

# Primjena kolone zaštitnih cijevi u procesu bušenja

---

Krznarić, Tin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:432955>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-31**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO GEOLOŠKO NAFTNI FAKULTET  
Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**PRIMJENA KOLONE ZAŠTITNIH CIJEVI U PROCESU  
BUŠENJA**

Završni rad

Tin Krznarić  
N4233

Zagreb, 2020.

## **PRIMJENA KOLONE ZAŠTITNIH CIJEVI U PROCESU BUŠENJA**

**Tin Krznarić**

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

### **Sažetak**

Naftna industrija uvijek je težila smanjenju troškova izrade bušotina. Upotreba zaštitnih cijevi umjesto konvencionalnog niza bušaćeg alata, iako razmatrana ranije, u komercijalnu primjenu ulazi tek 1990-ih godina. Iako donosi ekonomsku prednost u izradi bušotina, također smanjuje i neproduktivno vrijeme rada bušaćeg postrojenja u vidu vremena izgubljenog za manevar konvencionalnim nizom alata. Širom primjenom usmjerenog bušenja također se razvila primjena upotrebe zaštitnih cijevi za bušenje u usmjerenim kanalima bušotina. Osim načina korištenja zaštitnih cijevi za bušenje i njihovo najbolje područje primjene u radu su opisani i nedostaci ove metode, kao i primjeri iz prakse.

Ključne riječi: bušenje, zaštitne cijevi, usmjereno bušenje, konvencionalni niz alata, isplaka, otpori protjecanju, efektivno vrijeme bušenja.

Završni rad sadrži: 32 stranice, 18 slika i 19 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor, RGNF-a

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

Datum obrane:

<b>SADRŽAJ.....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS ENGLLESKIH KRATICA.....</b>	<b>IV</b>

## **SADRŽAJ**

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. PROCES BUŠENJA UZ PRIMJENU ZAŠTITNIH CIJEVI.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Sustavi pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi.....</b>	<b>4</b>
2.1.1. Sustavi s neizvlačivim sklopom krutog alata.....	4
2.1.2. Sustavi s izvlačivim sklopom krutog alata.....	6
<b>2.2. Oprema pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi.....</b>	<b>7</b>
2.2.1. Oprema kod neizvlačivih sustava.....	7
2.2.2. Oprema kod izvlačivih sustava.....	10
<b>2.3. Bušaće postrojenje.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4. Problemi pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi.....</b>	<b>13</b>
2.4.1. Izvijanje.....	13
2.4.2. Zamor materijala.....	14
2.4.3. Otpori protjecanju.....	15
<b>3. USMJERENO BUŠENJE UZ PRIMJENU ZAŠTITNIH CIJEVI.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Oprema kod usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi.....</b>	<b>16</b>
3.1.1. Upravljivi sustavi.....	18
<b>3.2. Proces usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3. Izbor bušotine za primjenu usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4. Bušenje bušotina velikog dosega uz primjenu zaštitnih cijevi.....</b>	<b>22</b>
<b>4. BUŠENJE UZ PRIMJENU ZAŠTITNIM CIJEVI U PRAKSI.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1. Upotreba zaštitnih cijevi za bušenje u dolini Nila u Egiptu.....</b>	<b>23</b>
4.1.1. Nestabilne formacije i izazovi pri bušenju konvencionalnim alatom.....	23
4.1.2. Predstavljanje i pokušaj bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi.....	24
4.1.3. Sužavanje kanala bušotine.....	25
<b>4.2. Usmjereni bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi u Timan-pečorskoj regiji u Rusiji.....</b>	<b>26</b>
4.2.1. Oprema korištena pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi....	26

4.2.2. Rezultati testnih bušotina.....	28
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>29</b>
<b>6. LITERATURA.....</b>	<b>30</b>

