razvila je nekoliko uobičajeno korištenih programa konstrukcija bušotine. Temelje se na dostupnosti različitih promjera dlijeta i zaštitnih cijevi te očekivanim problemima tijekom bušenja. Dva programa zacjevljenja, odnosno vanjski promjeri zaštitnih cijevi koji se najčešće koriste nakon što je ugrađen konduktor niz zaštitnih cijevi prikazani su u tablici 2-2 (Adams i Charrier, 1985).

Tablica 2-2. Uobičajene konstrukcije zacjevljenja kanala bušotine

Tip konstrukcije I		Tip konstrukcije II	
ZAŠTITNE CIJEVI	Nominalni promjer zaštitnih cijevi	ZAŠTITNE CIJEVI	Nominalni promjer zaštitnih cijevi
UVODNI NIZ	339,7 mm (13 3/8 in.)	UVODNI NIZ	273,1 mm (10 3/4 in.)
TEHNIČKI NIZ	244,5 mm (9 5/8 in.)	TEHNIČKI NIZ	193,7 mm (7 5/8 in.)
LAJNER	177,8 mm (7 in.)	PROIZVODNI NIZ	127,0 mm (5 in.) ili 139,7 mm (5 1/2 in.)
PROIZVODNI NIZ	127,0 mm (5 in.)		

Program konstrukcije bušotina u Hrvatskoj većinom se izrađuje prema prvoj kombinaciji navedenoj u tablici, gdje u dosta slučajeva proizvodni niz može biti promjera 177,8 mm (7 in.) ili 139,7 mm (5 1/2 in.). Pri izradi programa zacjevljenja, konstrukcijski

kriteriji mogu zahtijevati korištenje zaštitnih cijevi s debljim stijenkama, odnosno težih nizova zaštitnih cijevi manjeg unutarnjeg promjera, čime se smanjuje prolaznost niza. Prolaznost niza određuje promjer budućeg alata koji će se spuštati kroz niz i dalje u bušotinu. Promjer alata ograničen je, dakle, unutarnjim promjerom zaštitnih cijevi. Spojnice zaštitnih cijevi moraju biti otporne s obzirom na napuhavanje, sažimanje i vlačna naprezanja, gdje dodatno moraju osigurati efektivno dosjedaње i brtvljenje. Kao što je ranije rečeno, promjer dlijeta koji se koristi pri bušenju daljnjih sekcija kanala bušotine nakon ugradnje određene sekcije zaštitnih cijevi uvjetovan je unutarnjim promjerom niza. Međunarodna bušaća praksa predložila je nekoliko kombinacija dlijeta i zaštitnih cijevi koje se mogu koristiti u većini bušaćih operacija. U domaćoj praksi, program konstrukcije bušotina većinom je dizajniran prema kombinaciji dlijeta i zaštitnih cijevi navedenoj u tablici 2-3 (INA d.d., 2022).

Tablica 2-3. Uobičajene kombinacije dlijeta i zaštitnih cijevi u kompaniji INA d.d.

PROMJER DLIJETA	ZAŠTITNE CIJEVI	PROMJERI ZAŠTITNIH CIJEVI
660,4 mm (26 in.)	KONDUKTOR NIZ	508,0 mm (20 in.)
444,5 mm (17 ½ in.)	UVODNI NIZ	339,7 mm (13 3/8 in.)
311,2 mm (12 ¼ in.)	TEHNIČKI NIZ	244,5 mm (9 5/8 in.)
215,9 mm (8 ½ in.)	PROIZVODNI NIZ	177,8 mm (7 in.) ili 139,7 mm (5 ½ in.)

2.6. Spojnice zaštitnih cijevi

Spojnice zaštitnih cijevi se u većini slučajeva odabiru prema istim kriterijima kao i zaštitne cijevi. Vrsta ležišnog fluida i djelotvornost brtvljenja osnovni su kriteriji za odabir spojnica (Krištafor, 2009). Za iste promjere zaštitnih cijevi razlikuju se promjeri spojnica ovisno o tome jesu li to API spojnice (okruglog ili trapeznog navoja), extreme line spojnice ili tzv. premium spojnice koje ostvaruju brtvljenje na različite načine. Spojnice zaštitnih cijevi koje kompanija INA d.d. najčešće koristi prilikom zacjevljenja bušotina su Butress, VAsuperior (spojnice proizvođača Voestalpine) i VAM (spojnice proizvođača Vallourec) (INA d.d., 2022).

3. SUVREMENE METODE PROJEKTIRANJA ZACJEVLJENJA

U nastavku rada bit će pojašnjen postupak projektiranja zacjevljenja bušotine na primjeru konstrukcije bušotina koje standardno koristi kompanija INA d.d., kao vodeća tvrtka u Hrvatskoj koja se bavi istraživanjem i proizvodnjom nafte i plina.

Cilj je projektanta da projektira bušotinu i razvije plan bušenja na način da bušotina kao naftno - rudarski objekt može ispuniti sve zadaće i izdrži moguće probleme koje se očekuju, što uključuje (Mitchell, 2006):

- osigurati mehanički integritet bušotine (engl. *well integrity*) pružanjem projektne osnove koja uzima u obzir sva predviđena opterećenja na koja se može naići tijekom radnog vijeka bušotine,
- odabrati nizove zaštitnih i uzlaznih cijevi na način da se minimaliziraju troškovi tijekom radnog vijeka bušotine te
- operativnom osoblju na lokaciji bušotine osigurati jasnu projektnu dokumentaciju čime se sprječavaju mogući nesporazumi.

Prije početka projektiranja zacjevljenja, potrebno je sakupiti podatke od ostalih službi koji su također uključeni u proces projektiranja kao što su geolozi, geodeti i ležišni inženjeri. Potrebno je naglasiti kako točnost izrade projekta zacjevljenja uvelike ovisi o točnosti dobivenih podataka (Rabia, 2002).

Informacije potrebne za izradu programa zacjevljenja (Mitchell, 2006):

- svojstva ležišta: porni tlak, tlak raspucavanja naslaga, čvrstoća naslaga, temperaturni profil, vrste naslaga, propusne zone, zone kemijski reaktivnih škriljavaca, zone gubljenja isplake, prisutnost plitkih (barskih) plinova, dubine vodonosnika, prisutnost agresivnih plinova (sumporovodik i/ili ugljikov dioksid);
- lokacija bušotine (koordinate), geološki ciljevi (engl. *targets*);
- zahtjevi za minimalnim promjerima: minimalni promjer bušotine unutar proizvodne zone; vanjski promjer alata za mjerenja u bušotini; promjeri tubinga, brtveće alatke (engl. *packer*) i pripadajuće opreme za opremanje bušotine i pridobivanje slojnog fluida;
- karakteristike buduće proizvodnje: gustoća paker-fluida, sastav pridobivenog ležišnog fluida te opterećenja prilikom opremanja, proizvodnje i radova na održavanju bušotine;

- ostalo: dostupnost potrebne opreme i alata, zakonske regulative i ograničenja postrojenja.

Uzimajući u obzir navedene faktore odabiru se zaštitne cijevi s prikladnim kvalitetama čelika i jediničnim težinama (N/m) potrebne za izvođenje svih operacija u bušotini. Odabir nizova zaštitnih cijevi mora biti dovoljno siguran, kao i ekonomski opravdan (isplativ).

Postupak odabira zaštitnih cijevi se kroz povijest kontinuirano razvijao. Razvojem standardizacije kvaliteta čelika, dimenzija cijevi te poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava, omogućeno je izrađivanje dubljih bušotina i dosezanje dubljih ležišta. Oslanjanjem na dosadašnju bušaču praksu, pojedine naftne kompanije osmislile su svoje postupke zacjevljenja bušotina, od kojih se neki i danas naširoko koriste. Odabir zaštitnih cijevi mora biti takav da odabrane i ugrađene zaštitne cijevi izdrže sva naprezanja tijekom radnog vijeka bušotine; i tijekom bušenja i tijekom pridobivanja fluida iz ležišta. Potrebno je stoga pretpostaviti i analizirati sva moguća opterećenja kojima će zaštitne cijevi biti izložene. Opterećenja u zaštitnim nizovima se javljaju tijekom niza operacija: ugradnja nizova u bušotinu, njihovo cementiranje, daljnje bušaće operacije u kanalu te proizvodnja i radovi na održavanju. Sva ta opterećenja mogu se podijeliti na (Mitchell, 2006):

- opterećenja uslijed djelovanja tlakova fluida koji se nalaze unutar i izvan zaštitnih cijevi, utjecaj slojnog tlaka tijekom bušenja i proizvodnje, tlakova na ušću bušotine uslijed bušenja i radova na održavanju (remontnih radova);
- mehanička opterećenja povezana s kretanjem niza zaštitnih cijevi, opterećenja tijekom ugradnje zaštitnih cijevi (uslijed djelovanja težine niza i udarnih opterećenja), opterećenja na pakeru tijekom proizvodnje i održavanja bušotine te opterećenja na vješalicama zaštitnih cijevi (engl. *casing hanger*);
- temperaturna opterećenja uslijed temperaturnih razlika koje uzrokuju temperaturnu ekspanziju. Javljaju se tijekom bušenja, održavanja bušotina i pridobivanja slojnih fluida. U necementiranim intervalima, ovakva opterećenja mogu dovesti do savijanja ili izvijanja niza.

Nakon određivanja broja nizova zaštitnih cijevi i dubina njihovih ugradnji, potrebno je, na temelju proračuna očekivanih naprezanja, odrediti kvalitete čelika i debljine stijenki pojedinog niza zaštitnih cijevi.

Naprezanja koja se javljaju u bušotini i utječu na zaštitne cijevi prisutna su tijekom (Borzatti et al., 1989):

- ugradnje niza zaštitnih cijevi,
- cementacije niza zaštitnih cijevi,
- nastavka bušenja,
- ispitivanja - proizvodnje te
- specijalnih zahvata u bušotini.

Gotovo svi relevantni postupci dizajniranja uvijek razmatraju utjecaje unutrašnjeg tlaka (rasprskavanje), vanjskog tlaka (gnječenje) i uzdužnih sila. Također, moderne metode zacjevljenja obavezno u obzir uzimaju i utjecaj kombiniranih naprezanja: promjenu nominalne čvrstoće zaštitnih cijevi na rasprskavanje i gnječenje onda kada su pod djelovanjem uzdužnih sila. Koncept tzv. "najvećeg očekivanog opterećenja" (engl. „*Maximum Load*“ *Casing Design*) predstavlja naširoko korišten koncept prilikom dizajniranja zacjevljenja (Prentice, 1970). Navedena metoda, kao i njene modifikacije, analiziraju sve moguće probleme prisutne prilikom izrade bušotine kako bi zaštitne cijevi izdržale sva potencijalna naprezanja kojima mogu biti izložena tijekom radnog vijeka bušotine. Iako je izvorno bila namijenjena za projektiranje zacjevljenja bušotina koje se izrađuju u području povećanih slojnih tlakova, metoda je dovoljno fleksibilna da udovolji svim uvjetima tijekom bušenja.

Za odabir zaštitnih cijevi potrebno je izračunati (Borzatti et al., 1989):

- rezultantu unutarnjeg tlaka,
- rezultantu vanjskog tlaka,
- rezultantu uzdužnih sila te
- kombinirana opterećenja.

Kako bi bušotina bilo uspješno i sigurno izrađena, a zaštitne cijevi izdržale sva opterećenja, potrebno je prilikom proračuna uzeti u obzir faktor sigurnosti. Tijekom projektiranja zacjevljenja, faktor sigurnosti predstavlja „konstrukcijski koeficijent naprezanja“ (engl. *Design Factor, DF*). Sigurnosni koeficijenti trebali bi biti odabrani na temelju iskustava pri bušenju okolnih bušotina te ne bi trebali biti preveliki, odnosno dizajn ne bi trebao biti predimenzioniran (Moore i Cole, 1965). Nakon što se izračunaju sile i naprezanja, potrebno ih je pomnožiti s konstrukcijskim koeficijentom te se ta krajnja vrijednost naprezanja i sile uzima u obzir prilikom odabira materijala zaštitnih cijevi.

Sigurnosni koeficijent, prikazan jednadžbom 2-2, predstavlja omjer čvrstoće zaštitnih cijevi i proračunatog naprezanja. Navedeni omjer stoga mora biti uvijek veći od minimalnih sigurnosnih koeficijenata koje preporučuju i koriste pojedine naftne kompanije.

$$DF = SF_{min} \leq SF = \frac{\text{ČVRSTOĆA NIZA ZAŠTITNIH CIJEVI}}{\text{NAPREZANJE}} \quad (2-2)$$

Gdje su:

- DF = konstrukcijski koeficijent naprezanja (engl. *Design Factor*)
- SF_{min} = minimalni sigurnosni koeficijent (engl. *Minimum Safety Factor*)
- SF = sigurnosni koeficijent (engl. *Safety Factor*)

U kompaniji INA d.d. se prilikom izrade analiza i odabira zaštitnih cijevi koriste sljedeći minimalni sigurnosni koeficijenti (INA d.d., 2022):

- unutarnji tlak DF = 1,100;
- vanjski tlak DF = 1,125;
- uzdužno naprezanje DF = 1,300;
- kombinirano naprezanje DF = 1,250.

Proračun i odabir zaštitnih cijevi se vrši na sljedeći način (Borzatti et al., 1989):

- 1) na temelju podataka o bušotini izračunava se rezultanta unutarnjeg i rezultanta vanjskog tlaka duž zaštitnih cijevi. Množenjem izračunatih rezultanti tlakova pripadajućim konstrukcijskim koeficijentima dobiju se tzv. linije zacjevljenja bušotine za unutarnji odnosno vanjski tlak;
- 2) odabir zaštitnih cijevi (debljina stijenke i kvaliteta čelika) vrši se upotrebom odgovarajućih tablica ili priručnika koji prema važećim standardima prikazuju tehničke karakteristike zaštitnih cijevi. Zaštitne cijevi su pravilno odabrane ako su njihove nazivne vrijednosti (dane u tablicama) za unutarnji odnosno vanjski tlak veće odnosno jednake tlaku koji omeđuju linije zacjevljenja duž kanala bušotine;
- 3) odabirom debljine stijenke i kvalitete čelika zaštitnih cijevi, pomoću bušotinskih podataka i duljine niza proračunavaju se uzdužna (vlačna) naprezanja u cijevima. Množenjem proračunatih vlačnih naprezanja s konstrukcijskim koeficijentom za vlačno naprezanje dobiva se tzv. linija vlačnog naprezanja. Odabrane zaštitne cijevi trebaju zadovoljiti uvjet da je dopušteno opterećenje cijevi na vlak (dano u tablicama) veće ili jednako od opterećenja koje omeđuje linija vlačnog opterećenja;

- 4) valjanost odabira zaštitnih cijevi kontrolira se tzv. kombiniranim naprezanjem. U slučaju da odabrane zaštitne cijevi zadovolje i kombinirana naprezanja, postupak odabira je valjan. Ako to nije slučaj, tada se postupak ponavlja od točke 2, tj. odabiru se prve jače zaštitne cijevi.

Kao što je već rečeno, zacjevljenje bušotine predstavlja jedan od najskupljih dijelova čitavog projekta bušotine, uključujući bušenje i opremanje. Koristeći prethodne postavke, potrebno je osigurati takvo zacjevljenje koje će izdržati sva maksimalna naprezanja koja se iz raznih razloga mogu pojaviti, a da bude sastavljeno od cijevi što nižih kvaliteta čelika i manjih jediničnih težina. Kako bi zacjevljenje bilo optimalno projektirano, opravdano je postaviti i određena ograničenja koja se mogu pojaviti u praksi, te na temelju njih obaviti odabir zaštitnih cijevi, čime se mogu uštedjeti znatna sredstva, a da sigurnost radova nije bitno umanjena. Koncept najvećeg očekivanog opterećenja je grafičko-analitički postupak određivanja kombiniranog sastava zaštitnih cijevi koji za specifične uvjete, a ovisno o opredjeljenju, predstavlja najekonomičniji ili najsigurniji odabir (Krištafor, 2009). Postupak predviđa da se zaštitne cijevi odabiru prema sljedećim uvjetima (Adams i Charrier, 1985):

- rasprskavanje,
- gnječenje,
- uzdužna opterećenja i
- kombinirana opterećenja.

Pri projektiranju zacjevljenja, prvo se analizira i određuje djelovanje i ponašanje unutarnjeg tlaka, odnosno analizira se otpornost zaštitnih cijevi na rasprskavanje. Određivanjem uvjeta naprezanja na rasprskavanje na svim dubinama, odabiru se najjeftinije zaštitne cijevi, odnosno one s najmanjom jediničnom težinom i najslabijom kvalitetom čelika.

Sljedeći korak je definiranje otpornosti zaštitnih cijevi na gnječenje, odnosno na djelovanje vanjskog tlaka, pri čemu se vrši privremeni odabir niza cijevi. U slučaju da bilo koji dio niza zaštitnih cijevi ne zadovoljava naprezanja uslijed gnječenja, odabire se prvi sljedeći skuplji, odnosno jači niz zaštitnih cijevi koji ili ima bolju kvalitetu čelika ili veću jediničnu težinu čime može izdržati uvjete gnječenja. U tom trenutku, odabrane zaštitne cijevi predstavljaju najjeftiniji niz koji zadovoljava oba uvjeta; rasprskavanje i gnječenje.

Nadalje, određuje se djelovanje uzdužnih sila, odnosno uzdužna opterećenja na niz cijevi. Ako odabrane zaštitne cijevi ne odgovaraju pojedinim uvjetima uzdužnih naprezanja, za tu

sekciju se ponovo odabiru cijevi bolje kvalitete čelika ili veće jedinične težine. Tako će, cijelom dubinom bušotine, zaštitne cijevi (jednolični ili kombinirani niz) zadovoljavati sve uvjete naprezanja.

Kako se otpornost na rasprskavanje i gnječenje zaštitnih cijevi mijenja uslijed uzdužnih naprezanja (djelovanja vlačnih ili tlačnih sila), potrebno je prije krajnje potvrde odabranog niza analizirati otpornost cijevi uslijed takvih kombiniranih naprezanja. Kao što je i prije rečeno, ako pojedini niz zaštitnih cijevi ne odgovara uvjetima kombiniranih naprezanja, potrebno je uzeti kvalitetnije zaštitne cijevi.

Navedenim postupkom ispunit će se osnovni cilj zacjevljenja: izabrati optimalni niz zaštitnih cijevi koje će podnijeti maksimalna opterećenja uz minimalnu cijenu koštanja.

Prethodno opisana metoda bazira se na grafičko-analitičkom postupku. Postupak služi za odabiranje zaštitnih cijevi odgovarajućih jediničnih težina, kvaliteta čelika i duljina nizova, gdje se grafički (odgovarajućim linijama) prikazuju naprezanja kojima su izložene zaštitne cijevi usporedno s njihovom željenom dubinom ugradnje te linije pojedinih kvaliteta zaštitnih cijevi s odgovarajućom otpornosti na pojedini uvjet naprezanja. Pri korištenju ove metode, koristi se niz proračuna s prikladnim formulama gdje se nakon proračuna izračunate vrijednosti unose u dijagram dubine i naprezanja (tlakova). Stoga će, u idućim podpoglavljima biti ukratko opisano odabiranje zaštitnih cijevi s obzirom na uvjete rasprskavanja, gnječenja, uzdužna naprezanja i kombinirana naprezanja za pojedine nizove zaštitnih cijevi. Navedeni grafičko-analitički postupak se koristi u akademske svrhe za bolje shvaćanje materije projektiranja zacjevljenja, a u priručnicima „Drilling Engineering – A Complete Well Planning Approach“ (Adams i Charrier, 1985), „Doprinos metodici zacjevljenja“ (Borzatti et al., 1989) te „Projektiranje zacjevljenja“ (Krištafor, 2009) detaljno je objašnjena metodika zacjevljenja.

U modernom naftnom inženjerstvu, posljednjih desetljeća uvelike se koriste softveri pojedinih kompanija prilikom projektiranja bušotina i zacjevljenja. Pritom se koriste standardi, priručnici ili katalozi različitih proizvođača u kojima su sistematizirana geometrijska i mehanička svojstva standardnih i nestandardnih zaštitnih cijevi. Iako računalni programi uvelike olakšavaju sam proces projektiranja, važno je da projektanti budu upoznati s metodikom zacjevljenja i s opisanim grafičko-analitičkim postupkom projektiranja. Premda je najmanja cijena koštanja najlogičniji i najuobičajeniji razlog za odabir određene zaštitne cijevi, ponekad i drugi čimbenici, uključivši dostupnost zaštitnih

cijevi na tržištu, prinudni odabir iz postojećih zaliha kompanija te modifikacija uobičajenih projektantskih praksi, mogu utjecati na konačnu odluku (Krištafor, 2009).