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Sustavi za bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi.....	4
<b>Slika 2-2.</b> Mjerenje pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi kod neizvlačivog sustava alata na dnu.....	5
<b>Slika 2-3.</b> Sustav s izvlačivim sklopom alata na dnu.....	6
<b>Slika 2-4.</b> Bušivo dlijeto namijenjeno bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi.....	7
<b>Slika 2-5.</b> Proces prenamjene bušaće pete u cementacijsku.....	8
<b>Slika 2-6.</b> Centralizeri pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi.....	8
<b>Slika 2-7.</b> Čepljenje mikrofraktura i zaglađivanje isplačnog obloga efektom oblaganja.....	9
<b>Slika 2-8.</b> Sklop za zabavljanje.....	10
<b>Slika 2-9.</b> Aktivacija proširivača.....	11
<b>Slika 2-10.</b> (a) Izvedba sklopa za unutrašnje i vanjsko hvatanje zaštitnih cijevi, (b) bušaće postrojenje.....	12
<b>Slika 2-11.</b> Prikaz izvijanja cijevi kao krivulje ovisno o opterećenju na dlijeto.....	14
<b>Slika 3-1.</b> Sklop alata na dnu pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi.....	17
<b>Slika 3-2.</b> Halliburton upravljivi sustav za usmjereno bušenje.....	18
<b>Slika 3-3.</b> Postupni prikaz spuštanja i izvlačenja izvlačivog sustava alata s dna pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevima.....	20
<b>Slika 4-1.</b> Grafički prikaz dana potrebnih za bušenje pojedinih bušotina koristeći različite metode na jednom polju sjeverno od Nila.....	25
<b>Slika 4-2.</b> Usporedba primijenjenih motora na dvije testne bušotine.....	27
<b>Slika 4-3.</b> Sklop alata na dnu pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi testnih bušotina na polju u Labaganskoe.....	28
<b>Slika 4-4.</b> Usporedba neproduktivnog vremena dobivenog konvencionalnim načinom bušenja u odnosu na bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi.....	28

## POPIS ENGLESKIH KRATICA

API (engl. *American Petroleum Institute*) – Američki institut za naftu

BHA (engl. *Bottom Hole Assembly*) – sklop krutog alata

CDS (engl. *Casing Drive System*) – sklop za hvatanje zaštitnih cijevi

CWD (engl. *Casing While Drilling*) – bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi

DCWD (engl. *Directional Casing While Drilling*) – usmjereno bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi

DLA (engl. *Drill Lock Assembly*) – sklop za zabavljanje

ECD (engl. *Equivalent Circulating Density*) – ekvivalentna gustoća isplake

MD (engl. *Measured Depth*) – ukupna dubina

NPT (engl. *Non-Productive Time*) – neproduktivno vrijeme

PDC (engl. *Polycrystalline Diamond Compact*) – polikristalinski dijamanti

PDM (engl. *Positive Displacement Motor*) – dubinski volumetrijski motor

RPM (engl. *Revolutions Per Minute*) – okretaji u minuti

RSS (engl. *Rotary Steerable System*) – rotacijski upravljivi sustav

SMWW (engl. *Safe Mud-Weight Window*) – siguran raspon ekvivalentne gustoće isplake

# 1. UVOD

Standardna praksa kod izgradnje bušotina je da se nakon bušenja konvencionalnim alatom, u otvoreni kanal bušotine ugrade zaštitne cijevi. Zaštitne cijevi (engl. casing) su neizostavan dio izgradnje bušotine kao rudarskog objekta. Kvalitetno zacjevljenje otvorenih intervala u bušotini ključan je preduvjet u realizaciji projekta bušotine. Između ostalih funkcija najbitnija je odjeljivanje područja različitih hidrodinamičkih karakteristika i sprečavanje komunikacije između ranije izbušenih intervala te premošćivanje kritičnih mjesta u bušotini (Krištafor, 2005).

Razvojem naftne industrije uvijek se težilo napretku tehnologije koja se koristi kod različitih bušaćih operacija. To se postizalo ili napretkom tehnologije, ili kroz unapređenje pristupa pojedinom projektu.

Napretkom tehnologije i drugačijim pristupom izradi bušotina pojavila se tehnologija izrade bušotina pomoću zaštitnih cijevi. Upotreba zaštitnih cijevi za opterećenje na dlijeto pojavila se u ozbiljnoj upotrebi 1960-ih godina, iako su, prema nekim izvorima, Rusi već ranije primijenili izvlačivo dlijeto s opremom na žici pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi. Ova metoda zbog lošeg napretka u odnosu na bušaću kolonu standardnog alata nije zaživjela sve do početka 1990-ih godina kada ulazi u komercijalnu primjenu (Patel et al., 2018).

Primjena kolone zaštitnih cijevi pri bušenju (engl. *Casing While Drilling - CWD*), uvelike je unaprijedila izradu bušotina u gotovo svim aspektima bušenja. Korištenje težine zaštitnih cijevi kao opterećenje na dlijeto uspješno je primijenjeno u mnogim državama i na različitim naftnim poljima. Velika beneficija ove metode nedvojbeno je izostanak vremena manevra konvencionalnim alatom (engl. *trip time*), u svrhu pripreme za cementiranje otvorenog kanala bušotine. Osim manevra nizom alata problemi koji često nastaju pri bušenju konvencionalnim nizom alatki su nestabilnost kanala i gubljenje isplake. Uštede koje nastaju eliminacijom takvih slučajeva primjenom zaštitnih cijevi u procesu bušenja puno su značajnije (Gaurina-Međimurec, 2005).