3.1. Unutarnji tlak

Izračun naprezanja na rasprskavanje, odnosno djelovanje unutarnjeg tlaka na stijenke zaštitnih cijevi potrebno je odrediti kako se ne bi premašila dozvoljena granica naprezanja na rasprskavanje. Potrebno je odrediti najveća naprezanja na vrhu i dnu niza. Naprezanja uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka javljaju se tijekom operacija kontrole tlaka u bušotini, provođenja testova mehaničkog integriteta te tijekom cementacije skviziranjem (engl. *squeeze cementing*). Otpornost zaštitnih cijevi na unutarnji tlak definirana je formulom (Pašić, 2018):

$$p_r = 0,875 \frac{2 \times \sigma_d \times t}{D_n} \quad (3-1)$$

Gdje su:

P_r = tlak rasprskavanja, (MPa),

σ_d = minimalna čvrstoća cijevi do granice tečenja, (MPa)

t = nominalna debljina stijenke cijevi, (m)

D_n = nominalni vanjski promjer cijevi, (m).

Faktor s vrijednošću 0,875 koji se nalazi u jednadžbi predstavlja dozvoljenu toleranciju smanjenja debljine stijenke cijevi tijekom njihove izrade (i korištenja) koja se može umanjiti maksimalno za 12,5% (Lyons, 2010). Potrebno je naglasiti također da otpornost zaštitnih cijevi na djelovanje unutarnjeg tlaka ovisi i o omjeru debljine stijenke cijevi i vanjskog promjera.

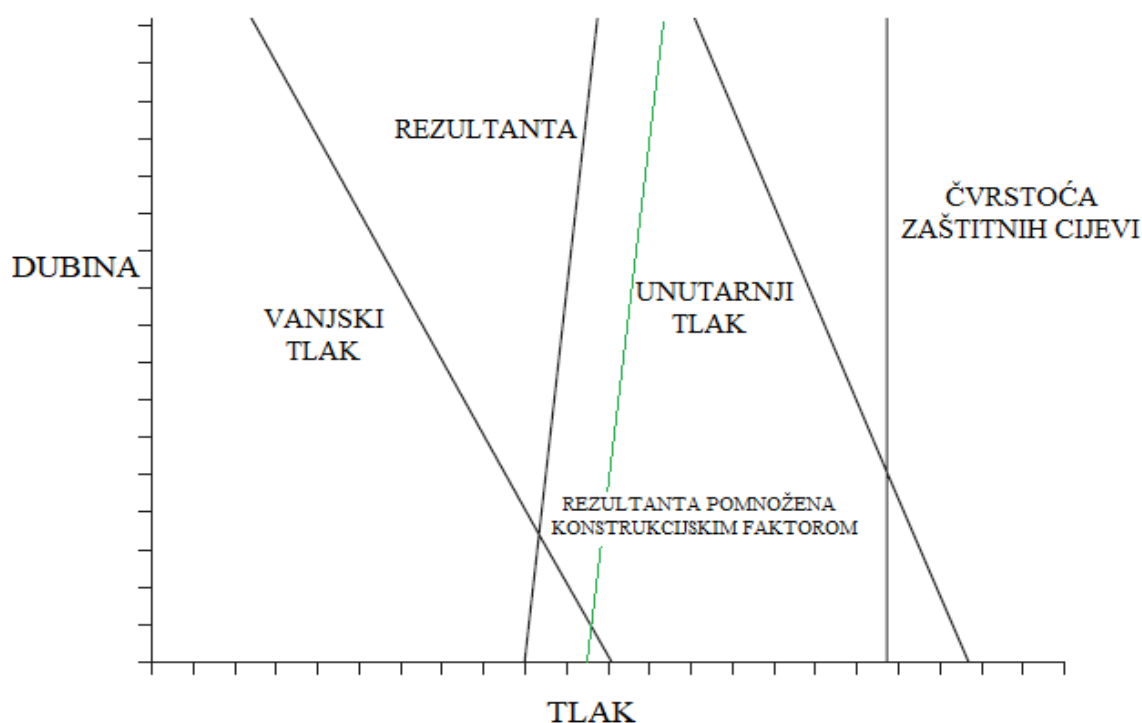
Naprezanja uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka uobičajeno su posljedica djelovanja tlaka stupca isplake i ponekad djelovanja tlaka s površine. Oni fluidi koji se nalaze s vanjske strane zaštitnih cijevi, odnosno u prstenastom prostoru između cijevi i stijenke kanala bušotine, osiguravaju hidrostatski tlak koji djeluje suprotno u odnosu na unutarnji tlak te tako povećava otpornost zaštitnih cijevi na rasprskavanje. U proračunu se za vrijednost protutlaka koriste hidrostatski tlakovi slojne vode, cementne kaše ili normalna vrijednost pornog tlaka. Stoga, maksimalna dozvoljena vrijednost efektivnog tlaka prije rasprskavanja jednaka je razlici između unutarnjeg i vanjskog tlaka što prikazuje i sljedeća jednadžba:

$$[P_{\text{rasprskavanja}} = P_{\text{unutarnji}} - P_{\text{vanjski}}] < P_{\text{otpornost na unutarnji tlak}} \quad (3-2)$$

Za izračunavanje rezultante unutarnjeg tlaka koriste se sljedeći podaci (Borzatti et al., 1989):

- dubina ugradnje zaštitnih cijevi,
- gradijent pornog tlaka,
- dubine zalijeganja produktivnih naslaga stijena,
- gradijent tlaka loma naslaga stijena,
- gustoća bušotinskih fluida i
- fizikalne karakteristike slojnih fluida pri određenim bušotinskim uvjetima.

Scenariji koji bi mogli dovesti do rasprskavanja zaštitnih cijevi su mnogi, odnosno svaki puta kada razlika između unutarnjeg i vanjskog tlaka prelazi otpornost cijevi na rasprskavanje. Stoga se tijekom dizajniranja zacjevljenja u obzir uzimaju mogući scenariji: dotok prilikom bušenja ili proizvodnje, propuštanje uzlaznog niza te određivanje najveće vrijednosti dotoka koje bušotina može izdržati. Uslijed dotoka tijekom bušenja, najveća vrijednost naprezanja uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka bit će na vrhu niza, dok je uslijed propuštanja uzlaznog niza, najveća vrijednost navedenog naprezanja na dnu niza. Ako se pojavi oštećenje u nizu zaštitnih cijevi, bolje je da se pojavi oko pete niza nego blizu površine. Lakše je kontrolirati podzemnu erupciju fluida nego popraviti oštećene zaštitne cijevi ili površinsku opremu. Stoga, prilikom odabira zaštitnih cijevi, potrebno je odabrati niz toliko otporan na rasprskavanje kolika je čvrstoća naslaga ispod pete niza uvećana za faktor sigurnosti, odnosno maksimalna vrijednost rezultante unutarnjeg tlaka mora biti veća ili jednaka tlaku loma naslaga (Krištafor, 2009). Tim uvjetom osiguravamo zaštitne cijevi jer će prije nastupa maksimalnog unutarnjeg tlaka doći do loma naslaga stijena. Spajanjem točaka na dnu i vrhu niza dobiva se linija tlaka (rezultanta unutarnjeg tlaka) koja će prouzročiti rasprskavanje zaštitnih cijevi. Za odabir zacjevljenja s obzirom na unutarnji tlak mjerodavna je linija zacjevljenja za unutarnji tlak, koja se dobije kada rezultantu unutarnjeg tlaka pomnožimo konstrukcijskim koeficijentom za unutarnji tlak. Navedeni dizajn zacjevljenja s obzirom na unutarnji tlak za uvodni niz zaštitnih cijevi prikazan je na Slici 3-1.



Slika 3-1. Dizajn zacjevljenja s obzirom na unutarnji tlak (uvodni niz) (Aadnøy, 2010)

3.2. Vanjski tlak

Opterećenja uslijed djelovanja vanjskog tlaka rezultat su djelovanja tlaka stupca fluida s vanjske strane zaštitnih cijevi, odnosno fluida u prstenastom prostoru između stijenki kanala bušotine i zaštitnih cijevi ili dva niza zaštitnih cijevi. Ako se premaši otpornost zaštitnih cijevi na djelovanje vanjskog tlaka, doći će do njihovog gnječenja. Fluidi koji se nalazi u prstenastom prostoru su najčešće isplaka, paker-fluid i cementna kaša u koju su uronjene cijevi. Zaštitne cijevi su izložene snažnom djelovanju vanjskog tlaka tijekom cementacije, migraciji plina u prstenastom prostoru iza proizvodnog niza te unutar problematičnih formacija kao što su plastične gline ili naslage soli (Rahman i Chilingarian, 1995). Zaštitne cijevi moraju imati dovoljnu otpornost na djelovanje vanjskog tlaka jer će u protivnom, kada je razlika između vanjskog i unutarnjeg tlaka veća od čvrstoće cijevi, doći do gnječenja. Maksimalna dozvoljena vrijednost efektivnog tlaka prije gnječenja jednaka je razlici između vanjskog i unutarnjeg tlaka što i prikazuje sljedeća jednadžba:

$$[P_{gnječenja} = P_{vanjski} - P_{unutarnji}] < P_{otpornost na vanjski tlak} \quad (3-3)$$

Otpornost cijevi na djelovanje vanjskog tlaka ovisi o omjeru vanjskog promjera i debljine stijenke cijevi (D_n/t) te za cijevi s navedenim visokim omjerom vrijedi sljedeća jednadžba za određivanje tlaka gnječenja unutar elastičnog područja (Pašić, 2018)

$$p_{cr} = \frac{3,22488 \times 10^{11}}{\left(\frac{D_n}{t}\right) \times \left(\frac{D_n}{t} - 1\right)^2} \quad (3-4)$$

Gdje su:

p_{cr} = kritični dozvoljeni tlak gnječenja, (MPa) i

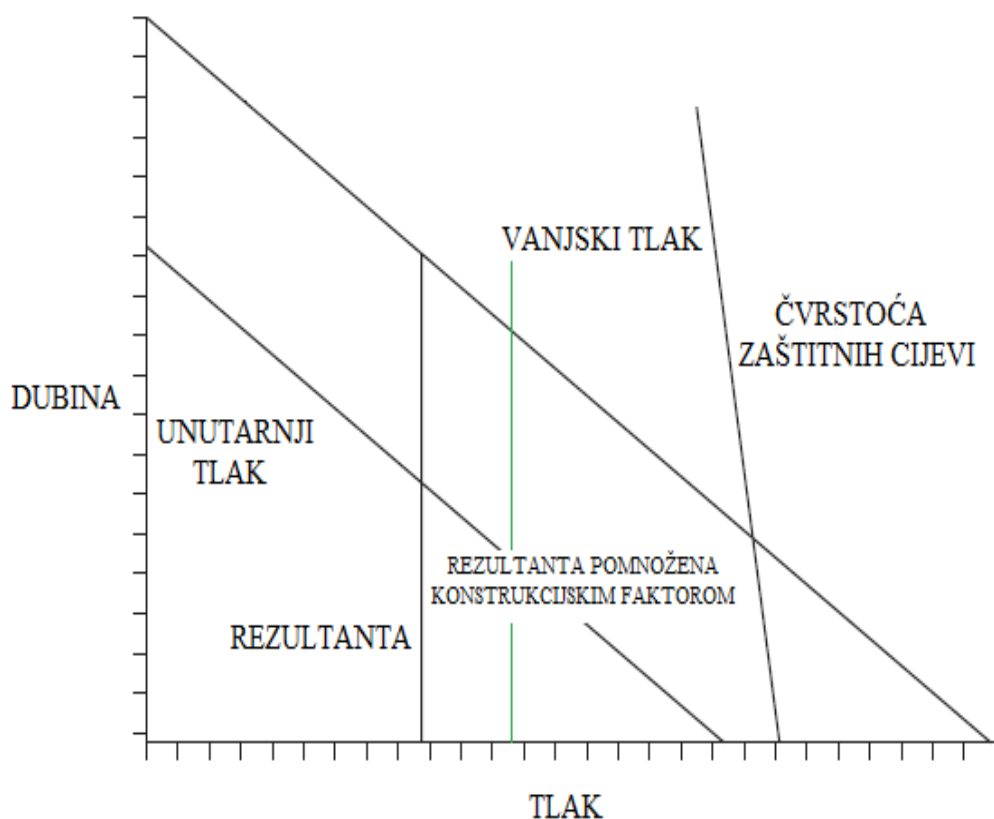
$\frac{D_n}{t}$ = omjer nominalnog vanjskog promjera i debljine stijenke za područje elastičnog tečenja, (-).

Prikazana jednadžba odnosi se na određivanje kritičnog tlaka gnječenja u području elastičnih deformacija. Postoje i drugi oblici određivanja kritičnog tlaka gnječenja koji se javljaju u cijevima onda kada su u području iznad granice popuštanja, području plastičnih deformacija te u prijelaznom području, gdje se na temelju dodatnih formula određuju njihove vrijednosti. Na temelju bušotinskih podataka i usvojenih postavki, određuju se vrijednosti vanjskog tlaka duž nizova zaštitnih cijevi. Odabrane zaštitne cijevi trebaju izdržati sva naprezanja uzrokovana vanjskim tlakom.

Pri dimenzioniranju zaštitnih cijevi na vanjski tlak, koriste se sljedeće postavke (Borzatti et al., 1989):

- niz zaštitnih cijevi je potpuno ispražnjen,
- niz zaštitnih cijevi je djelomično ispražnjen i
- niz zaštitnih cijevi je ispunjen isplakom, paker ili slojnim fluidom.

Spajanjem točaka na dnu i vrhu niza dobiva se linija koja će prouzročiti gnječenje zaštitnih cijevi, a unutarnji tlak (protutlak), koji povećava otpornost na gnječenje, stvara fluid unutar niza. Za odabir zacjevljenja s obzirom na vanjski tlak mjerodavna je linija zacjevljenja za vanjski tlak, koja se dobije kada rezultantu vanjskog tlaka pomnožimo konstrukcijskim koeficijentom za vanjski tlak. Uspoređujući navedenu liniju s pokusnom linijom određenom za unutarnji tlak, ako je potrebno, bira se niz zaštitnih cijevi veće kvalitete od poddimenzioniranog niza. Navedeni dizajn zacjevljenja s obzirom na vanjski tlak za tehnički niz zaštitnih cijevi prikazan je na Slici 3-2.



Slika 3-2. Dizajn zacjevljenja s obzirom na vanjski tlak (tehnički niz) (Aadnøy, 2010)

3.3. Uzdužna opterećenja

Izbor zaštitnih cijevi obzirom na uzdužna opterećenja zahtijeva razmatranje uzdužnih (vlačnih ili tlačnih) naprezanja u cjevima kad se one spuštaju ili izvlače, tijekom cementiranja, prilikom odsjedanja u klinove u bušotinskoj glavi i tijekom svih zahvata vezanih uz daljnje bušenje ili proizvodnju (Krištafor, 2009). Rezultanta uzdužnih sila duž niza zaštitnih cijevi predstavlja zbroj vlačnih i tlačnih sila. Vlačne sile proporcionalne su masi cijevi, a tlačne sile gustoći fluida u bušotini. Uzdužno opterećenje javlja se uslijed djelovanja težine samih zaštitnih cijevi te kada se premaši granično naprezanje, dolazi do uzdužnog oštećenja, odnosno loma zaštitnih cijevi.

Na zaštitne cijevi djeluju sile uzgona zbog djelovanja hidrostatskog tlaka na svaku vodoravnu površinu unutar i izvan niza, čime se smanjuju uzdužna opterećenja. Sile uzgona s vanjske strane djeluju na petu niza kao i na spojnice, gdje se zbog minimalne razlike u dubinama te sile (suprotnog smjera djelovanja) poništavaju, a u slučaju kombiniranog niza (različite kvalitete čelika ili debljine stijenke cijevi) s unutarnje strane djeluju na svaku promjenu poprečnog presjeka cijevi. Uzdužna opterećenja najveća su na vrhu niza te se postepeno smanjuju prema dnu. Nadalje, razmatranje uzdužnih naprezanja posebno je bitno

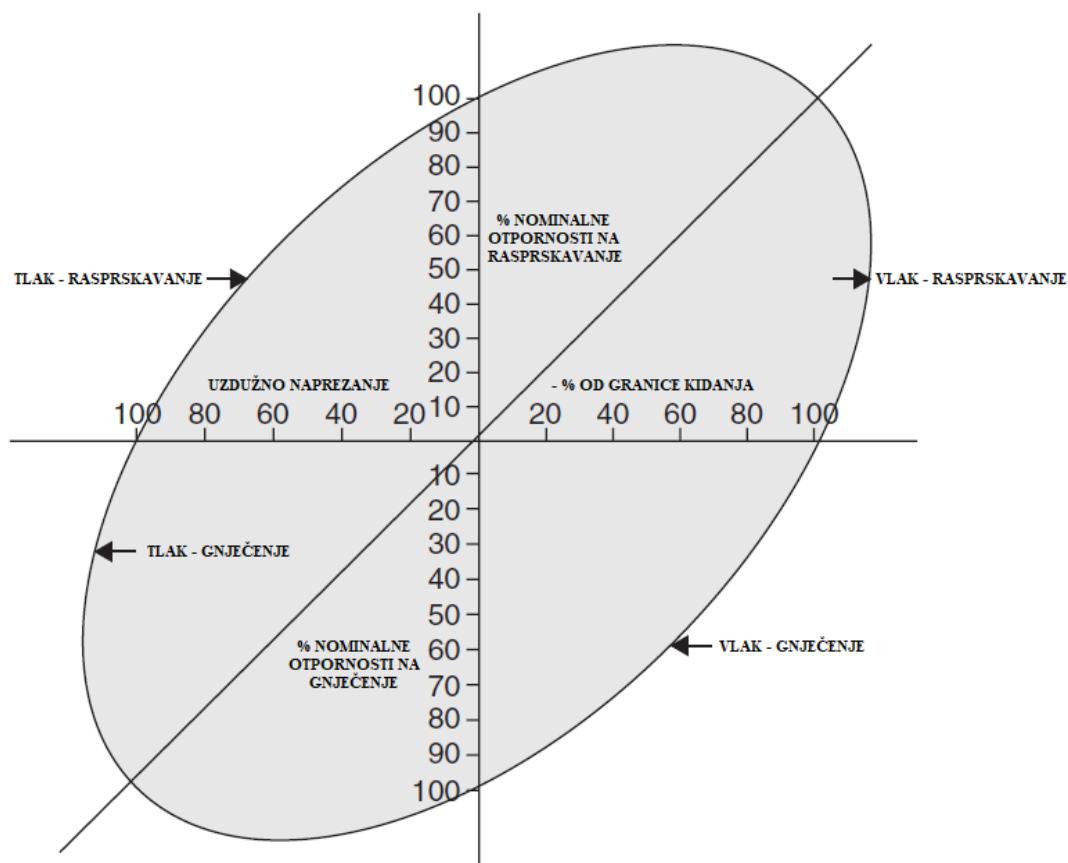
tijekom ugradnje zaštitnih cijevi jer su one tada izložene naglim udarima tijekom prolaska kroz sužene dijelove kanala bušotine. Situacije koje uzrokuju dodatno uzdužno naprezanje su: diferencijalni prihvati cijevi, tlačno ispitivanje, savijanje cijevi i sile trenja o stijenke kanala. Odabir zaštitnih cijevi u odnosu na uzdužna opterećenja ovisit će o većoj od dvije kontrolne varijable. Za slučaj prihvata zaštitnih cijevi blizu dna bit će potrebno predvidjeti dopušteni dodatni nateg koji iznosi približno 500 kN (Adams i Charrier, 1985) dok je druga kontrolna varijabla faktor sigurnosti za uzdužna opterećenja koji iznosi 1,6 (Adams i Charrier, 1985) (u INA d.d., faktor sigurnosti za uzdužna naprezanja iznosi 1,3). Linija zacjevljenja za uzdužna opterećenja bit će ona s većim vrijednostima uzimajući u obzir navedene kontrolne varijable. Za pokusno odabrane zaštitne cijevi provjerava se nazivna čvrstoća za uzdužna naprezanja te ona mora biti veća od vrijednosti koje omeđuje linija zacjevljenja za vlačna opterećenja.

3.4. Kombinirana opterećenja

Navedena naprezanja zaštitnih cijevi predstavljaju aksijalna naprezanja, odnosno naprezanja u smjeru jedne osi, gdje su naprezanja na druge dvije osi jednaka nuli. Ovakva idealizirana situacija nikada nije postignuta pošto su zaštitne cijevi konstantno izložene kombiniranim opterećenjima, odnosno dolazi do promjene otpornosti zaštitnih cijevi na djelovanje vanjskog i unutarnjeg tlaka uslijed djelovanja uzdužnih sila i to na sljedeći način (Borzatti et al., 1989):

- u dijelu niza zaštitnih cijevi koji je tlačno opterećen otpornost na unutarnji tlak se smanjuje, a otpornost na vanjski tlak se povećava i
- u dijelu niza zaštitnih cijevi koji je vlačno opterećen otpornost na unutarnji tlak se povećava, a otpornost na vanjski tlak se smanjuje.

Zbog toga, prilikom odabira zaštitnih cijevi prema izračunatim linijama zacjevljenja, nazivne vrijednosti otpornosti zaštitnih cijevi na unutarnji i vanjski tlak (dane u tablicama) treba korigirati za kombinirana opterećenja. Ta se korekcija vrši grafički prema elipsi za određivanje biaksijalnih naprezanja popuštanja, poznatu pod nazivom „dijagram najveće energije smične deformacije“ prikazana na Slici 3-3. Dijagram elipse se upotrebljava na taj način da se najprije izračuna postotni udio nominalne otpornosti zaštitnih cijevi kao odnos stvarnog uzdužnog naprezanja i naprezanja do granice kidanja. Na ordinatu nanosena vrijednost postotnog udjela, za specificiranu kvalitetu čelika i debljinu stijenke zaštitnih cijevi te izračunata uzdužna naprezanja, služe kao osnova za očitavanje korekcijskih faktora



Slika 3-3. Elipsa traksijsalnih naprezanja popuštanja (Aadnøy, 2010)

zbog kombiniranih opterećenja. Lijevi dio elipse upotrebljava se za određivanje korekcijskog faktora za unutrašnji tlak za zaštitne cijevi pod djelovanjem tlačnih sila, odnosno za određivanje korekcijskog faktora za vanjski tlak u području djelovanja tlačnih sila. Desni dio elipse upotrebljava se za određivanje korekcijskog faktora za unutrašnji tlak kad su cijevi pod djelovanjem vlačnih sila, odnosno za vanjski tlak u području djelovanja vlačnih sila. Korigirane vrijednosti otpornosti zaštitnih cijevi uslijed djelovanja kombiniranih opterećenja dobiju se tako da se nominalne vrijednosti otpornosti na unutrašnji i vanjski tlak pomnože odgovarajućim korekcijskim faktorima. Smanjenje otpornosti cijevi ponekad će zahtijevati povećanje gradacije nekih dijelova niza zaštitnih cijevi. S druge strane, povećanje otpornosti cijevi katkad će omogućiti izbor zaštitnih cijevi slabije kvalitete čelika ili manje jedinične težine (Krištafor, 2009). Nakon provjere kombiniranih opterećenja pokusni odabir zaštitnih cijevi, uz eventualne promjene gradacija, postat će konačni izbor zaštitnih cijevi koje se mogu ugraditi u bušotinu, kako s ekonomskog, tako i sa sigurnosnog stajališta. Za potrebe izrade ovog diplomskog rada, koristeći identičan pristup, za projektiranje zacjevljenja analiza naprezanja napravljena je u programu Landmark (modul StressCheckTM).

4. UZROCI Odstupanja konstrukcije bušotine od početnih projektiranih vrijednosti

Kao što je rečeno u uvodu rada, poslovni svijet teži preispitivanju provjerenih poslovnih praksi kako bi podigli efikasnost i samim time unaprijedili buduće projekte i poslove. Naftna industrija Hrvatske, kojom prednjači hrvatska naftna kompanija INA d.d., u posljednjih nekoliko godina je uvela inovacije tijekom projektiranja bušotina. Projektanti bušenja pokušavaju projektirati zacjevljenje bušotine na što djelotvorniji način, kako se ekonomskog, tako i sa stajališta sigurne izrade bušotine.

Uobičajen slijed zaštitnih cijevi tijekom izrade kanala bušotine u INA d.d. glasi (gledano od ušća prema dnu bušotine):

- konduktor niz zaštitnih cijevi promjera 508,0 mm (20 in.),
- uvodni niz zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm (13 3/8 in.),
- tehnički niz zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm (9 5/8 in.) te
- proizvodni niz zaštitnih cijevi s promjerom od 177,8 mm (7 in.) ili 139,7 mm (5 1/2 in.).

Ovakva konstrukcija bušotine u hrvatskoj naftnoj praksi se koristi čitav niz godina. Navedeni nizovi zaštitnih cijevi, ugrađeni i cementirani, prikazani su na Slici 4-1.



Slika 4-1. Prikaz ugrađenih i cementiranih nizova zaštitnih cijevi – 339,7 mm – 244,5 mm – 139,7 mm (CROSCO d.d., 2008)

Optimizacija zacjevljenja, odnosno promjena početnih projektiranih vrijednosti, predstavlja promjenu uobičajenih promjera, debljina stijenki, duljina i brojeva nizova zaštićih cijevi u odnosu na planirane projektantske prakse. U slučaju bušotine X na polju Y čiji će se projekt zacjevljenja obrađivati u ovom radu, optimizacijom je odlučeno kako će se smanjiti broj ugrađenih nizova, točnije neće biti ugrađen tehnički niz cijevi. U nastavku teksta bit će opisani uzroci odstupanja konačne izvedbe konstrukcije bušotine od projektiranih vrijednosti.

4.1. Klasifikacija bušotine

U naftnom inženjerstvu, prilikom projektiranja bušotine kao i njenog odobravanja od nadležnih tijela, potrebno je klasificirati navedenu bušotinu. Bušotine se, govoreći u smislu njihove izrade, prema Zakonu o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19 i 30/21) dijele na istražne, ocjenske i razradne. Istražna bušotina znači bušotinu kojoj je svrha utvrditi postojanje, položaj i oblik ležišta ugljikovodika ili geotermalnih voda i njihovu količinu i kakvoću odnosno utvrditi postojanje geoloških struktura prikladnih za podzemno skladištenje plina ili trajno zbrinjavanje ugljikova dioksida. Mogu se bušiti na potpuno novom području istraživanja ili na području na kojem već postoje otkrivena polja/ležišta. Izrada istražnih bušotina je visokorizična zbog necjelovite istraženosti područja i manjka neophodnih podataka i informacija te je u tom slučaju konstruiranju bušotine potrebno pristupiti s velikom dozom opreza kako ne bi došlo do bilo kakvih vrsta nesreća ili havarija, kako u bušotini tako i na lokaciji bušotine (postrojenju). Ocjenska bušotina predstavlja bušotinu izrađenu u okviru istraživanja, unutar ocjenskog područja u svrhu utvrđivanja ležišta (ili više njih), u smislu debljine i lateralnog dosega te procjene količina pridobivih ugljikovodika ili geotermalnih voda te uvjete eksploatacije odnosno potvrđivanja geoloških struktura pogodnih za podzemno skladištenje plina ili trajno zbrinjavanje ugljikovog dioksida. Izrada takvih bušotina provodi se s manjim rizikom u odnosu na istražne bušotine, no i dalje je potrebno pristupiti izradi bušotine s većom dozom opreza kako bi se spriječile moguće nesreće. Razradna bušotina predstavlja buduću eksploatacijsku naftnu, plinsku ili geotermalnu bušotinu izbušenu na dokazanom produktivnom području ili unutar granica produktivnog ležišta/polja te se rabe za utvrđivanje horizontalnih i vertikalnih granica ležišta/polja. Izrada takvih bušotina provodi se uglavnom s vrlo niskim rizikom zbog dovoljne istraženosti područja u geološkom smislu, odnosno poznate su problematične zone (npr. zone povišenog tlaka, plitki plinovi) koje se očekuju prilikom bušenja te ih se može sigurno i adekvatno premostiti i izbušiti. Stoga je potrebno prilagoditi konstrukciju bušotine

u slučaju da nadležna tijela odluče, na temelju istraženosti određenog prostora, o promjeni klasifikacije bušotine prije samog projektiranja. Dodatno, zakonske regulative pojedinih država određuju minimalne zahtjeve pri izradi istraživačkih, ocjenskih i razradnih bušotina.

4.2. Ušteda vremena

Izrada kanala bušotine predstavlja neprekidan i dugotrajan proces čije vremensko trajanje ovisi o mnogim čimbenicima. Brzine bušenja, broj i duljine izbušenih sekcija, manevri bušačim alatom, mjerenja u bušotini, ugradnja i cementacija zaštitnih cijevi su samo neke od stavki koje utječu na vremenski plan izrade bušotine. Smanjivanje broja izbušenih sekcija kanala bušotine, a samim time i ugradnje i cementacije zaštitnih nizova, uvelike se smanjuje trajanje izrade bušotine. Navedeno smanjivanje moguće je ako izračunata naprezanja, ovisno o uvjetima tijekom cijelog radnog vijeka bušotine, ne prelaze dozvoljena naprezanja ugrađenih zaštitnih cijevi.

4.3. Ušteda financijskih sredstava

Također, izrada dodatnih sekcija kanala i ugradnja nizova zaštitnih cijevi povećava cjelokupnu cijenu izrade bušotine. Tada dolazi do povećanja troškova zbog cijene dlijeta za bušenje dodatnih dionica kanala bušotine, povećanje količine isplake potrebne za bušenje, ugradnje i cementacije dodatnog niza zaštitnih cijevi te dnevnog najma bušačeg postrojenja (engl. *daily rate*) što čini jedan od većih troškova pri angažiranju izvođača radova. Također, zbog duljeg trajanja izrade bušotine, potrebno je računati na veće troškove geološkog i bušačeg nadzora, kao odgovornih službi na lokaciji bušenja.

4.4. Dostupnost cijevnog alata i opreme

Govoreći o cijevnom alatu i opremi, to se ponajviše odnosi na zaštitne cijevi i bušotinsku glavu (engl. *wellhead*) u kojoj one odsjedaju. Bušotinska glava se sastoji od prirubnica i vješalica zaštitnih cijevi, a čitav sklop služi za preuzimanje tlaka u nizu uzlaznih cijevi i u prstenastom prostoru između zaštitnih i uzlaznih cijevi, redukciju tlaka na površini te spuštanje raznih alatki u kanal bušotine (Perić, 2007). I cijevi i prirubnice moraju biti konstruirane tako da izdrže sva naprezanja tijekom bušenja te naknadno tijekom eksploatacije ležišta i pridobivanja ležišnog fluida. U međunarodnom lancu opskrbe, postoji mogućnost da određena oprema ima velike rokove isporuke te se tada mora iskoristiti trenutno dostupna oprema kompanije. Tijekom bušačkih kampanja, kada se izrađuje nekoliko bušotina za redom, ponekad su dostupne duljine zaštitnih cijevi željenih promjera i kvaliteta čelika nedovoljne kako bi se zadovoljila planirana konstrukcija bušotine. Također, u slučaju

nedostupnosti bušotinske glave sa željenim karakteristikama brtvljenja i hermetičnosti te odgovarajućim promjerima za odsjedanje cijevi, potrebno je iskoristiti one dostupne. Naravno, ako zadovoljavaju navedene uvjete. Iskorištavanjem dostupnih zaštitnih cijevi i bušotinskih glava, potrebno je izraditi takvu konstrukciju zacjevljenja u kojoj će se moći iskoristiti kombinacije dostupnih cijevi i bušotinskih glava, a da se ne ugrozi integritet bušotine.

4.5. Vrijednosti naprezanja

Prilikom projektiranja konstrukcije bušotine, potrebno je izračunati sva naprezanja koja će se javljati u zaštitnim cijevima tijekom cijelog radnog vijeka bušotine. Stoga se više stavki uzima u obzir prilikom projektiranja zacjevljenja kako bi se odabrale zaštitne cijevi sa zadovoljavajućim karakteristikama, odnosno nazivnim čvrstoćama. Kao što je rečeno u radu, zaštitne cijevi se odabiru tako da izdrže naprezanja uslijed djelovanja unutarnjeg i vanjskog tlaka, uzdužnih i kombiniranih naprezanja. Ako su izračunata naprezanja, pomnožena sa sigurnosnim koeficijentom, uvelike manja od nazivnih čvrstoća odabranih zaštitnih cijevi, moguće je izraditi ponovni proračun naprezanja, gdje se može promijeniti broj i duljina sekcija zaštitnih cijevi te smanjiti kvaliteta čelika, odnosno čvrstoća cijevi. Tako bi se optimalno izradilo zacjevljenje, odnosno niz se ne bi pretjerano predimenzionirao. Također, ako su izračunata naprezanja veća od nazivnih čvrstoća cijevi, ponovno je potrebno promijeniti broj i duljine sekcija nizova te povećati kvalitetu čelika kako bi zaštitne cijevi bile dovoljno preddimenzionirane, uz zadovoljavajući koeficijent sigurnosti, te tako osigurale integritet bušotine.

4.6. Radovi u bušotini

Tijekom izrade kanala bušotine, potrebno je unutar nje izvesti određena mjerenja. Ležišni inženjeri odlučuju kada i u kojem intervalu je potrebno odraditi navedena mjerenja. U slučaju mjerenja u dugačkom otvorenom kanalu bušotine, dolazi do problema prilikom mjerenja zbog povećanih sila trenja i netočnosti mjerenja zbog ispranih stijenki kanala bušotine uslijed dugotrajne cirkulacije fluida i nestabilnosti formacije (Shokry i Elgibaly, 2021). Stoga, ukoliko su mjerenja iznimno bitna za daljnji razvoj istražnog/razradnog polja, potrebno je povećati broj sekcija te smanjiti njihovu duljinu kako bi rezultati bili što točniji. Nadalje, jednom izrađena, ispitana i proizvodno opremljena bušotina trebala bi osigurati sigurnu proizvodnju i obavljanje različitih radova i operacija u bušotini dugi niz godina. Radovi uključuju održavanje bušotina, stimulacijske radove (kemijske obrade i hidrauličko

frakturiranje), čišćenje i zamjena uzlaznog niza, utiskivanje fluida (vode ili plina) u cilju povećanja iscrpka, ponovno raspucavanje itd. Navedeni postupci se mogu odvijati u prisutnosti velikih tlakova koristeći agresivne medije (poput npr. kiseline) uslijed čega može doći do oštećenja uzlaznog ili proizvodnog niza zaštitnih cijevi. U slučaju da navedeni nizovi ne bi izdržale buduće operacije, potrebno je odabrati snažnije nizove kako ne bi došlo do ugrožavanja integriteta bušotine. Nekad je projektom zacjevljenja određena ugradnja proizvodnog niza većeg promjera (npr. 177,8 mm), jer ako dođe do njegovog oštećenja, moguće je ponovno ugraditi proizvodni niz manjeg promjera (npr. 139,7 mm) te tako održati funkcionalnost bušotine.

4.7. Način proizvodnog opremanja bušotine

Opremanje bušotine podrazumijeva ugradnju uzlaznog niza (tubinga), pakera koji će odvajati proizvodne zone unutar kanala bušotine te erupcijskog uređaja (engl. *christmas tree*) s ciljem prijenosa fluida iz ležišta do površine te reguliranja protoka i tlakova na površini. Kada se želi nabušiti više ležišta s različitim ležišnim fluidima, postoji način opremanja s više uzlaznih nizova (tubinga) u proizvodnom nizu zaštitnih cijevi. Tada je potrebno osigurati dovoljan promjer proizvodnog niza zaštitnih cijevi kako bi se navedene alatke mogle ugraditi. Ako ležišni inženjering pretpostavi kako će proizvodnja iz ležišta vrlo brzo morati biti ostvarena sekundarnim metodama pridobivanja (engl. *artificial lift*), tada je potrebno proizvodni niz cijevi dizajnirati tako da omogući ugradnju podzemne proizvodne opreme (dubinske klipne sisaljke, dubinske električne sisaljke, ventila za plinsko podizanje) te zadovolji sva naprezanja koja će se u njima javljati.

4.8. Geološke karakteristike područja

Geološke karakteristike područja gdje će se izrađivati bušotina važan su faktor prilikom projektiranja bušotine i zacjevljenja. Prilikom izrade projekta bušotine, geološka služba dostavlja prognozni geološki stup u kojem su detaljno opisane prognozirane geološke formacije, vrste naslaga, kronostratigrafske jedinice, rasjedi te slojevi plinova, nafte ili vode koje će se nabušiti po čitavoj dubini bušotine. Također, u njemu je sadržan prognozni gradijent pornih i frakturnih tlakova te gradijent temperatura koji se koriste kao ulazni podaci za izračun naprezanja zaštitnih cijevi. Uslijed velikih gradijenata tlakova, konstrukcija bušotine morala bi biti dizajnirana s velikom dozom sigurnosti. Nadalje, jedna od bitnih stvari geološkog profila je ta što može ukazati na postojanje plitkih barskih plinova koji mogu dovesti do erupcije prilikom bušenja. Nepravilnim projektiranjem duljina i kvaliteta

čelika vodećih nizova može doći oštećenja zaštitnih cijevi, kao i do havarija na površini uslijed erupcije plina iz plitkih slojeva. Potrebno je odrediti primjerene dubine i promjere konduktor i uvodnog niza zaštitnih cijevi kako bi se sigurno premostili navedeni slojevi, a u slučaju pojave dotoka plina iz takvih slojeva zaštitne cijevi moraju izdržati sva naprezanja. U slučaju prisustva agresivnih medija (ugljikov dioksid, sumporovodik te slana voda) koji ubrzavaju koroziju i strukturno propadanje cijevi, treba odabrati zaštitne cijevi izrađene od snažnijih čelika otpornih na takvo djelovanje te opremiti bušotinu uzlaznim nizom od kompozitnih materijala ili kromiranog čelika. Dodatno, potrebno je da prognozni geološki stup sadrži i informacije o mogućim zonama nižeg tlaka i kavernama kako bi se pravilno odredile dubine ugradnje ostalih nizova zaštitnih cijevi te se tako smanjili mogući troškovi i problemi uslijed diferencijalnog prihvata alata ili gubitka isplake.

5. KONSTRUKCIJE ZACJEVLJENJA BUŠOTINE X

U ovom poglavlju bit će prezentirane dvije varijante konstrukcije zacjevljenja bušotine X. U prvom podpoglavlju, izradit će se prvotno razmatrana konstrukcija kanala bušotine te će se u sklopu toga napraviti proračun naprezanja za pojedini niz zaštitnih cijevi. Nakon toga, izradit će se optimizirana konstrukcija bušotine, koja će imati jedan niz zaštitnih cijevi manje (tehnički niz) te će se također analizirati naprezanja pojedinog niza zaštitnih cijevi. Razlog uklanjanja tehničkog niza zaštitnih cijevi je dovoljna istraženost područja koja omogućava dublju ugradnju uvodnog niza zaštitnih cijevi, što bi trebalo dovesti do vremenskih i financijskih ušteda prilikom izrade bušotine. Nakon navedenih proračuna, svaka od navedenih konstrukcija morala bi zadovoljavati sve uvjete naprezanja kako bi zacjevljenje bilo ispravno i odobreno za ugradnju. Odabir i ugradnja niza zaštitnih cijevi kao konstruktivnih elemenata bušotine te njihova cementacija temeljeni su na sljedećim podacima i parametrima (INA d.d., 2022):

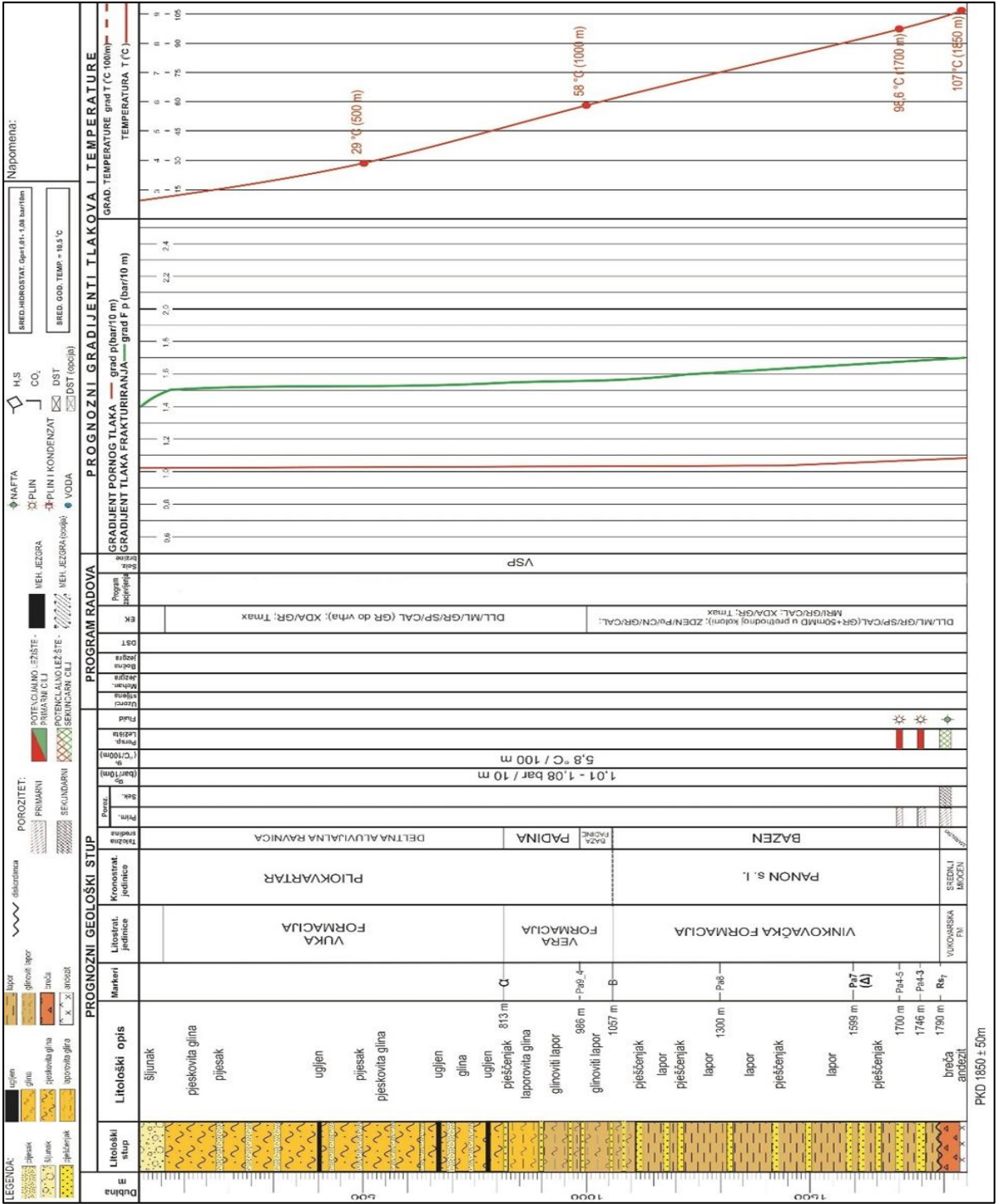
- geološkom profilu,
- gradijentu pornog tlaka i tlaka raspucavanja stijena,
- slojnom fluidu,
- sigurnosnim koeficijentima,
- proračunima naprezanja,
- programiranim tehnološkim zahtjevima u najnepovoljnijim bušotinskim uvjetima i
- položaju i svojstvima ležišta plina.