Današnja tehnologija kojom se ostvaruje bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi u standardnoj praksi primjenjuje izvlačivi sustav, iako se u nekim slučajevima pri bušenju koristi bušiva neizvlačiva peta kolone zaštitnih cijevi kroz koju se utiskuje cement nakon bušenja do željene dubine i ona se takva ostavlja u bušotini (Kerunwa i Anyadiegwu, 2015). Ova metoda koristi se većinom na odobalnim postrojenjima pri bušenju dubokog podmorja gdje je potrebno brzo i učinkovito premostiti problematične zone. Neki od



ostalnih čestih problema koji se javljaju pri standardnoj izradi bušotina kao npr. prestanak cirkulacije, bubrenje stijena, stvaranje podtlaka i/ili nadtlaka, rješavaju se primjenom zaštitnih cijevi umjesto bušačkog alata (Kerunwa i Anyadiegwu 2015).

Ova relativno mlada metoda našla je svoju primjenu širom svijeta, te će se u ovom radu opisati način korištenja spomenute metode, sagledati aspekti utjecaja na proces bušenja, predložiti je na primjerima iz prakse i usporediti ju s primjenom konvencionalnog niza alatki.

## 2. PROCES BUŠENJA UZ PRIMJENU ZAŠTITNIH CIJEVI

Prvi patent i pokušaj bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi dogodio se davne 1890-te godine, netom nakon izuma rotacijskog načina bušenja što ukazuje da se već tada očitovala spoznaja o uštedi vremena i novca koja proizlazi spajanjem dvije operacije u jednu.

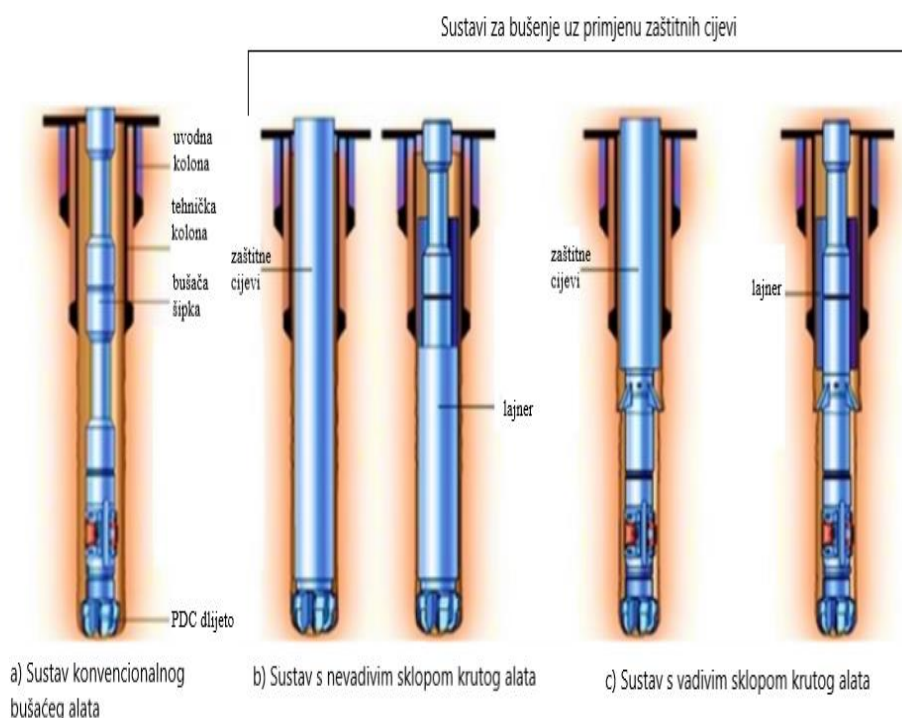
Nakon još nekoliko neuspjelih pokušaja tijekom prve polovice 20-tog stoljeća, kompanija Brown Oil Tools Company je 1960. godine pokušala s prvim značajnijim modelom koji je uključivao vršni pogon i standardnu opremu koja se koristila kod ugradnje zaštitnih cijevi kao što su centralizeri i proširivač, čak i sklop krutog alata kojeg je bilo moguće izvući na površinu opremom na žici. Iako ovakav model nije uspio ući u opću upotrebu zbog nestandardiziranosti opreme, potaknuo je razvoj vršnog pogona (engl. *top drive*) kao novog sustava rotacije konvencionalnog alata (Kerunwa i Anyadiegwu, 2015).

Krajem 20. stoljeća na tržište je izašla opće prihvaćena i na kraju standardizirana metoda izrade bušotina primjenom zaštitnih cijevi koja se koristi i danas. Kompanija Tesco koja je prva razvila ovu metodu, komercijalno je upotrijebila zaštitne cijevi standardnih dimenzija koje se ni na koji način ne razlikuju od onih koje se ugrađuju nakon bušenja konvencionalnim alatima. Izgleda da je upravo takav pristup bio potreban da se ovakav način bušenja primjeni u bušotinama širom svijeta (Kerunwa i Anyadiegwu, 2015).