Pravilnim projektiranjem bušotine i njenim zacjevljenjem trebali bi se osigurati i zadovoljiti geološki uvjeti te osigurati stabilnost kanala bušotine i kontrola tlakova, tj. sprječavanje komunikacije ležišnih fluida između stijena po dubini. Projekti planirane i optimizirane konstrukcije bušotine, odnosno promjeri kanala bušotine, zaštitnih cijevi i analize naprezanja za pojedini niz zaštitnih cijevi izrađeni su prema jednakim uvjetima. Analiza naprezanja napravljena je u programu Landmark (modul StressCheckTM), a prilikom izrade analize i odabira zaštitnih cijevi korišteni su sljedeći minimalni sigurnosni koeficijenti (DF):

- | | |
|--------------------------|-------------|
| • vanjski tlak | DF = 1,125; |
| • unutarnji tlak | DF = 1,100; |
| • uzdužno naprezanje | DF = 1,300; |
| • kombinirano naprezanje | DF = 1,250. |

5.1. Planirana konstrukcija bušotine

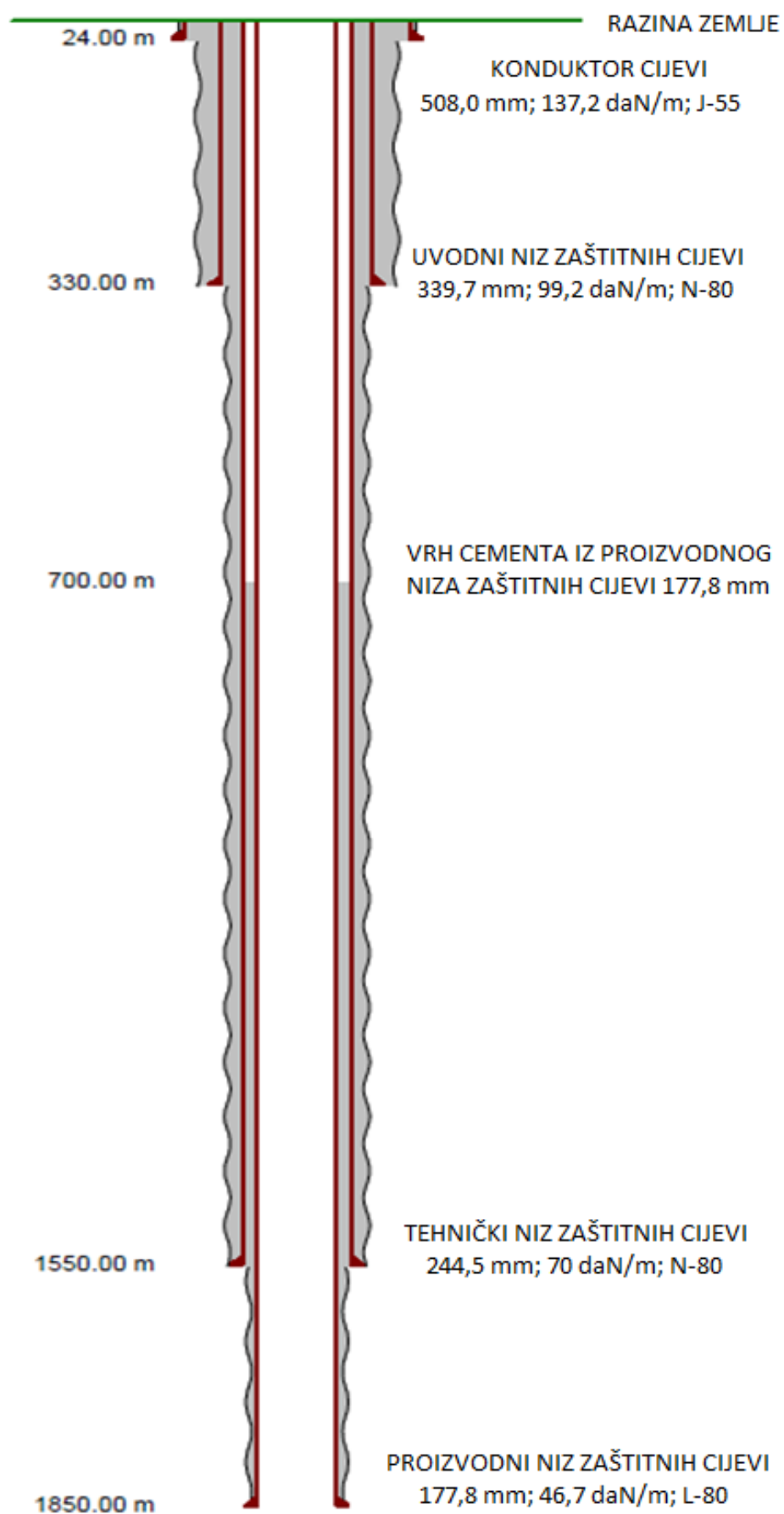
Osnovni ulazni podatak za proračun konstrukcije bušotine je prognozni geološki stup, prikazan na Slici 5-1. Iako se navedena bušotina X klasificira kao istražna, važno je naglasiti da su u prošlosti obavljeni određeni istražni radovi na polju Y, odnosno izbušeno je nekoliko bušotina. Prema tim podacima definirana je i konstrukcija nove bušotine čije su tehničke karakteristike prikazane u tablici 5-1 i na Slici 5-2.



Slika 5-1. Prognozni geološki stup istražne bušotine X (INA d.d., 2022)

Tablica 5-1. Planirana konstrukcija bušotine X

Niz zaštitnih cijevi	Promjer kanala	Promjer zaštitnih cijevi	Dubina ugradnje (m)	Visina dizanja cementa (m)	Gustoća isplake (kg/l)
	mm (in)	mm (in)			
Konduktor cijevi	-	508,0 (20)	24	Do ušća	-
Uvodni niz zaštitnih cijevi	444,5 (17 1/2)	339,7 (13 3/8)	330	Do ušća	1,05 – 1,16
Tehnički niz zaštitnih cijevi	311,2 (12 1/4)	244,5 (9 5/8)	1 550	Do ušća	1,05 – 1,20
Proizvodni niz zaštitnih cijevi	215,9 (8 1/2)	177,8 (7)	1 850	700	1,05 – 1,20



Slika 5-2. Shema planirane konstrukcije bušotine X

Spoznaja o litološkoj građi i starosti stijena na prospektu Y temelji se na dosadašnjim rezultatima istraživanja šireg prostora, pri čemu su interpretirani i analizirani podaci istražnih bušotina te sva dosadašnja saznanja prikupljena tijekom istraživanja i eksploatacije ugljikovodika (i geotermalnih voda) na eksploatacijskim bušotinama okolnih eksploatacijskih polja. Polje Y klasificira se kao napušteno plinsko polje te su na njemu izrađene 3 bušotine, dok je na okolnim poljima izrađeno 7 istražnih bušotina, čiji su bušotinski podaci uzeti u obzir prilikom izrade navedenog prognoznog geološkog stupa. U skladu s navedenim podacima, izradit će se vertikalna bušotina prognozne konačne dubine $1\ 850 \pm 50$ m.

Procjena gradijenata slojnog tlaka i gradijenata slojne temperature temeljena je na dostupnim podacima za plinsko polje Y. Vrijednost gradijenta slojnog tlaka tijekom izrade kanala bušotine prognozirana je na nivou hidrostatskog tlaka duž cijelog kanala bušotine ($g_p=1,01-1,08$ bar/10 m). Prognozirani gradijent temperature u profilu bušotine raste s dubinom te iznosi $g_t=5,8$ °C/100 m. Sukladno gradijentu temperature, predviđena temperatura unutar pretpostavljenog ležišta R-1 iznosi 98,6 °C, a unutar ležišta R-2 101,2 °C. Na prognoziranoj konačnoj dubini bušotine očekuje se temperatura od 107 °C. Primarni cilj bušotine X je probušiti perspektivno plinsko ležište R-1, dok je sekundarni cilj probušiti perspektivno plinsko ležište R-2 kao i potencijalno ležište nafte.

Planirane dubine ugradnje nizova zaštitnih cijevi primarno su određene prema sadržaju prognoznog geološkog stupa. Iako je u radu navedena grafička metoda određivanja dubina ugradnji pojedinih nizova cijevi na temelju pornih i frakturnih gradijenata tlakova, u ovom slučaju navedeni prognozirani tlakovi nisu dovoljno izraženi, odnosno njihove vrijednosti su relativno ujednačene cijelom dubinom bušotine. Konduktor niz zaštitnih cijevi ugrađuje se do dubine od 24 m kako bi se premostile površinske rastresite i nekonsolidirane formacije pijeska i šljunka te osigurali uvjeti za siguran početak bušenja odnosno spriječilo probijanje isplake unutar bušotinske šahte pri većim protocima isplake. Uvodni niz planiran je za ugradnju do dubine od 330 m, odnosno prije dosezanja naslaga ugljena. Također, petu uvodnog niza potrebno je postaviti u dovoljno čvrste, nepropusne naslage, što u ovom slučaju predstavlja debeli sloj glina. Iako dubina ugradnje uvodnog niza ovisi i o prisustvu plitkih plinova, prema prognoznom geološkom stupu takvih slojeva nema. Dubina ugradnje tehničkog niza iznosi 1 550 m kako bi se prekrile slabo konsolidirane rastresite formacije pijeska, ugljena i šljunka te glina, čime će se omogućiti siguran i neometan nastavak bušenja do konačne dubine. Također, peta tehničkog niza nalazi se u čvrstom sloju lapora.

Prilikom izrade bušotinskog radnog prostora, potrebno je izbušiti kanal bušotine promjera 660,4 mm (26 in.) hidrauličkim postrojenjem za izradu pilota i ugraditi konduktor cijev promjera 508,0 mm (20 in.) na predviđenu dubinu ugradnje od 24 m. Navedeni niz zaštitnih cijevi potrebno je zacementirati popunjavanjem prstenastog prostora oko konduktor cijevi do pojave cementne kaše na razini ušća bušotine (0,0 m). Tehnički podaci o odabranim konduktor cijevima prikazani su u tablici 5-2.

Tablica 5-2. Tehnički podaci o cijevima promjera 508,0 mm odabranim za konduktorski niz zaštitnih cijevi

	Jedinica	Vrijednost
Interval ugradnje	m	0 – 24
Vanjski promjer	mm	508,0 (20 in.)
Jedinična težina	daN/m	137,2 (94 lb/ft)
Kvaliteta čelika	J-55	
Vrsta spojnice	BTC	
Kritični unutarnji tlak	MPa	14,5 (2 100 psi)
Kritični vanjski tlak	MPa	3,6 (520 psi)
Dozvoljeno vlačno naprezanje	kN	6 590 (672 t)

Iduća faza predstavlja bušenje kanala bušotine za ugradnju uvodnog niza dlijetom promjera 444,5 mm (17 ½ in.) do dubine od ± 330 m. Nakon bušenja dionice kanala, potrebno je ugraditi zaštitne cijevi promjera 339,7 mm (13 3/8 in.) i zacementirati ih do ušća bušotine (0,0 m). Tehnički podaci o zaštitnim cijevima odabranim za uvodni niz prikazani su u tablici 5-3.

Tablica 5-3. Tehnički podaci o cijevima promjera 339,7 mm odabranim za uvodni niz zaštitnih cijevi

	Jedinica	Vrijednost
Interval ugradnje	m	0 – 330
Vanjski promjer	mm	339,7 (13 ¾ in.)
Jedinična težina	daN/m	99,2 (68 lb/ft)
Kvaliteta čelika	N-80	
Vrsta spojnice	BTC	
Kritični unutarnji tlak	MPa	34,6 (5 020 psi)
Kritični vanjski tlak	MPa	15,6 (2 260 psi)
Dozvoljeno vlačno naprezanje	kN	6 920 (705 t)

Kanal bušotine za ugradnju tehničkog niza zaštitnih cijevi potrebno je izbušiti dlijetom 311,2 mm (12 ¼ in.) do planirane dubine ugradnje od $\pm 1\ 550$ m. Nakon bušenja, prema projektu bušotine potrebno je izvesti karotažno mjerenje nakon kojeg će se ugraditi odabrane zaštitne cijevi. Tijekom cementiranja niza zaštitnih cijevi, planirana visina dizanja cementne kaše je do razine ušća bušotine (0,0 m). Tehnički podaci o zaštitnim cijevima odabranim za tehnički niz prikazani su u tablici 5-4.

Tablica 5-4. Tehnički podaci o cijevima promjera 244,5 mm odabranim za tehnički niz zaštitnih cijevi

	Jedinica	Vrijednost
Interval ugradnje	m	0 – 1 550
Vanjski promjer	mm	244,5 (9 ⅝ in.)
Jedinična težina	daN/m	70 (47 lb/ft)
Kvaliteta čelika	N-80	
Vrsta spojnice	BTC	
Kritični unutarnji tlak	MPa	47,3 (6 850 psi)
Kritični vanjski tlak	MPa	32,8 (4 750 psi)
Dozvoljeno vlačno naprezanje	kN	4 830 (492 t)

Zadnja dionica kanala bit će izrađena dlijetom promjera 215,9 mm (8 ½ in.) do planirane konačne dubine koja iznosi $1\ 850 \pm 50$ m kako bi se osiguralo pouzdano raskrivanje ležišta. Nakon karotažnih mjerenja i buduće odluke o ugradnji zaštitnih cijevi, ugradit će se proizvodni niz zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm (7 in.) i zacementirat s projektiranom visinom dizanja cementne kaše do dubine od 700 m. Unutar navedenog niza, u slučaju potvrde nalazišta ugljikovodika i odluke o proizvodnom opremanju, bit će ugrađen uzlazni niz cijevi. Tehnički podaci o zaštitnim cijevima odabranim za proizvodni niz prikazani su u tablici 5-5.

Tablica 5-5. Tehnički podaci o cijevima promjera 177,8 mm odabranim za proizvodni (eksploatacijski) niz zaštitnih cijevi

	Jedinica	Vrijednost
Interval ugradnje	m	0 – 1 850
Vanjski promjer	mm	177,8 (7 in.)
Jedinična težina	daN/m	46,7 (32 lb/ft)
Kvaliteta čelika	L-80	
Vrsta spojnice	VAsuperior	
Kritični unutarnji tlak	MPa	62,5 (9 050 psi)
Kritični vanjski tlak	MPa	59,3 (8 590 psi)
Dozvoljeno vlačno naprezanje	kN	3320 (339 t)

5.1.1. Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm (uvodni niz zaštitnih cijevi)

Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće za konduktorski niz zaštitnih cijevi nije potrebno obaviti jer konduktor niz nije izložen značajnim opterećenjima tijekom izrade kanala bušotine, ugrađuje se tijekom pripreme bušotinskog radnog prostora te je uobičajeno nižih kvaliteta čelika. Stoga, proračun naprezanja kreće od uvodnog niza zaštitnih cijevi. U tablici 5-6 dani su ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm.

Tablica 5-6. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm

	Jedinica	Vrijednost
Dubina	m	330
Gustoća isplake tijekom ugradnje zaštitnih cijevi	kg/l	1,16
Gustoća cementne kaše	kg/l	1,50 / 1,90
Gustoća isplake za nastavak bušenja	kg/l	1,20
Tlak ispitivanja hermetičnosti	MPa	7
*Gradijent pornog tlaka (geološki profil)	bar/10 m	1,03
*Gradijent tlaka frakturiranja (geološki profil)	bar/10 m	1,52
*Temperatura u bušotini na dnu zaštitnih cijevi	°C	21,0

*odnosi se na područje ispod pete zaštitnih cijevi

U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- zamjena stupca isplake plinom,
- dotok plina u bušotinu s dubine 1 550 m,
- ispitivanje hermetičnosti niza zaštitnih cijevi s gustoćom fluida 1,16 kg/l,
- fraktura u razini pete s 1/3 ležišnog tlaka na površini i
- nastavak bušenja, isplaka gustoće 1,20 kg/l.

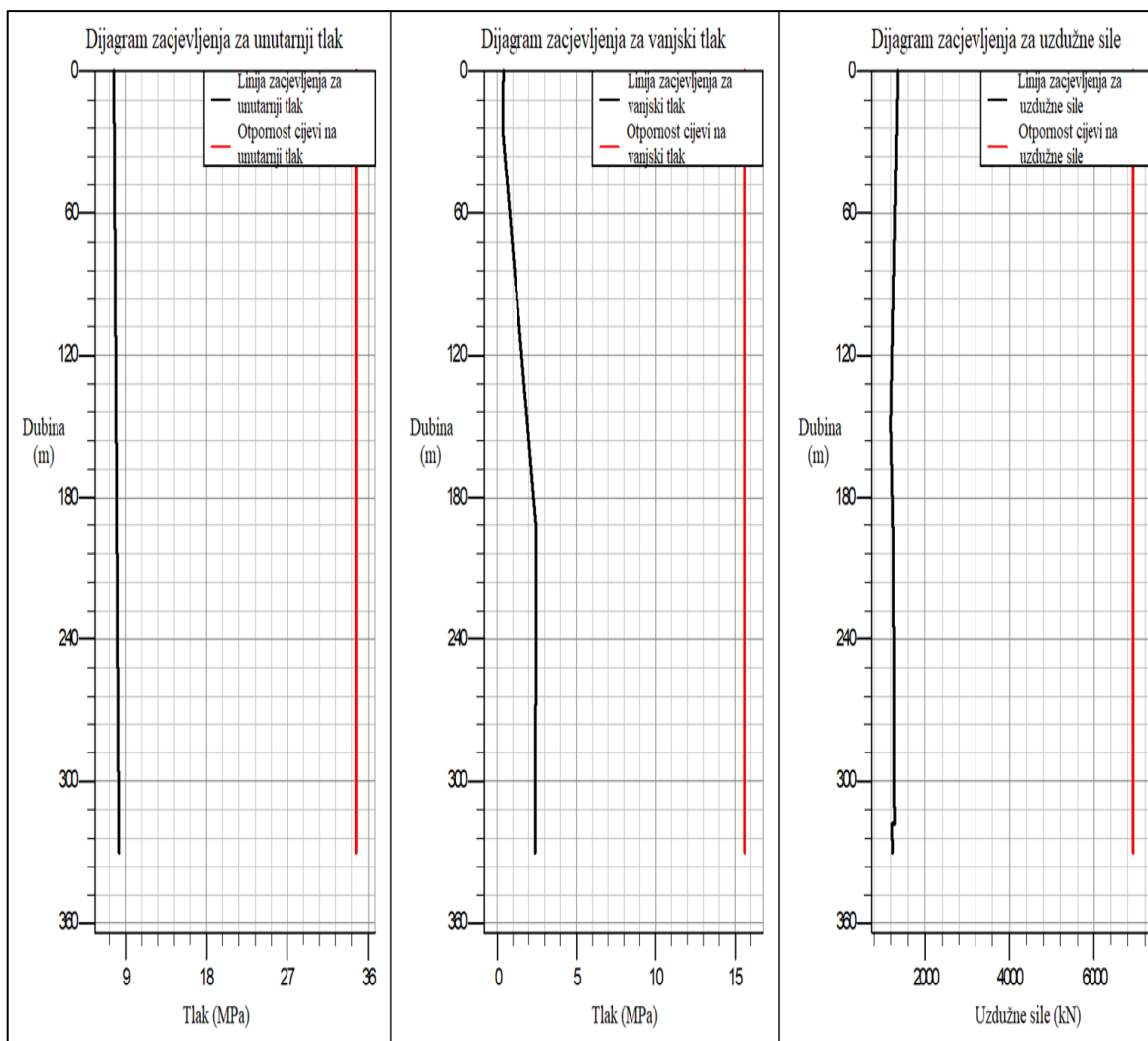
U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm uslijed djelovanja vanjskog tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- nastavak bušenja,
- isplaka gustoće 1,20 kg/l,
- pad razine isplake za 194 m (najnepovoljniji rezultat na temelju unesenih podataka prema softveru) i
- cementacija.