Iako naizgled očita prednost bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi ukidanjem jednog dijela bušaćeg procesa zapravo nije jedina, nije čak ni najvažnija kada se u obzir uzmu svi problemi koji se tijekom bušenja mogu pojaviti korištenjem konvencionalnog alata. Zaštitne cijevi pokazuju manju sklonost otklonu kanala bušotine od vertikale što može biti značajna prednost u odnosu na konvencionalni niz alata. Uz evidentne prednosti, izrada bušotine uz primjenu zaštitnih cijevi ima i određene nedostatke o čemu će se u radu kasnije raspraviti.

## 2.1. Sustavi pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevima

Metoda bušenja primjenom zaštitnih cijevi svojim razvojem kroz povijest i ulaskom u komercijalnu upotrebu svela se na dva osnovna sustava od kojih svaki donosi određenu prednost i primjenom u praksi (Gaurina-Međimurec, 2005). To su sustav sa neizvlačivim sklopom alata na dnu, koji se sastoji od dlijeta ili pete koji su bušivi i koji se uglavnom koristi za vertikalni i gornji dio bušotine, te sustav koji inkorporira izvlačiv sklop krutog alata (slika 2-1) (engl. *Bottom Hole Assembly – BHA*).



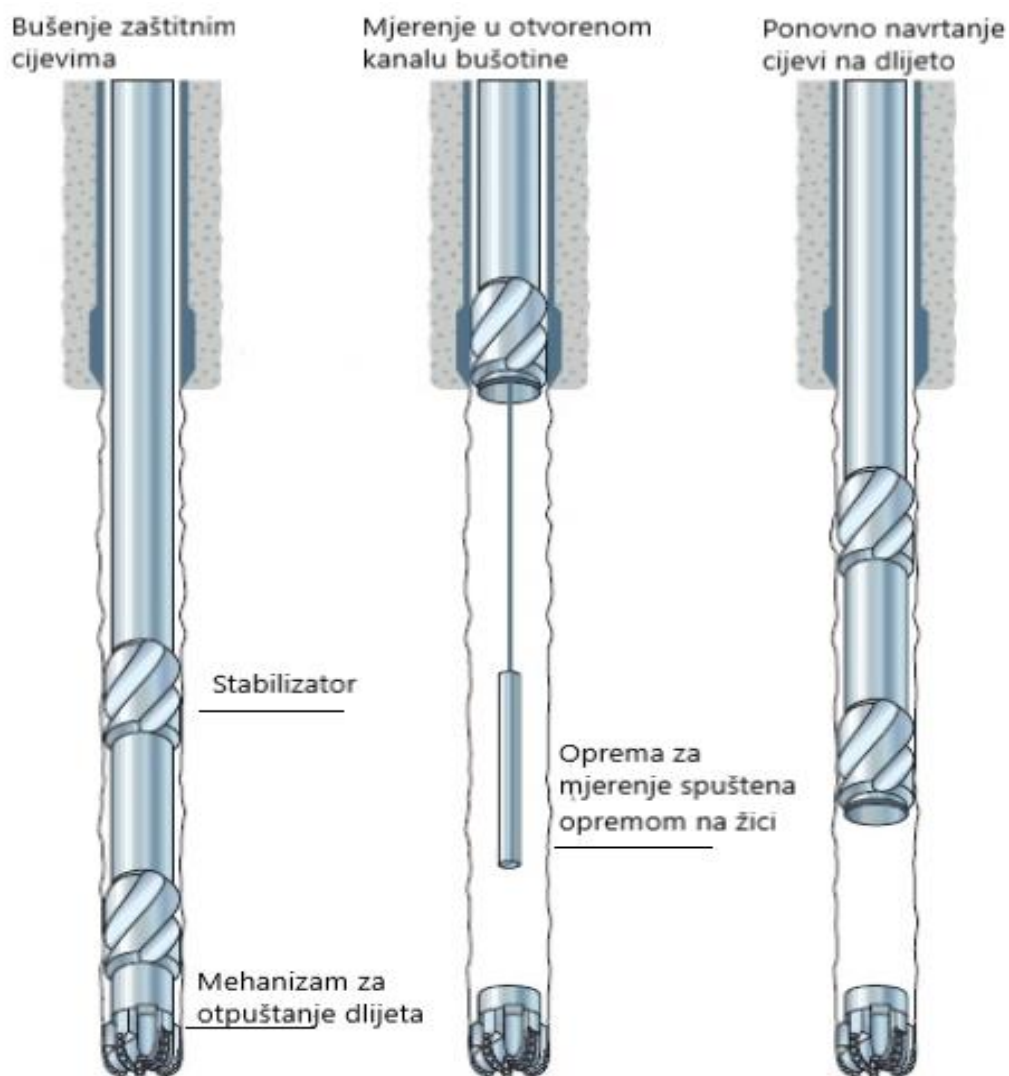
**Slika 2-1.** Sustavi za bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi (Patel et al., 2018)