U proračunu rezultante uzdužnih naprezanja zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm razmatrani su sljedeći uvjeti:

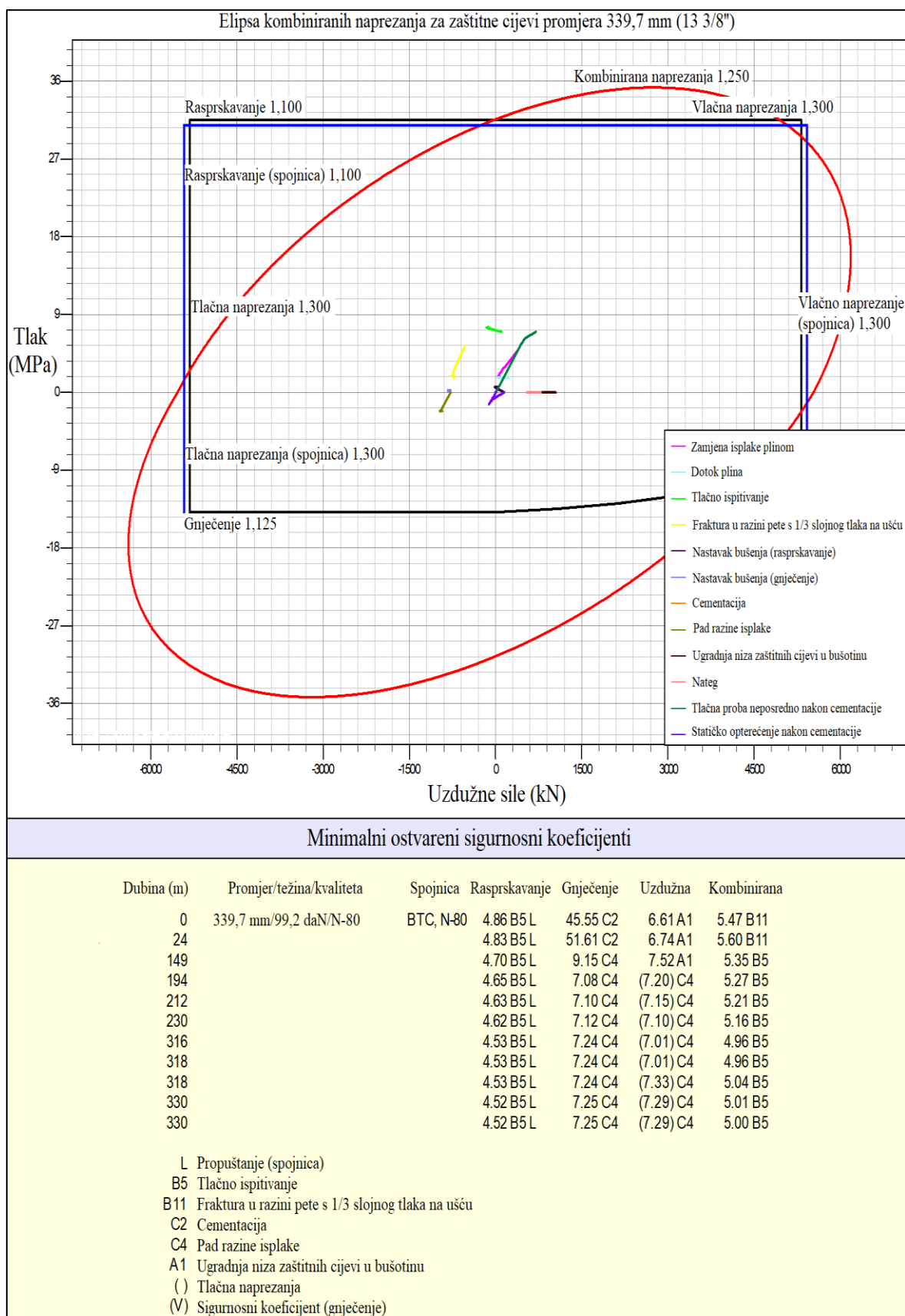
- ugradnja zaštitnih cijevi brzinom 1 m/s,
- nateg zaštitnih cijevi od 500 kN,
- ispitivanje hermetičnosti zaštitnih cijevi prije stvrđjavanja cementne kaše s gustoćom fluida 1,16 kg/l i
- statičko opterećenje nakon cementacije.

Na Slici 5-3 prikazan je odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm za uvjete opterećenja unutarnjim tlakom, vanjskim tlakom te opterećenja uslijed djelovanja uzdužne sile.



Slika 5-3. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu

Na Slici 5-4 prikazana je elipsa kombiniranih naprezanja te su vidljivi svi minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti.



Slika 5-4. Prikaz elipse naprezanja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm

Maksimalno opterećenje unutarnjim tlakom javlja se kod ispitivanja hermetičnosti niza zaštitnih cijevi. Odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 4,52 na dubini od 330 m.

Maksimalno opterećenje vanjskim tlakom javlja se uslijed pada razine isplake u bušotini. Rezultati proračuna prikazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 7,08 na dubini od 194 m, što predstavlja dubinu vrha stupca isplake nakon pada njene razine.

Maksimalno opterećenje uzdužnim silama javlja se tijekom ugradnje niza zaštitnih cijevi u bušotinu. Rezultati proračuna pokazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 6,61 na ušću bušotine. Odabrane zaštitne cijevi promjera 339,7 mm zadovoljavaju uvjete kombiniranih naprezanja uz postignuti najmanji koeficijent sigurnosti od 4,96 (ispitivanje hermetičnosti zaštitnih cijevi) na dubini od 318 m.

Na temelju svih prikazanih podataka može se zaključiti da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete.

5.1.2. *Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm (tehnički niz zaštitnih cijevi)*

U tablici 5-7 dani su ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm.

Tablica 5-7. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm

	Jedinica	Vrijednost
Dubina	m	1 550
Gustoća isplake tijekom ugradnje zaštitnih cijevi	kg/l	1,20
Gustoća cementne kaše	kg/l	1,50 / 1,90
Gustoća isplake za nastavak bušenja	kg/l	1,20
Tlak ispitivanja hermetičnosti	MPa	20
*Gradijent pornog tlaka (geološki profil)	bar/10 m	1,05
*Gradijent tlaka frakturiranja (geološki profil)	bar/10 m	1,65
*Temperatura na peti zaštitnih cijevi	°C	88,0

*odnosi se na područje ispod pete zaštitnih cijevi

U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- zamjena stupca isplake plinom,
- dotok plina u bušotinu s dubine 1 850 m,
- ispitivanje hermetičnosti niza zaštitnih cijevi s gustoćom fluida 1,16 kg/l,
- fraktura u razini pete s 1/3 ležišnog tlaka na površini i
- nastavak bušenja, isplaka gustoće 1,20 kg/l.

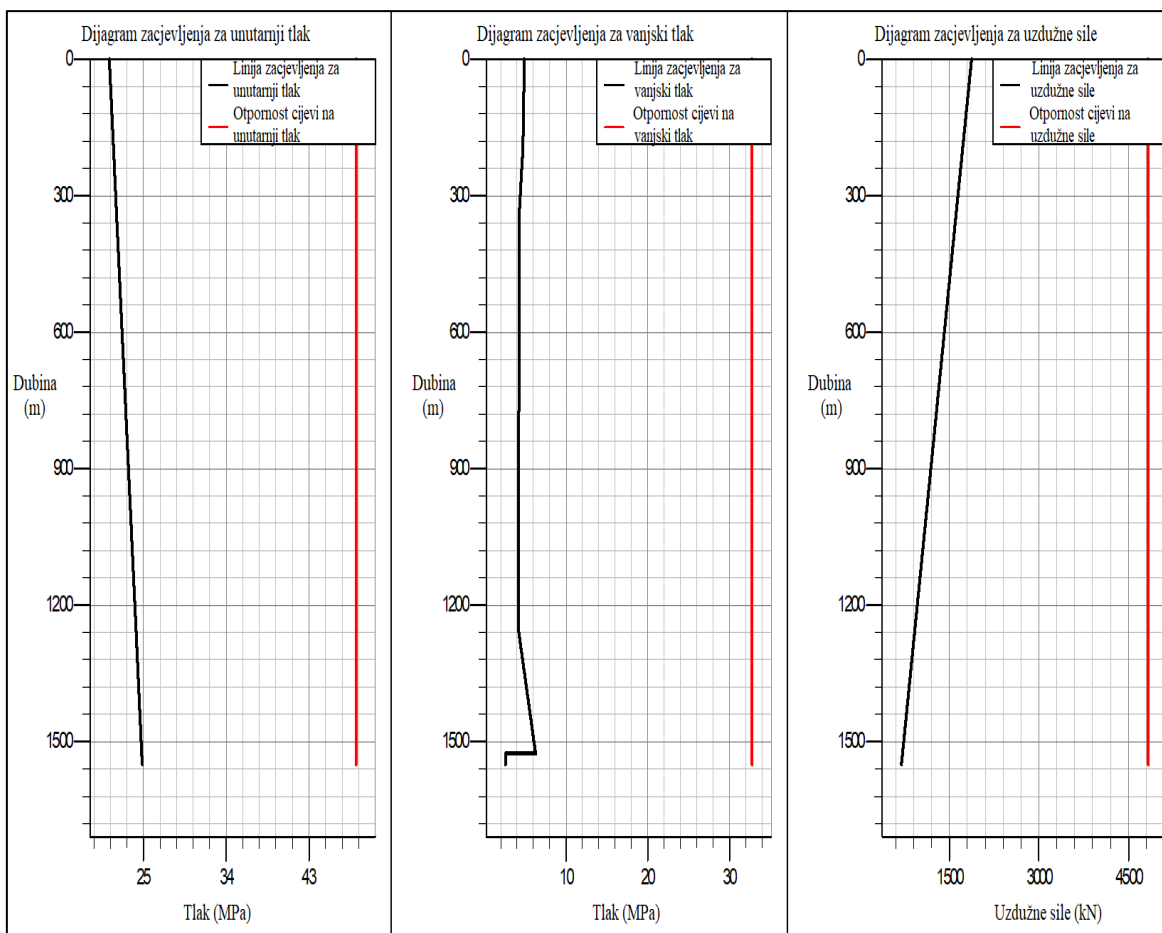
U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm uslijed djelovanja vanjskog tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- nastavak bušenja, isplaka gustoće 1,20 kg/l,
- pad razine isplake za 194 m (najnepovoljniji rezultat na temelju unesenih podataka prema softveru) i
- cementacija.

U proračunu rezultante uzdužnih naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm razmatrani su sljedeći uvjeti:

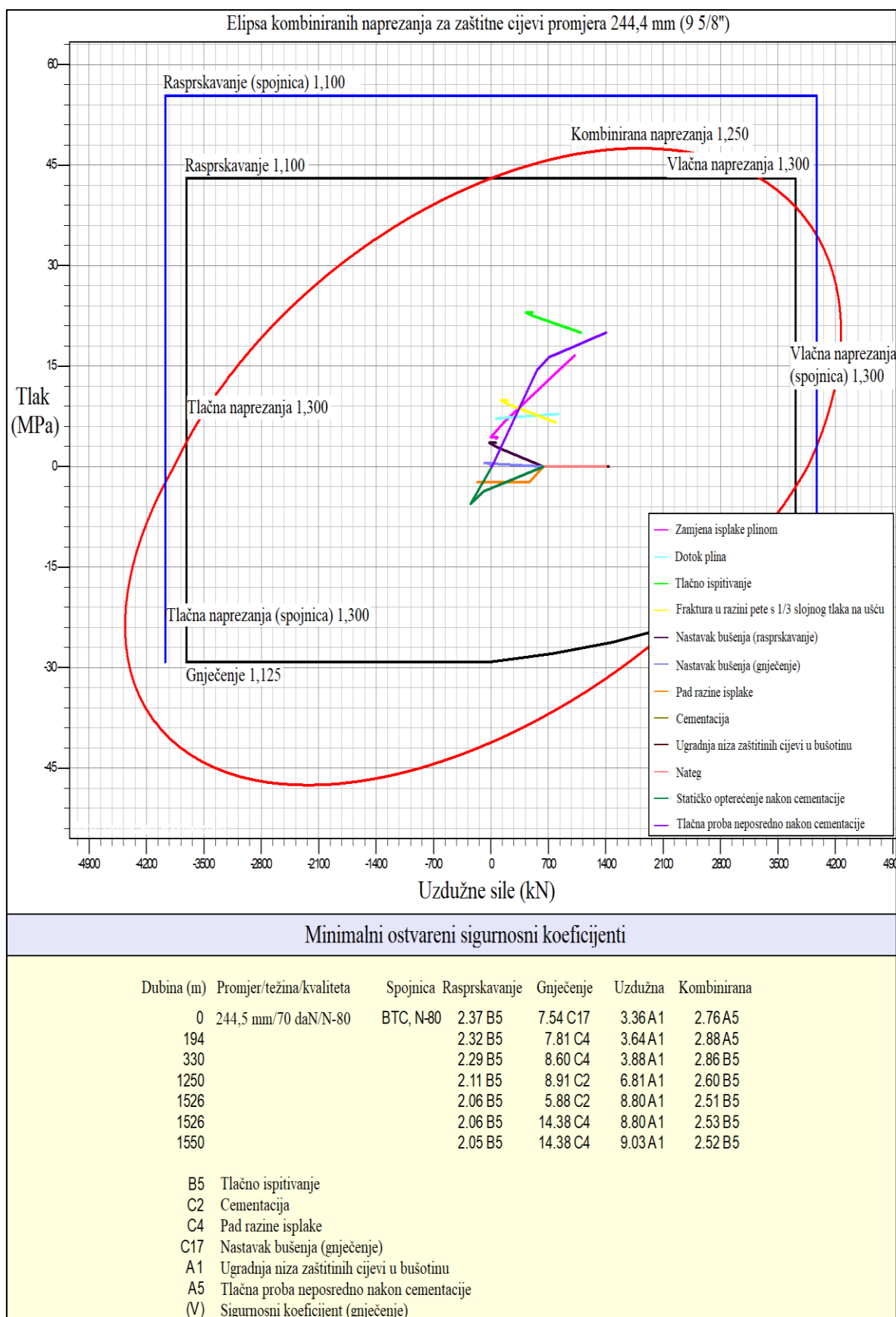
- ugradnja zaštitnih cijevi brzinom 1 m/s,
- nateg zaštitnih cijevi od 500 kN,
- ispitivanje hermetičnosti zaštitnih cijevi prije stvrdnjavanja cementne kaše s gustoćom fluida 1,16 kg/l i
- statičko opterećenje nakon cementacije.

Na Slici 5-5 prikazan je odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm za uvjete opterećenja unutarnjim tlakom, vanjskim tlakom te opterećenja uslijed djelovanja uzdužne sile.



Slika 5-5. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu

Na Slici 5-6 prikazana je elipsa kombiniranih naprezanja te su vidljivi svi minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti.



Slika 5-6. Prikaz elipse naprezanja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm

Maksimalno opterećenje unutarnjim tlakom javlja se kod ispitivanja hermetičnosti niza zaštitnih cijevi. Odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 2,05 na dubini od 1 550 m.

Maksimalno opterećenje vanjskim tlakom javlja se uslijed cementacije niza zaštitnih cijevi. Rezultati proračuna prikazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 5,88 na dubini od 1 526 m.

Maksimalno opterećenje uzdužnim silama javlja se tijekom ugradnje niza zaštitnih cijevi u bušotinu. Rezultati proračuna pokazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 3,36 na ušću bušotine..

Odabrane zaštitne cijevi promjera 244,5 mm zadovoljavaju uvjete kombiniranih naprezanja uz postignuti najmanji koeficijent sigurnosti od 2,51 (ispitivanje hermetičnosti zaštitnih cijevi) na dubini od 1 526 m.

Na temelju svih prikazanih podataka može se zaključiti da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete.

5.1.3. Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm (proizvodni (eksploatacijski) niz zaštitnih cijevi)

U tablici 5-8 dani su ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm.

Tablica 5-8. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm

	Jedinica	Vrijednost
Dubina	m	1 850
Gustoća isplake tijekom ugradnje zaštitnih cijevi	kg/l	1,20
Gustoća cementne kaše	kg/l	1,50 / 1,90
Tlak ispitivanja hermetičnosti	MPa	22
Tlak tijekom stimulacijskih radova	MPa	31
*Gradijent pornog tlaka (geološki profil)	bar/10 m	1,08
*Gradijent tlaka frakturiranja (geološki profil)	bar/10 m	1,70
*Temperatura na peti zaštitnih cijevi	°C	107

*odnosi se na područje ispod pete zaštitnih cijevi

U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm uslijed unutarnjeg tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- ispitivanje hermetičnosti niza zaštitnih cijevi s gustoćom fluida 1,2 kg/l,
- propuštanje uzlaznih cijevi i
- propuštanje tijekom stimulacijskih radova.

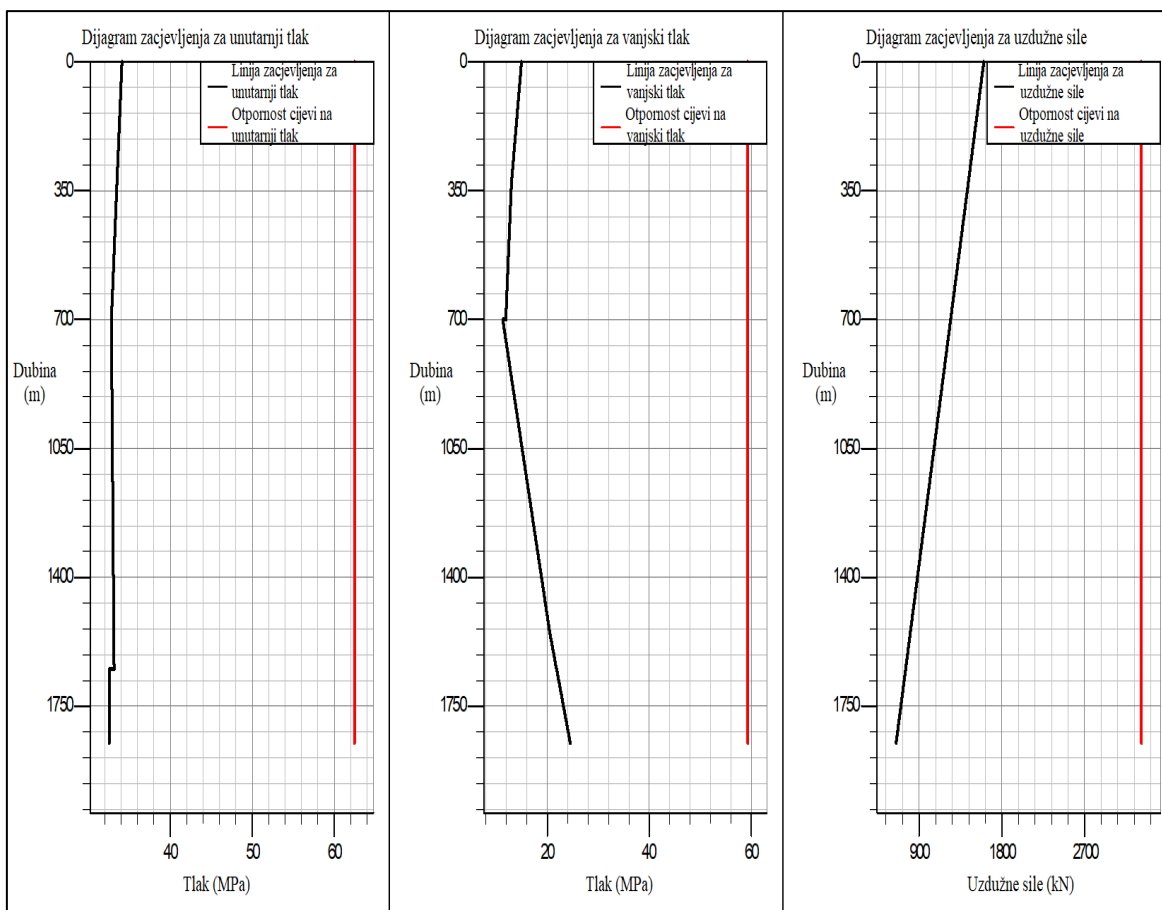
U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi uslijed vanjskog tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- cementacija,
- potpuno pražnjenje zaštitnih cijevi,
- migracija plina i
- razlika u gustoći fluida iznad i ispod pakera (proizvodni uvjeti).