### 2.1.1. Sustavi s neizvlačivim sklopom krutog alata

Sustavi sa neizvlačivim sklopom alata, za razliku od onog s izvlačivim su relativno jednostavni gledajući opremu i implementaciju ovog sustava. Na dnu kolone zaštitnih cijevi nalazi se dljeteto ili češće bušača peta koji su dijelom ili većinom napravljeni od mekih metala, uglavnom legura aluminija. Izvedba dljeteta ili bušače pete od mekih metala je u svrhu omogućavanja njihove bušivosti. Kada se dostigne ciljna dubina bušotine, bušača peta dobiva funkciju cementacijske pete što omogućuje nesmetano cementiranje bušotine kako bi se stvorili uvjeti za nastavak bušenja. Nakon procesa cementacije i

prolaska određenog vremena potrebnog za stvrdnjavanje cementa, peta koja je imala bušaću ulogu, a potom cementacijsku, može se izbušiti normalnim dlijetom manjeg promjera bez većih poteškoća (Kerunwa i Anyadiegwu, 2015).

Nedostaci ovog sustava su u tome što je moguće bušiti samo vertikalne bušotine u mekšim i neabrazivnim stijenama. Također primjenom ove metode ne može se ostvariti bilo kakav otklon niti se mogu obavljati mjerenja tijekom bušenja (npr. karotaža, mjerenje azimuta, mjerenje kuta otklona). Kako bi se omogućila karotaža, proces bušenja mora se zaustaviti, zaštitne cijevi moraju se odvrnuti od elementa za razrušavanje, zadignuti pa se tek tada spuštaju sonde ili druga mjerna oprema za željena mjerenja, iako danas već postoje sustavi koji mogu obavljati mjerenja kroz stijenke zaštitnih cijevi (slika 2-2).

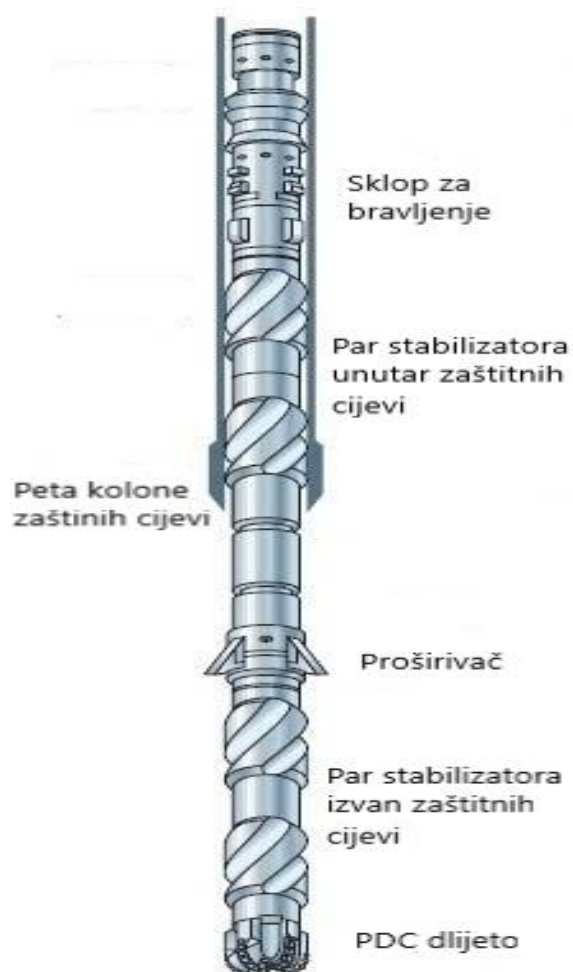


**Slika 2-2.** Mjerenje pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevima kod neizvlačivog sustava alata na dnu (Fontenot et al., 2005)

## 2.1.2. Sustavi s izvlačivim sklopom krutog alata

Sustav s izvlačivim sklopom alata na dnu uvelike se razlikuje od prethodnog (slika 2-3). Ovakav sustav sa sobom nosi više različite opreme, može se primijeniti u više različitih situacija i najveća prednost ovog sustava u odnosu na svog prethodnika je ta, što se sklop krutog alata u cijelosti može izvući na površinu, vratiti na površinu i ponovno iskoristiti. Također ovaj se sustav koristi kada je za bušenje određene dionice potrebna upotreba više od jednog dlijeta (Forko, 2015). Pošto je sklop alata na dnu moguće izvući u bilo kojem trenutku tijekom bušenja na površinu, u sklop alatki na dnu moguće je uvrstiti i razne druge alatke koje omogućavaju bolje i pravilnije bušenje (Warren et al., 2004)

Nakon dosezanja željene dubine alatke se s dna vade pomoću opreme na žici. Na vrhu cijelog sklopa alata na dnu pričvršćen je sklop za zabavljanje (engl. *drill lock assembly – DLA*) na koji se povezuje oprema na žici i izvlači se sklop krutog alata s dna.



**Slika 2-3.** Sustav s izvlačivim sklopom alata na dnu (Fontenot et al., 2005)

## 2.2. Oprema pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevima

Način bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi ne razlikuje previše od konvencionalnog bušenja, stoga su razlike u opremi isto male, međutim ipak postoje.

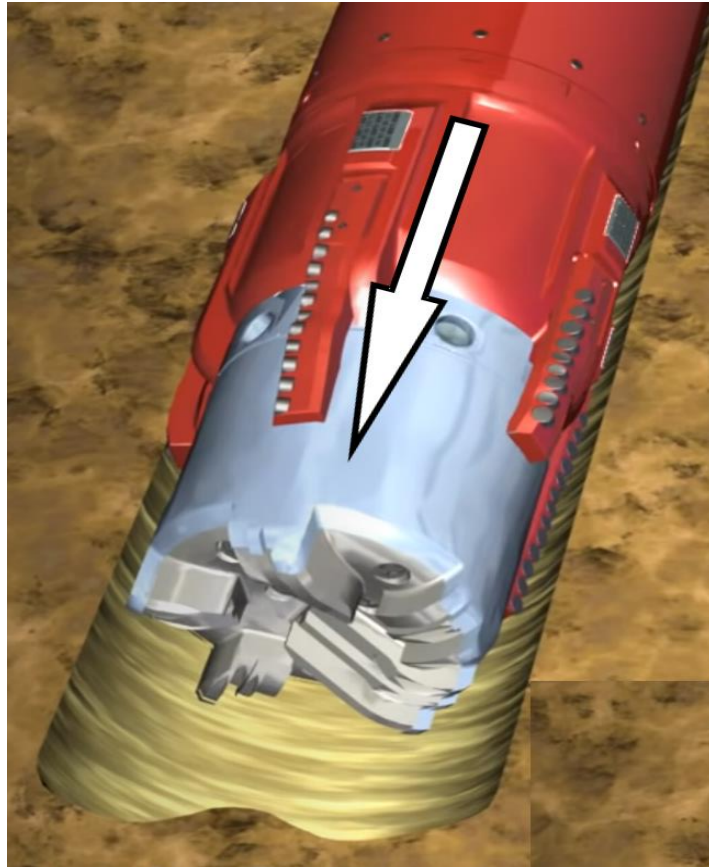
### 2.2.1. Oprema kod neizvlačivih sustava

#### Bušaća peta

Kod neizvlačivih sustava za razrušavanje stijene koriste se već spomenuta bušiva dlijeta i bušive pete (slika 2-4). Ovakva dlijeta se ne razlikuju previše od konvencionalnih. Jedan bitniji novitet je taj da su rezne površine, obično s insertima napravljenim od polikristalinskih dijamanta (engl. *Polycrystalline Diamond Compact – PDC*), tako izrađene da se prije cementacije rašire i utisnu u stijenke bušotine i time bušaća peta postaje cementacijska (slika 2-5) (Kerunwa i Anyadiegwu, 2015). Tako utisnute u stijenu rezne površine ne stvaraju prepreku za sljedeće dlijeto manjeg promjera te se bušenje može nastaviti normalno i bez većih problema. Kao i kod konvencionalnih dlijeta postoje različite izvedbe za različite formacije koje se buše. Osim polikristalinskih rezača, rezne površine mogu biti čisto dijamantne i od volfram-karbida kao i kod konvencionalnih dlijeta, ovisno prvenstveno o tipu stijene za koju je dlijeto namijenjeno.