U proračunu rezultante uzdužnih naprezanja zaštitnih cijevi razmatrani su sljedeći uvjeti:

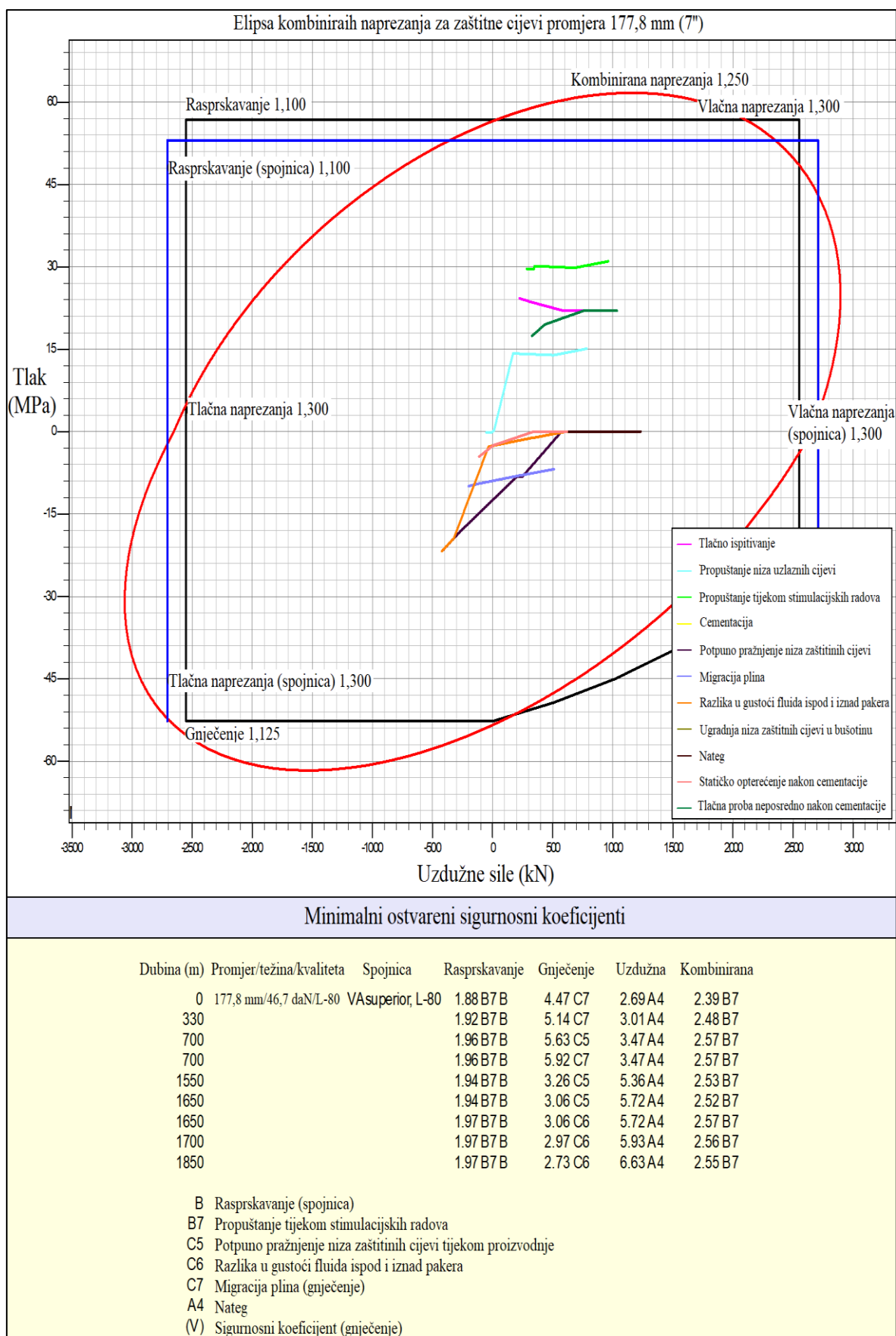
- ugradnja niza zaštitnih cijevi brzinom od 1 m/s,
- nateg 500 kN,
- ispitivanje hermetičnosti zaštitnih cijevi prije stvrdnjavanja cementne kaše s gustoćom fluida 1,2 kg/l i
- statičko opterećenje nakon cementacije.

Na Slici 5-7 prikazan je odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm za uvjete opterećenja unutarnjim tlakom, vanjskim tlakom te opterećenja uslijed djelovanja uzdužne sile.



Slika 5-7. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu

Na Slici 5-8 prikazana je elipsa kombiniranih naprezanja te su vidljivi svi minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti.



Slika 5-8. Prikaz elipse napreznja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 177,8 mm

Maksimalno opterećenje unutarnjim tlakom javlja se uslijed propuštanja cijevi tijekom stimulacijskih radova. Odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 1,88 na ušću bušotine.

Maksimalno opterećenje vanjskim tlakom javlja se uslijed razlike u gustoći fluida ispod i iznad pakera. Rezultati proračuna prikazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 2,73 na dubini od 1 850 m (peta niza zaštitnih cijevi).

Maksimalno opterećenje uzdužnim silama javlja se kod natega proizvodnog niza zaštitnih cijevi. Rezultati proračuna pokazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 2,69 na ušću bušotine.

Odabrane zaštitne cijevi promjera 177,8 mm zadovoljavaju uvjete kombiniranih naprezanja uz postignuti najmanji koeficijent sigurnosti od 2,39 (propuštanje tijekom stimulacijskih radova) na ušću bušotine.

Na temelju svih prikazanih podataka može se zaključiti da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete.

Izračunati minimalni ostvareni koeficijenti sigurnosti prikazani su u tablici 5-9. Sve odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju kriterije, odnosno minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti veći su od dozvoljenih.

Tablica 5-9. Minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti

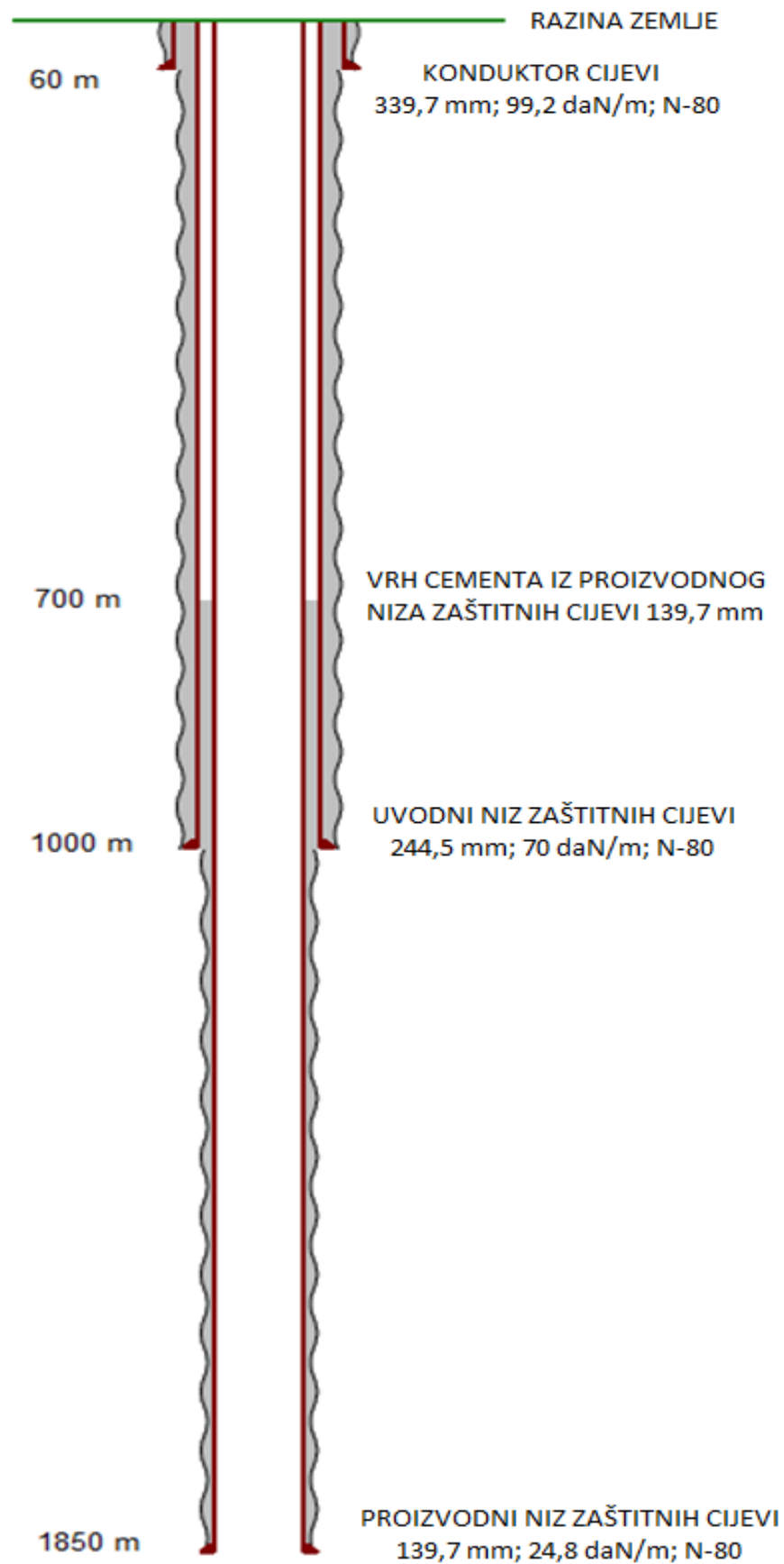
Zaštitne cijevi	Minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti			
	Unutarnji tlak	Vanjski tlak	Uzdužno naprezanje	Kombinirano naprezanje
Uvodni niz zaštitnih cijevi 339,7 mm (13 3/8 in.)	4,52	7,08	6,61	4,96
Tehnički niz zaštitnih cijevi 244,5 mm (9 5/8 in.)	2,05	5,88	3,36	2,51
Proizvodni niz zaštitnih cijevi 177,8 mm (7 in.)	1,88	2,73	2,69	2,39

5.2. Optimizirana konstrukcija bušotine X

Optimizirana konstrukcija bušotine X prikazana je u tablici 5-10 te njena shema na Slici 5-9. Planirane dubine ugradnje nizova zaštitnih cijevi u optimiziranoj konstrukciji također su određene prema sadržaju prognoznog geološkog stupa. Konduktor niz zaštitnih cijevi ugrađuje se do dubine od 60 m, u odnosu na planiranih 24 m, kako bi se bolje premostile površinske rastresite i nekonsolidirane formacije pijeska i šljunka i spriječilo probijanje isplake unutar bušotinske šahte pri većim protocima. Na samom prognoznom geološkom stupu vidljivo je da površinske naslage šljunka zaliježu do otprilike 60 m, što nakon ugradnje usmjerivača do planirane dubine čini bušotinu iznimno sigurnom za daljnji nastavak bušenja. Uvodni niz planirano je ugraditi do dubine od 1 000 m. Kako su gradijenti pornih i frakturnih tlakova povoljni, a prisutnosti plitkih plinova nema, ovako dug uvodni niz (u odnosu na planiranih 330 m) može vršiti ulogu tehničkog niza kako bi se prekrile slabo konsolidirane rastresite formacije pijeska, ugljena i šljunka te glina, čime će se omogućiti siguran i neometan nastavak bušenja do ležišta. Peta uvodnog niza trebala bi se nalaziti u čvrstom sloju lapora, a pri dosezanju konačne dubine dolazi do izmjene stabilnih slojeva pješčenjaka i lapora.

Tablica 5-10. Optimizirana konstrukcija bušotine X

Niz zaštitnih cijevi	Promjer kanala	Promjer zaštitnih cijevi	Dubina ugradnje (m)	Visina dizanja cementa (m)	Gustoća isplake (kg/l)
	mm (in)	mm (in)			
Konduktor cijevi	-	339,7 (13 3/8)	60	Do ušća	-
Uvodni niz zaštitnih cijevi	311,2 (12 1/4)	244,5 (95/8)	1 000	Do ušća	1,05 – 1,16
Proizvodni niz zaštitnih cijevi	215,9 (8 1/2)	139,7 (5 1/2)	1 850	700	1,05 – 1,20



Slika 5-9. Shema optimizirane konstrukcije bušotine X

Prilikom izrade bušotinskog radnog prostora, potrebno je izbušiti kanal bušotine promjera 444,5 mm (17 1/2 in.) hidrauličkim postrojenjem za izradu pilota i ugraditi konduktor cijevi promjera 339,7 mm (13 3/8 in.) na predviđenu dubinu ugradnje od 60 m. Navedeni niz potrebno je zacementirati do ušća bušotine (0,0 m). Tehnički podaci o odabranim konduktor cijevima prikazani su u tablici 5-11.

Tablica 5-11. Tehnički podaci o cijevima promjera 339,7 mm odabranim za konduktorski niz zaštitnih cijevi

	Jedinica	Vrijednost
Interval ugradnje	m	0 – 60
Vanjski promjer	mm	339,7 (13 3/8 in.)
Jedinična težina	daN/m	99,2 (68 lb/ft)
Kvaliteta čelika	N-80	
Vrsta spojnice	BTC	
Kritični unutarnji tlak	MPa	34,6 (5 020 psi)
Kritični vanjski tlak	MPa	15,6 (2 260 psi)
Dozvoljeno vlačno naprezanje	kN	6 920 (705 t)

Iduća faza predstavlja bušenje sekcije kanala bušotine dlijetom promjera 311,2 mm (12 1/4 in.) do dubine od $\pm 1\ 000$ m za ugradnju uvodnog niza zaštitnih cijevi. Nakon bušenja sekcije, potrebno je izvesti karotazna mjerenja te ugraditi zaštitne cijevi promjera 244,5 mm (9 5/8 in.) i zacementirati niz s visinom dizanja cementne kaše do ušća bušotine (0,0 m). Tehnički podaci o zaštitnim cijevima odabranim za uvodni niz prikazani su u tablici 5-12.

Tablica 5-12. Tehnički podaci o cijevima promjera 244,5 mm odabranim za uvodni niz zaštitnih cijevi

	Jedinica	Vrijednost
Interval ugradnje	m	0 – 1 000
Vanjski promjer	mm	244,5 (9 5/8 in.)
Jedinična težina	daN/m	70 (47 lb/ft)
Kvaliteta čelika	N-80	
Vrsta spojnice	BTC	
Kritični unutarnji tlak	MPa	47,3 (6 850 psi)
Kritični vanjski tlak	MPa	32,8 (4 750 psi)
Dozvoljeno vlačno naprezanje	kN	4830 (492 t)

Zadnju sekciju kanala potrebno je izraditi dlijetom promjera 215,9 mm (8 ½ in.) do planirane konačne dubine koja iznosi $1\ 850 \pm 50$ m kako bi se osiguralo pouzdano raskrivanje ležišta. Poslije karotažnih mjerenja i konačne odluke o ugradnji zaštitnih cijevi, ugradit će se proizvodni niz zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm (5 ½ in.) i zacementirat do projektirane dubine dizanja cementne kaše od 700 m unutar kojeg će se, ovisno o potvrdi nalazišta ugljikovodika, ugraditi niz uzlaznih cijevi (tubing). Tehnički podaci o zaštitnim cijevima odabranim za proizvodni (eksploatacijski) niz prikazani su u tablici 5-13.

Tablica 5-13. Tehnički podaci o cijevima promjera 139,7 mm odabranim za proizvodni (eksploatacijski) niz zaštitnih cijevi

	Jedinica	Vrijednost
Interval ugradnje	m	0 – 1 850
Vanjski promjer	mm	139,7 (5 ½ in.)
Jedinična težina	daN/m	24,8 (17 lb/ft)
Kvaliteta čelika	N-80	
Vrsta spojnice	BTC	
Kritični unutarnji tlak	MPa	53,4 (7 743 psi)
Kritični vanjski tlak	MPa	43,3 (6 393 psi)
Dozvoljeno vlačno naprezanje	kN	1 770 (180 t)

5.2.1. Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm (uvodni niz zaštitnih cijevi)

Kao i u prethodnoj konstrukciji, proračun naprezanja se ne obavlja za konduktor niz zaštitnih cijevi. Analiza naprezanja kreće od uvodnog niza zaštitnih cijevi. U tablici 5-14 dani su ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm.

Tablica 5-14. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm

	Jedinica	Vrijednost
Dubina	m	1 000
Gustoća isplake tijekom ugradnje zaštitnih cijevi	kg/l	1,16
Gustoća cementne kaše	kg/l	1,50 / 1,90
Gustoća isplake za nastavak bušenja	kg/l	1,20
Tlak ispitivanja hermetičnosti	MPa	17
*Gradijent pornog tlaka (geološki profil)	bar/10 m	1,03
*Gradijent tlaka frakturiranja (geološki profil)	bar/10 m	1,56
*Temperatura u bušotini na dnu zaštitnih cijevi	°C	58,0

*odnosi se na područje ispod pete zaštitnih cijevi

U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- zamjena stupca isplake plinom,
- dotok plina u bušotinu s dubine 1 850 m,
- ispitivanje hermetičnosti niza zaštitnih cijevi s gustoćom fluida 1,16 kg/l,
- fraktura u razini pete s 1/3 ležišnog tlaka na površini i
- nastavak bušenja, isplaka gustoće 1,20 kg/l.

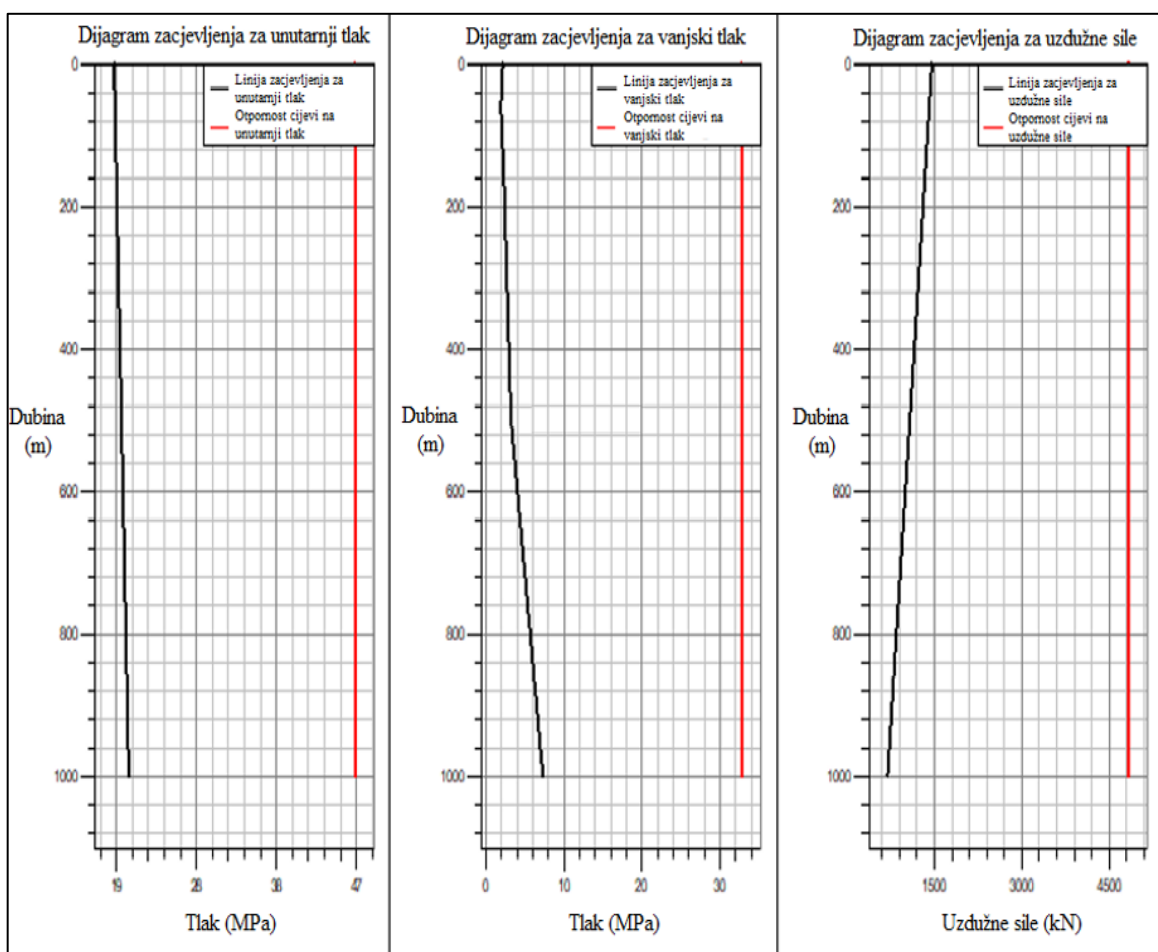
U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm uslijed djelovanja vanjskog tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- nastavak bušenja, isplaka gustoće 1,20 kg/l,
- pad razine isplake za 187 m (najnepovoljniji rezultat na temelju unesenih podataka prema softveru) i
- cementacija.