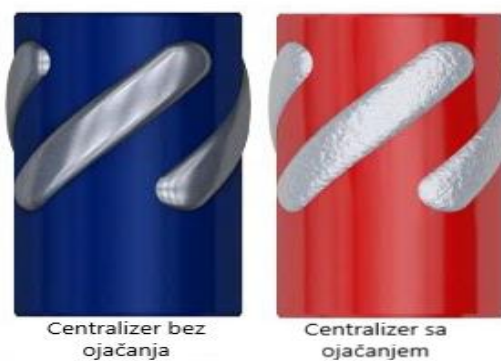
**Slika 2-4.** Bušivo dlijeto namijenjeno bušenju iz primjenu zaštitnih cijevi (Defyer™ DPA Series – Weatherford, 2015)



**Slika 2-5.** Proces prenamjene bušaće pete u cementacijsku (Weatherford, 2014)

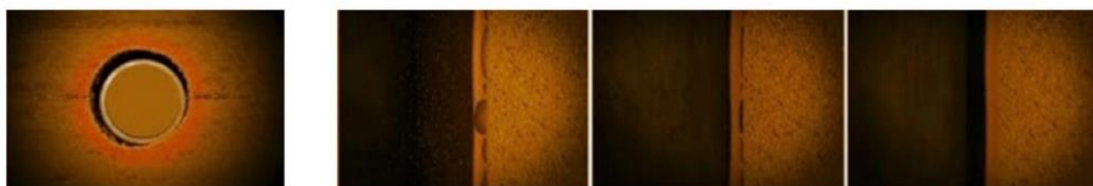
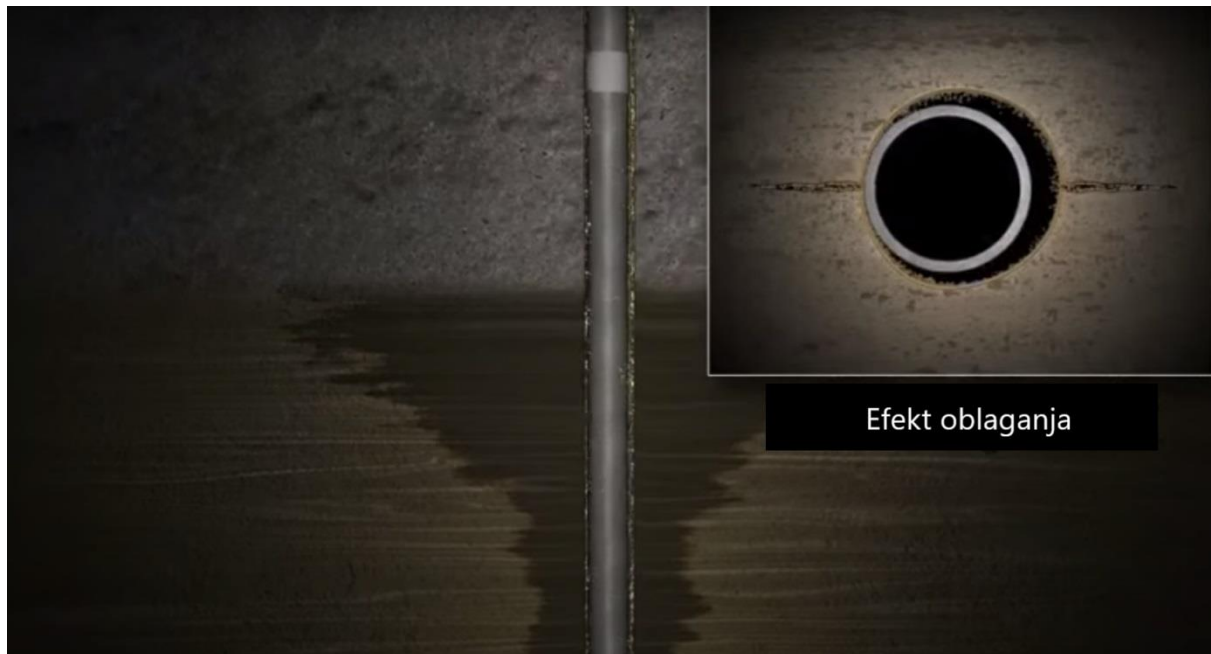
### Centralizeri

Još jedan dio opreme koji je prisutan kod konvencionalnog zacjevljenja kanala bušotine prisutan je i bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi, međutim, razlikuje se u dizajnu. Centralizeri koji se koriste kod bušenja uz primjenu zaštitnih cijevima postavljeni su cijelom duljinom zaštitnih cijevi svakih 230 metara (ovisi o preporuci proizvođača). Posebno dizajnirani centralizeri koji nemaju izražene bočne elemente pospješuju efekt oblaganja (slika 2-6).