U proračunu rezultante uzdužnih naprezanja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm razmatrani su sljedeći uvjeti:

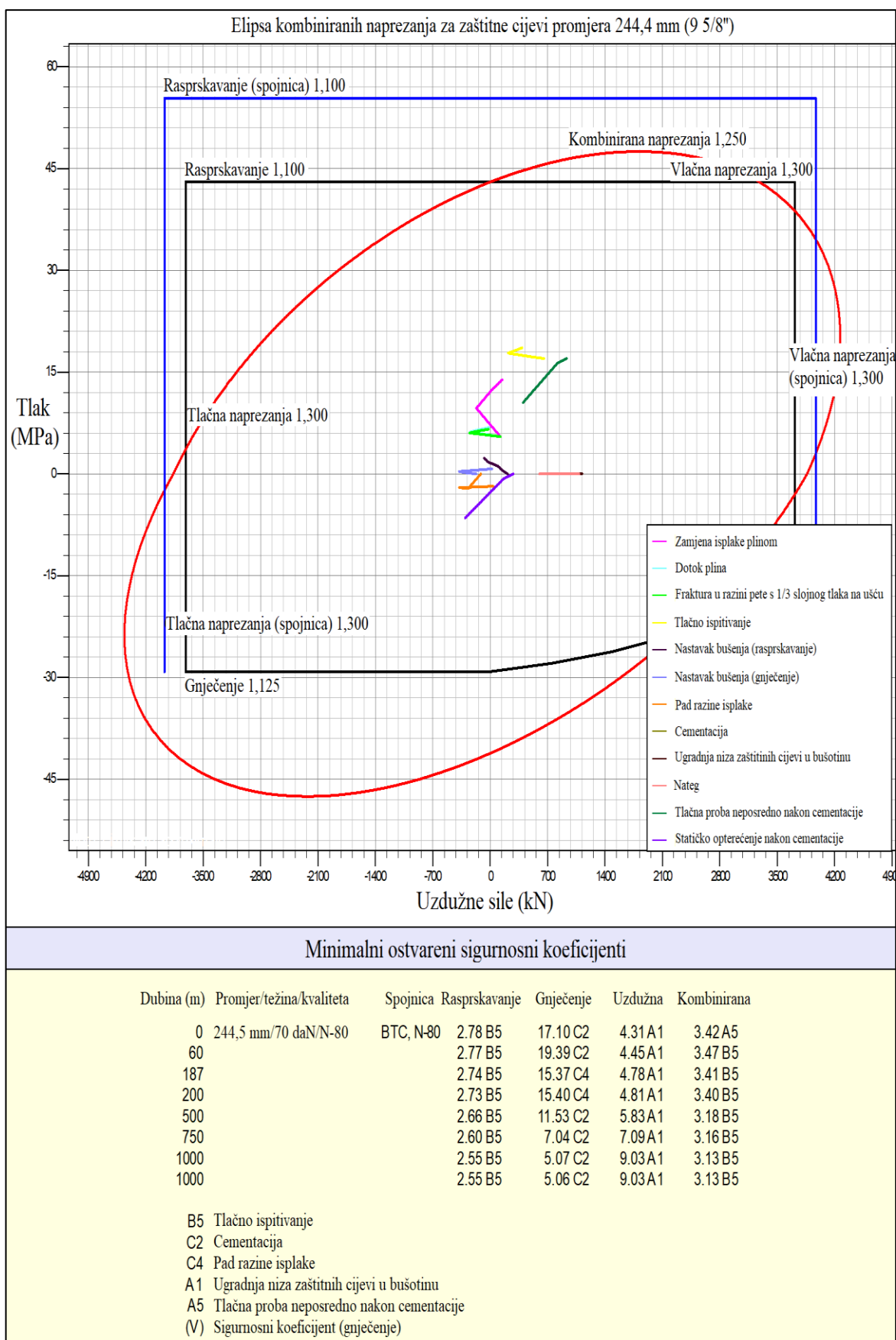
- ugradnja zaštitnih cijevi brzinom 1 m/s,
- nateg zaštitnih cijevi od 500 kN,
- ispitivanje hermetičnosti zaštitnih cijevi prije stvrđjavanja cementne kaše s gustoćom fluida 1,16 kg/l i
- statičko opterećenje nakon cementacije.

Na Slici 5-10 prikazan je odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm za uvjete opterećenja unutarnjim tlakom, vanjskim tlakom te opterećenja uslijed djelovanja uzdužne sile.



Slika 5-10. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu

Na Slici 5-11 prikazana je elipsa kombiniranih naprezanja te su vidljivi svi minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti.



Slika 5-11. Prikaz elipse naprezanja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm

Maksimalno opterećenje unutarnjim tlakom javlja se kod ispitivanja hermetičnosti niza zaštitnih cijevi. Odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 2,55 na dubini od 1 000 m.

Maksimalno opterećenje vanjskim tlakom javlja se kod cementacije. Rezultati proračuna prikazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 5,06 na dubini od 1 000 m.

Maksimalno opterećenje uzdužnim silama javlja se kod ugradnje niza zaštitnih cijevi. Rezultati proračuna pokazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 4,31 na ušću bušotine.

Odabrane zaštitne cijevi promjera 244,5 mm zadovoljavaju uvjete kombiniranih naprezanja uz postignuti najmanji koeficijent sigurnosti od 3,13 (ispitivanje hermetičnosti zaštitnih cijevi) na dubini od 1 000 m.

Na temelju svih prikazanih podataka može se zaključiti da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete.

5.2.2. *Proračun odnosa naprezanja i čvrstoće zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm (proizvodni (eksploatacijski) niz zaštitnih cijevi)*

U tablici 5-15 dani su ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm.

Tablica 5-15. Ulazni podaci za proračun naprezanja zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm

	Jedinica	Vrijednost
Dubina	m	1 850
Gustoća isplake tijekom ugradnje zaštitnih cijevi	kg/l	1,20
Gustoća cementne kaše	kg/l	1,50 / 1,90
Tlak ispitivanja hermetičnosti	MPa	22
Tlak tijekom stimulacijskih radova	MPa	31
*Gradijent pornog tlaka (geološki profil)	bar/10 m	1,08
*Gradijent tlaka frakturiranja (geološki profil)	bar/10 m	1,70
*Temperatura u bušotini na dnu zaštitnih cijevi	°C	107

*odnosi se na područje ispod pete zaštitnih cijevi

U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi uslijed unutarnjeg tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- ispitivanje hermetičnosti niza zaštitnih cijevi s gustoćom fluida 1,2 kg/l,
- propuštanje uzlaznih cijevi i
- propuštanje tijekom stimulacijskih radova.

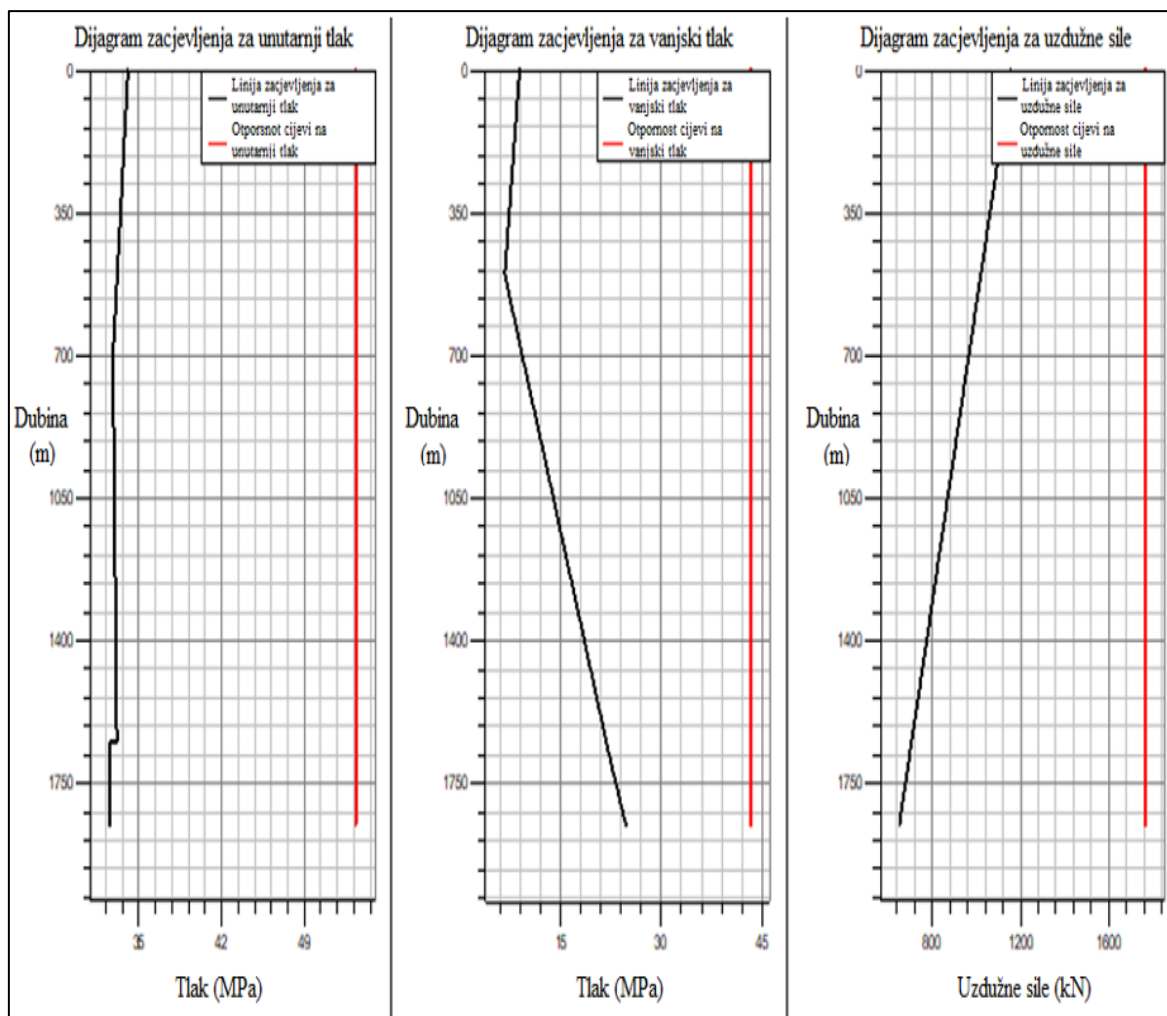
U proračunu rezultante naprezanja zaštitnih cijevi uslijed vanjskog tlaka razmatrani su sljedeći uvjeti:

- cementacija,
- potpuno pražnjenje zaštitnih cijevi,
- migracija plina i
- razlika u gustoći fluida iznad i ispod pakera (proizvodni uvjeti).

U proračunu rezultante uzdužnih naprezanja zaštitnih cijevi razmatrani su sljedeći uvjeti:

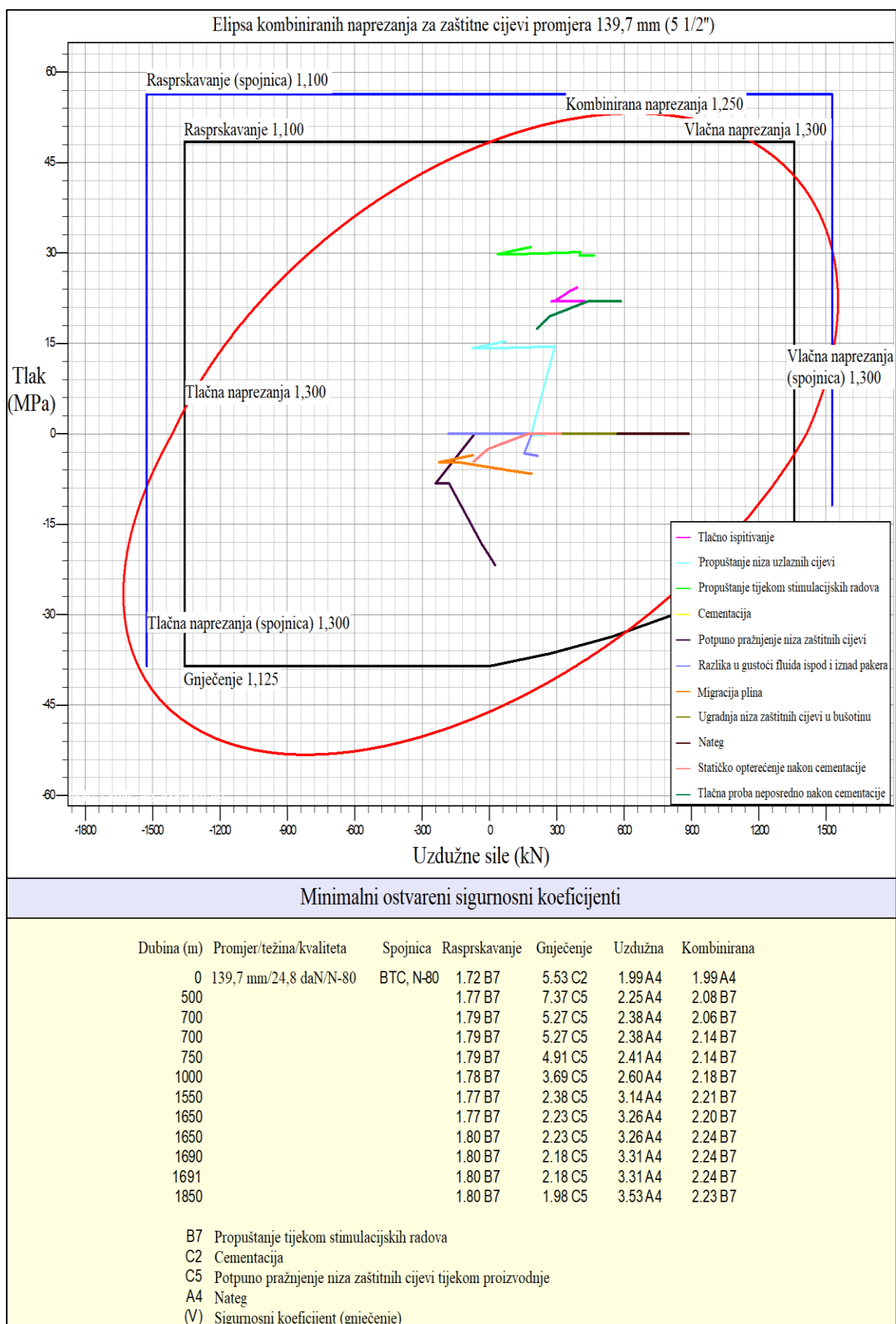
- ugradnja niza zaštitnih cijevi brzinom od 1 m/s,
- nateg 500 kN,
- ispitivanje hermetičnosti zaštitnih cijevi prije stvrdnjavanja cementne kaše s gustoćom fluida 1,2 kg/l i
- statičko opterećenje nakon cementacije.

Na Slici 5-12 prikazan je odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm za uvjete opterećenja unutarnjim tlakom, vanjskim tlakom te opterećenja uslijed djelovanja uzdužne sile.



Slika 5-12. Odnos naprezanja i čvrstoće niza zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm s obzirom na unutarnji i vanjski tlak te uzdužnu silu

Na Slici 5-13 prikazana je elipsa kombiniranih naprezanja te su vidljivi svi minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti.



Slika 5-13. Prikaz elipse naprezanja i minimalnih ostvarenih koeficijenata sigurnosti za niz zaštitnih cijevi promjera 139,7 mm

Maksimalno opterećenje unutarnjim tlakom javlja se kod propuštanja tijekom stimulacijskih radova. Odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 1,72 na ušću bušotine.

Maksimalno opterećenje vanjskim tlakom javlja se kod potpunog pražnjenja zaštitnih cijevi. Rezultati proračuna prikazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 1,98 na dubini od 1 000 m.

Maksimalno opterećenje uzdužnim silama javlja se kod ostvarivanja natega na niz zaštitnih cijevi. Rezultati proračuna pokazuju da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju postavljene uvjete uz najmanji postignuti koeficijent sigurnosti 1,99 na ušću bušotine.

Odabrane zaštitne cijevi promjera 139,7 mm zadovoljavaju uvjete kombiniranih naprezanja uz postignuti najmanji koeficijent sigurnosti od 1,99 (nateg niza zaštitnih cijevi) na ušću bušotine.

Na temelju svih prikazanih podataka može se zaključiti da odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju sve postavljene uvjete

Izračunati minimalni postignuti koeficijenti sigurnosti prikazani su u tablici 5-16. Sve odabrane zaštitne cijevi zadovoljavaju kriterije, odnosno minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti veći su od dozvoljenih.

Tablica 5-16. Minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti

Zaštitne cijevi	Minimalni ostvareni sigurnosni koeficijenti			
	Unutarnji tlak	Vanjski tlak	Uzdužno naprezanje	Kombinirano naprezanje
Uvodni niz zaštitnih cijevi 244,5 mm (9 5/8 in.)	2,55	5,06	4,31	3,13
Proizvodni niz zaštitnih cijevi 139,7 mm (5 1/2 in.)	1,72	1,98	1,99	1,99

6. USPOREDBA DVAJU KONSTRUKCIJA BUŠOTINA

Kao što je vidljivo iz prethodna dva poglavlja, obje konstrukcije bušotine, odnosno samog zacjevljenja bušotine zadovoljavaju kriterije potrebne za ugradnju. Stoga, za završni projekt izrade bušotine odabrana je druga, odnosno optimizirana konstrukcija s dva niza zaštitnih cijevi. U daljnjem tekstu, prikazana je generalna usporedba dviju konstrukcija kroz usporedbu troška nabavke bitnih materijala i servisa te vremena trajanja svih operacija. Navedene analize napravljene su prema troškovnicima i normativima kompanija INA d.d. kao operatera te CROSCO d.d. te STSI d.d. kao tvrtke izvođača radova koje se angažiraju prilikom izrade i opremanja bušotina za kompaniju INA d.d. na području Republike Hrvatske.

6.1. Predviđeno vrijeme trajanja bušaćih operacija

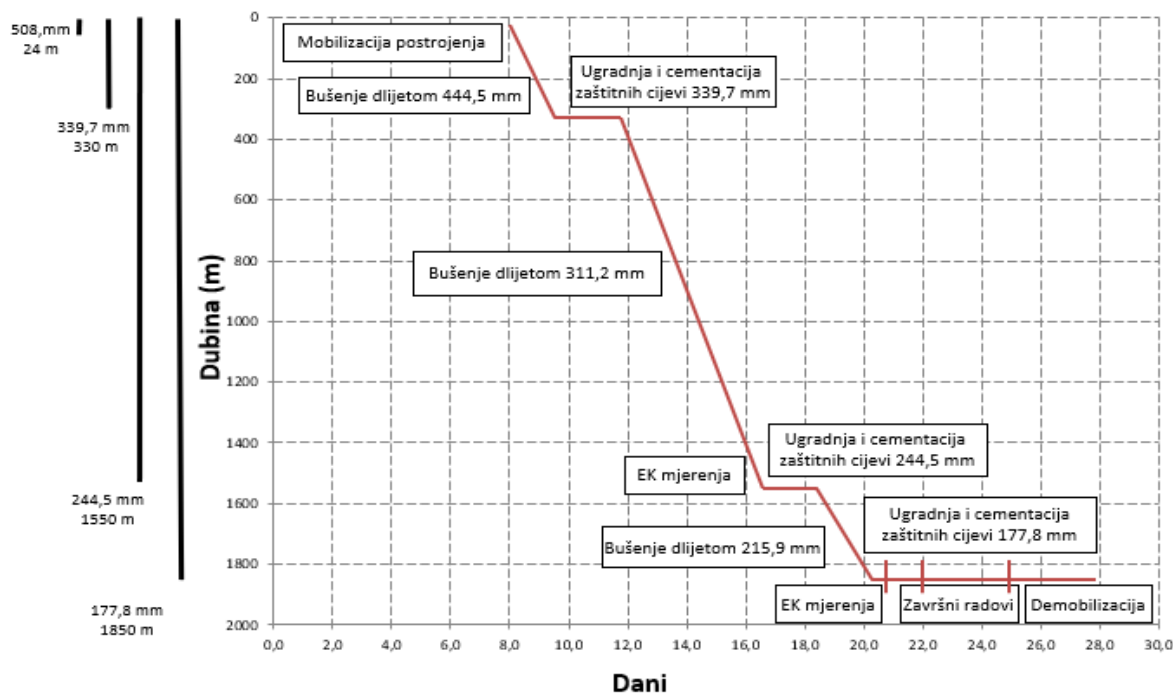
U tablicama 6-1 i 6-2 prikazani su vremenski planovi izrade bušotine s planiranom (tablica 6-1) i optimiziranom (tablica 6-2) konstrukcijom. Mobilizacija bušaćeg postrojenja jednaka je za obje konstrukcije zbog istog tipa postrojenja. Dodatne dvije faze radova: bušenje kanala bušotine dlijetom promjera 444,5 mm (17 ½ in.) i ugradnja i cementacija zaštitnih cijevi promjera 339,7 mm (13 3/8 in.) planirane su u trajanju od 3,79 dana (91 sat) čime povećavaju ukupni vremenski period izrade bušotine prema početnoj konstrukciji.

Bušenje dlijetom promjera 311,2 mm (12 ¼ in.) sekcije kanala od 330 do 1 550 m, ukupne duljine 1 220 m, prosječnom brzinom bušenja (engl. *Rate of Penetration, ROP*) od 17,5 m/h trajat će 4,77 dana (115 sati), dok će se u optimiziranoj konstrukciji navedena sekcija duljine 940 m izbušiti u 3,94 dana (95 sati), s istom brzinom bušenja. Karotažna mjerenja u otvorenom kanalu i ugradnja zaštitnih cijevi promjera 244,5 mm (9 5/8 in.) traju duže kod originalne konstrukcije zbog dulje sekcije otvorenog kanala.

Bušenje kanala dlijetom promjera 215,9 mm (8 ½ in.) kraće je u početno planiranoj konstrukciji zbog kraće sekcije kanala (razlika od 550 m) koju je potrebno izbušiti, što istovremeno znači da će karotažna mjerenja u optimiziranoj konstrukciji trajati dulje zbog dulje sekcije otvorenog kanala. Ugradnja i cementacija proizvodnog niza zaštitnih cijevi jednaka je za obje konstrukcije. Također, završni radovi u bušotini i na lokaciji te demobilizacija bušaćeg postrojenja jednaki su za obje konstrukcije. Optimizacijom konstrukcije bušotine dovelo se do uštede od čitava 2 dana. Odnos tijeka izrade bušotine s dubinom grafički su prikazani na Slikama 6-1 (za početnu konstrukciju) i 6-2 (za optimiziranu konstrukciju).

Tablica 6-1. Prikaz vremenskog plana izrade bušotine X s početno planiranom konstrukcijom bušotine

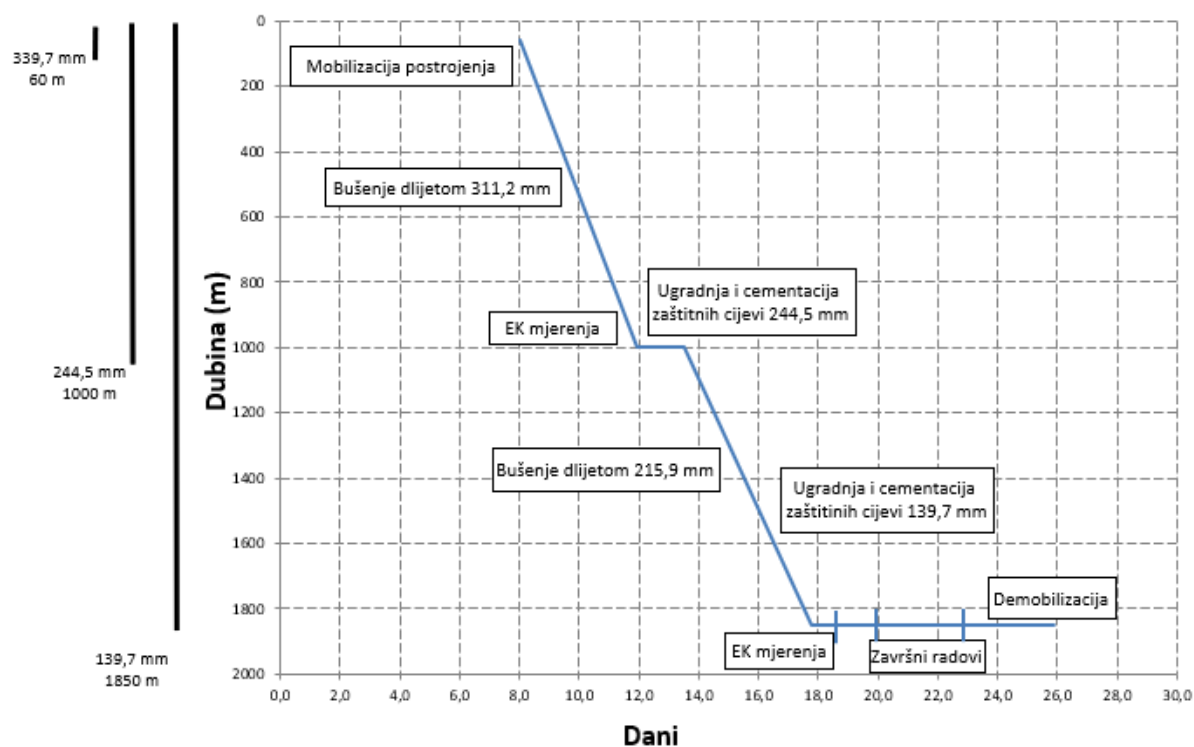
Br.	Faza radova	Dubina (m)	Trajanje pojedine operacije (dani)	Ukupno vrijeme izrade bušotine (dani)
1	Mobilizacija	24	8,00	8,0
2	Bušenje dlijetom 444,5 mm (17 ½ in.)	330	1,54	9,5
3	Ugradnja i cementacija zaštitnih cijevi 339,7 mm (13 3/8 in.)	330	2,25	11,8
4	Bušenje dlijetom 311,2 mm (12 ¼ in.)	1550	4,77	16,6
5	Karotažna mjerenja	1550	0,42	17,0
6	Ugradnja i cementacija zaštitnih cijevi 244,5 mm (9 5/8 in.)	1550	1,44	18,4
7	Bušenje dlijetom 215,9 mm (8 ½ in.)	1850	1,85	20,3
8	Karotažna mjerenja	1850	0,50	20,8
9	Ugradnja i cementacija zaštitnih cijevi 177,8 mm (7 in.)	1850	1,21	22,0
10	Završni radovi	1850	2,90	24,9
11	Demobilizacija	1850	3,00	27,9



Slika 6-1. Grafički prikaz vremenskog plana izrade bušotine X s planiranom konstrukcijom bušotine

Tablica 6-2. Prikaz vremenskog plana izrade bušotine X s optimiziranom konstrukcijom bušotine

Br.	Faza radova	Dubina (m)	Trajanje pojedine operacije (dani)	Ukupno vrijeme izrade bušotine (dani)
1	Mobilizacija	60	8,00	8,0
2	Bušenje dlijetom 311,2 mm (12 ¼ in.)	1000	3,94	11,9
3	Karotažna mjerenja	1000	0,33	12,3
4	Ugradnja i cementacija zaštitnih cijevi 244,5 mm (9 5/8 in.)	1000	1,25	13,5
5	Bušenje dlijetom 215,9 mm (8 ½ in.)	1850	4,23	17,8
6	Karotažna mjerenja	1850	1,00	18,8
7	Ugradnja i cementacija zaštitnih cijevi 139,7 mm (5 ½ in.)	1850	1,21	20,0
8	Završni radovi	1850	2,90	22,9
9	Demobilizacija	1850	3,00	25,9



Slika 6-2. Grafički prikaz vremenskog plana izrade bušotine X s optimiziranom konstrukcijom bušotine

6.2. Planirani troškovi izrade bušotine X

Može se odmah zaključiti kako je planirana ukupna potrošnja cijevnog alata, materijala i korištenja servisa veća kod prvotno planirane konstrukcije bušotine jer je potrebno izbušiti i ugraditi tehnički niz zaštitnih cijevi. U prvoj konstrukciji bušotine, kako je potrebno izbušiti uvodni i tehnički niz većeg promjera i većih dubina, koristi se dodatno dlijeto promjera 444,5 mm (17 ½ in.) te ukupni trošak svih dlijeta povećan je za 44%. Duljina ugrađenih zaštitnih cijevi, zbrajajući nizove od 508,0 mm (20 in.), 339,7 mm (13 3/8 in.) i 244,5 mm (9 5/8 in.), veća je za 844 m, što zajedno s opremom zaštitnih cijevi za ugradnju i cementiranje predstavlja povećanje troškova od 79%. Trošak koji otpada na materijale za pripremu isplake povećan je za 19%. Ukupna potrošnja materijala kod prve konstrukcije bušotine veća je za 40% u odnosu na optimiziranu konstrukciju.

Zbog bušenja dodatne sekcije kanala od strane kompanije CROSCO d.d., dolazi do povećanja troškova dnevnog najma bušačkog postrojenja, što čini jedan od značajnijih troškova prilikom izrade bušotine. Ukupni dnevni najam bušačkog postrojenja povećan je za 12%, a trošak za pripremu cementne kaše i njeno protiskivanje povećan je za 53%. Troškovi karotažnih mjerenja veći su za 5% u optimiziranoj konstrukciji, a najam udarača potrebnog tijekom procesa bušenja planirane konstrukcije povećan je za 39 %. Ukupni trošak CROSCO servisa veći je za 14% u odnosu na optimiziranu konstrukciju.

Servisi STSI-a, koji uključuju transport bušačkog postrojenja i materijala, opskrbu pitkom i tehničkom vodom te odlaganje i zbrinjavanje otpada veći su za 8% u početno planiranoj konstrukciji u odnosu na optimiziranu. Razlog povećanja je veća količina isporučene vode (12%) na lokaciju koja je neophodna za tehnološki proces izrade bušotine.

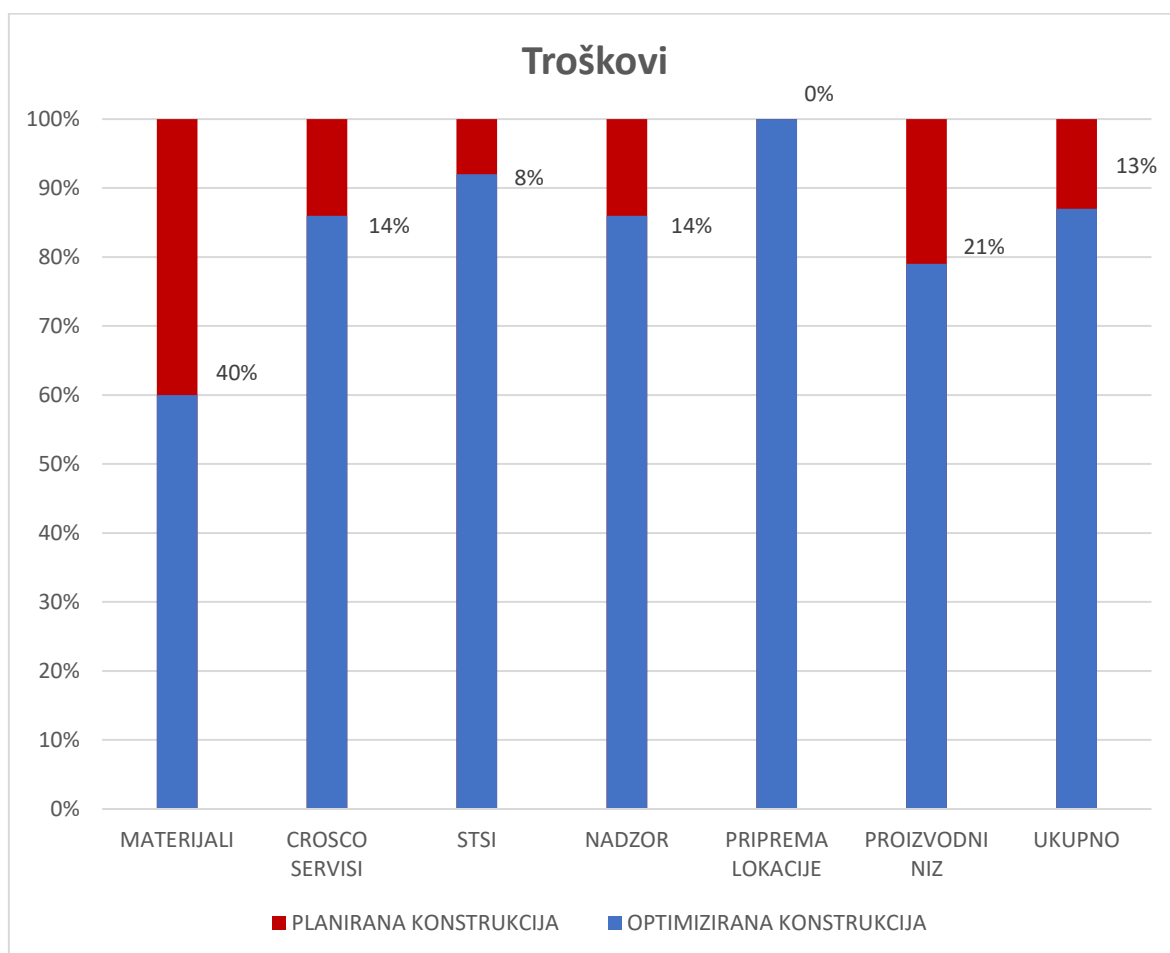
Geološki nadzor povećan je za 45%, nadzor bušenja za 16% te laboratorij za nadzor bušenja za 13%. Ukupno povećanje navedenih servisa nadzora veće je za 14% u odnosu na optimiziranu konstrukciju bušotine.

Trošak pripreme lokacije za obje konstrukcije bušotine je vrlo sličan, razlika je samo u troškovima za instalaciju konduktor cijevi (razlika dubine ugradnje konduktorskih cijevi između dviju razmatranih konstrukcija iznosi 36 m).

Navedeni troškovi vezani su uz izradu bušotine prije ugradnje proizvodnog niza zaštitnih cijevi i završnih radova. Odluka o ugradnji navedenog niza donosi se nakon karotažnih mjerenja u otvorenom kanalu bušotine na dubinama potencijalnih ležišta. U obje

konstrukcije bušotine duljina zaštitnih cijevi i uzlaznog niza je jednaka (1 850 m), no dolazi do povećanja troškova cementiranja za 9% u optimiziranoj konstrukciji zbog manjeg promjera proizvodnog niza (139,7 mm, 5 ½ in.), čime se povećava volumen prstenastog prostora između proizvodnog i prethodno ugrađenog niza. S druge strane, u planiranoj konstrukciji bušotine u planu je ugradnja niza veće kvalitete čelika što povećava troškove materijala za 42% te su tada ukupni troškovi vezani uz njihovu ugradnju i cementaciju te ostale servise veći za 21%. Cijena završnih radova u bušotini i na lokaciji jednaka je za obje konstrukcije.

Kada se sagledaju i usporede svi planirani troškovi za izradu navedene istražne bušotine, dolazi se do zaključka kako se optimiziranom konstrukcijom bušotine X uvelike ostvaruju financijske uštede, što je prikazano na Slici 6-3. Govoreći u brojkama, optimizirana konstrukcija bušotine i njena izrada jeftinija je za 13% u odnosu na planiranu konstrukciju.



Slika 6-3. Usporedba planiranih troškova prvotno planirane i optimizirane konstrukcije

7. ZAKLJUČAK

Posljednjih je godina u naftnoj industriji prisutan trend izrada kompleksnijih i dubljih bušotina u cilju dosezanja neotkrivenih naslaga s akumuliranim ugljikovodicima (i geotermalnim vodama) na već istraženim područjima. Kako bi se navedeni ciljevi mogli ispuniti, procesi projektiranja bušotina te njihova izrada zahtijevaju neprekidna poboljšanja. Projektiranje i izrada bušotine moraju biti izvedeni na siguran način uz minimalne financijske troškove.

Jedan od glavnih dijelova projektiranja bušotine je projektiranje zacjevljenja, odnosno odabir duljina, promjera te dubina smještanja dna nizova zaštitnih cijevi odgovarajućih mehaničkih svojstava kako bi bile funkcionalne. Odabrane zaštitne cijevi moraju izdržati sva naprezanja tijekom cijelog radnog vijeka bušotine te se pri njihovom odabiru proračunavaju naprezanja uslijed djelovanja unutarnjeg i vanjskog tlaka te uzdužna i kombinirana naprezanja. Za izradu programa zacjevljenja bušotine, potrebno je imati informacije o svojstvima ležišta, lokaciji i trajektoriji bušotine, minimalnim potrebnim promjerima te karakteristikama buduće eksploatacije ležišnih fluida. Koncept najvećeg očekivanog opterećenja predstavlja naširoko korišten koncept dizajniranja zacjevljenja, koji se uz pomoć softverskih paketa, koristi pri dizajniranju zacjevljenja. Izazov je projektantskih službi izraditi takvu konstrukciju bušotine koja će zadovoljavati sve uvjete u bušotini, a da pritom bude sastavljena od optimalnog broja nizova zaštitnih cijevi odgovarajućih kvaliteta čelika. Stoga, kada to uvjeti dopuštaju, potrebno je optimizirati konstrukciju bušotine kako bi se vremenska izrada bušotine te planirani troškovi značajno smanjili.

U radu su obrađeni uzroci promjene konstrukcije bušotine te su izrađene dvije konstrukcije istražne bušotine X na polju Y, prvotno planirana konstrukcija s tri niza zaštitnih cijevi i optimizirana konstrukcija s dva niza, gdje je eliminiran tehnički niz zaštitnih cijevi. Obje navedene konstrukcije zadovoljavaju naprezanja kojima su izložene. Uspoređujući vremenske planove izrade navedenih bušotina, u optimiziranoj konstrukciji vrijeme trajanja je skraćeno za dva dana. S financijske strane, u optimiziranoj konstrukciji ukupni troškovi su smanjeni za čak 13%.

Dakako, da su se u prvotno planiranoj i optimiziranoj konstrukciji koristile zaštitne cijevi koje zadovoljavaju sve kriterije, a da su nižih kvaliteta čelika (i jeftinije), ušteda na konstrukcijama zacjevljenja bila bi veća u oba slučaja. Isto tako, upotreba kombiniranog niza cijevi dovela bi do boljeg optimiranja zacjevljenja te dodatnog smanjenja ukupnih troškova

zacjevljenja. No, kao što je navedeno u radu, dostupnost zaštitnih cijevi jedan je od mogućih razloga zašto konstrukcija zacjevljenja može odstupati od optimalne izvedbe.

Navedene vremenske i financijske uštede rezultat su promjene uobičajenih praksi pri projektiranju bušotina. Saznanja stečena nakon izrade ovakve bušotine trebala bi se primijeniti i na ostalim bušaćim projektima kompanije INA d.d. kako bi kapitalna ulaganja imala što brži povrat investicije u slučaju pronalaska komercijalnih količina ugljikovodika (i geotermalnih voda).

8. IZVORI

1. AADNØY, B. S. 2010. Modern Well Design. Stavanger: CRC press.
2. ADAMS, N. J., CHARRIER, T.M. 1985. Drilling Engineering: A Complete Well Planning Approach. Tulsa: Pennwell Corporation.
3. API Specification 5CT, 3rd Edition, November 1992. Specification for Casing and Tubing, API Production Department.
4. API Specification 5CT, 8th Edition, July 2005. Specification for Casing and Tubing, API Production Department.
5. BORZATTI, J., BORIĆ, D., MIKUŠ, B., PAVIĆ, V. 1989. Doprinos metodici zacjevljenja bušotina. Zagreb: INA-Naftaplin.
6. BOURGOYNE, A. T., MILLHEIM, K.K., CHENEVERT, M.E., YOUNG, F.S. 1986. Applied Drilling Engineering. Richardson: SPE Textbook Series, 2.
7. CROSCO d.d. – Tehnički izvještaj nakon obavljenih radova: Žu-122, 2008.
8. GAURINA-MEĐIMUREC, N. 2020. Predavanja iz kolegija Bušenje 2, ak.god. 2020./21. Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.
9. HALAL, A. S., WARLING, D. J., WAGNER, R. R. 1996. Minimum Cost Casing Design. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro.
10. INA d.d. – Tehnička dokumentacija, 2022.
11. KRIŠTAFOR, Z. 2009. Projektiranje zacjevljenja: skripta. Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.
12. KRIŠTAFOR, Z. 2018. Predavanja iz kolegija Bušenje 1, ak. god. 2018./19. Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.
13. LYONS, W. C. 2010. Working Guide To Drilling Equipment And Operations. Oxford: Gulf Professional Publishing.
14. MATANOVIĆ, D. 2007. Tehnika izrade bušotina: priručnik s primjerima. Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.
15. MITCHELL, R.F. 2006. Petroleum Engineering Handbook: Volume II – Drilling Engineering. Richardson: Society of Petroleum Engineers.
16. MOORE, P.L., COLE, F.W. 1965. Drilling Operations Manual. Tulsa: The Petroleum Publishing Co.
17. NARODNE NOVINE br. 52/18, 52/19 i 30/21 Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika. Zagreb: Narodne novine d.d.

18. PAŠIĆ, B. 2018. Predavanja iz kolegija Opremanje i održavanje bušotina 1, ak. god. 2018./19. Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.
19. PAŠIĆ, B. 2020. Predavanja iz kolegija Tehnika izrade bušotina 2, ak. god. 2020./21. Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.
20. PERIĆ, M. 2007. Englesko-hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina, Zagreb.
21. PRENTICE, C. M. 1970. " Maximum Load" Casing Design. Journal of Petroleum Technology, 22(07), str. 805-811.
22. RABIA, H. 2002. Well Engineering and Construction. London: Entrac Consulting Limited.
23. RAHMAN, S.S., CHILINGARIAN, G.V. 1995. Casing Design – Theory and Practice, Developments in Petroleum Science. Amsterdam: Elsevier
24. ROJAS MIKHEEVA, M. A. 2017. Dual-Gradient Drilling: The Future Of Offshore Drilling. Studija. Russia International Perforating Symposium, Gubkin University, Moscow.
25. SANTOS, O., ADASANI, I., AZAR, J. J., ESCORIHUELA, F. 1995. Determination of Casing Setting Depth Using Kick Tolerance Concept, Petroleum Computer Conference. OnePetro. Houston.
26. SHOKRY, A., ELGIBALY, A. 2021. Well design optimization through the elimination of intermediate casing string. Suez University, Egypt: Badr El-din Petroleum Company and Faculty of Petroleum and Mining Engineering,

INTERNET IZVORI

27. HALLIBURTON. 2015. *Managing Well Casing*
URL: (<https://www.landmark.solutions/Portals/0/LMSDocs/Whitepapers/Managing-Well-Casing.pdf>) (31.1.2023.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod naslovom „Optimizacija konstrukcije bušotine uklanjanjem tehničkog niza zaštitnih cijevi“ izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom, uz stručno vodstvo mentora prof. dr. sc. Borivoja Pašića i komentora dr.sc. Petra Mijića.

Ovaj diplomski rad je izrađen u okviru projekta „RGN START – STručnA pRaksa za živoT“ (UP.03.1.1.04).



Ante Radišić



KLASA: 602-01/22-01/212
URBROJ: 251-70-12-22-2
U Zagrebu, 9.2.2023.

Ante Radišić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/212, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 16.11.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

OPTIMIZACIJA KONSTRUKCIJE BUŠOTINE UKLANJANJEM TEHNIČKOG NIZA ZAŠTITNIH CIJEVI

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentora dr. sc. Petar Mijić.

Mentor:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

(potpis)

dr. sc. Petar Mijić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)