**Slika 2-6.** Centralizeri pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi (Pavković et al., 2013)

Efekt oblaganja stijenke bušotine (engl. *plastering effect*) (slika 2-7) je efekt pri kojem zaštitne cijevi, zbog strujanja isplake, prijanjaju i “hodaju“ uz stijenku bušotine te dodatno oblažu stijenku bušotine čvrstim česticama čineći isplačni oblog kompaktnijim što može pomoći kod stijena koje su sklone gubljenju isplake. Kod primjene zaštitnih cijevi u procesu bušenja prstenasti prostor je suženiji, zbog većeg vanjskog promjera zaštitnih cijevi u odnosu na konvencionalne bušaće šipke. Zbog toga je tlak koji isplaka vrši na stijenke bušotine veći i veća je mogućnost gubljenja isplake u stijenu te se preporučuju manje dobave pumpe iako je prstenasti prostor manji (Mijić, 2013). Efekt oblaganja pri tome pomaže jer zatvara mikrofrakture u stijeni i uvelike smanjuje gubitak isplake u poroznim stijenama.



**Slika 2-7.** Čepljenje mikrofraktura i zaglađivanje isplačnog obloga efektom oblaganja (Weatherford, 2014; Patel et al., 2018)

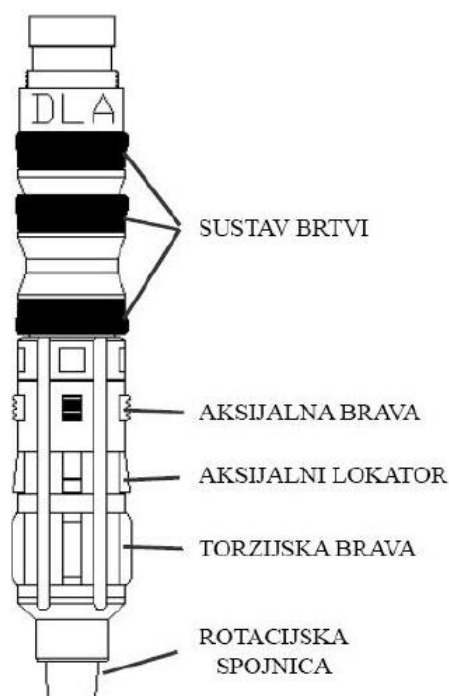


## 2.2.2. Oprema kod izvlačivih sustava

Na izvlačive sustave alata mogu se spojiti razni dijelovi konvencionalne opreme što je i razvilo mogućnost usmjerenog bušenja. Ipak, niže su navedene dvije stvari bez kojih primjena zaštitnih cijevi kod bušenja s izvlačivim sklopom alata nije moguće.

### Sklop za zabavljanje

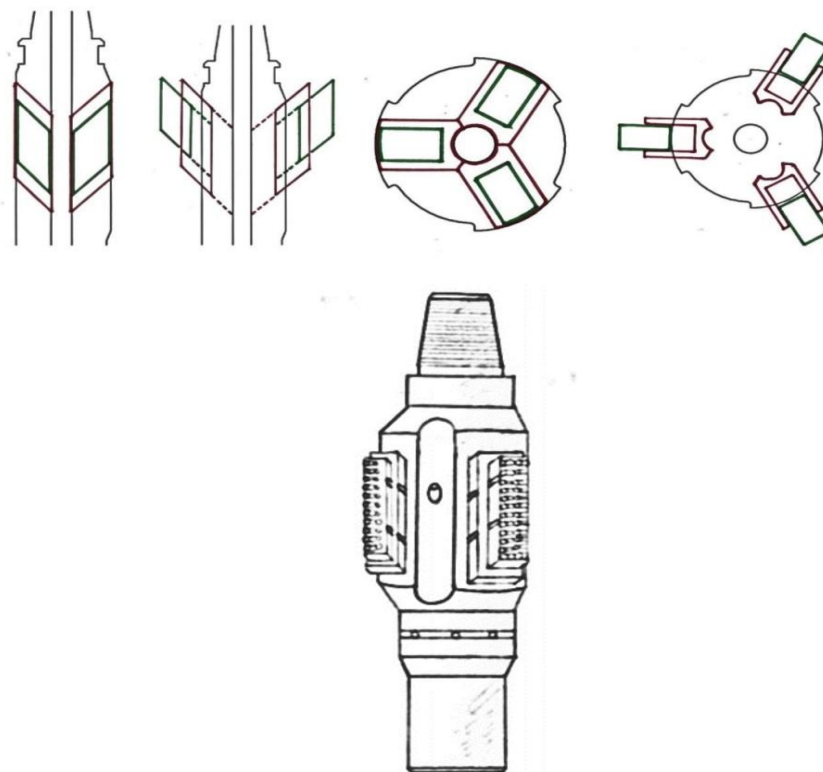
Sklop za zabavljanje (slika 2-8) najvažniji je dio opreme kod izvlačivih sustava jer prenosi okretni moment sa zaštitnih cijevi na dlijeto, osigurava prijenos težine na dlijeto i brtvi sustav tako da se isplaka ne vraća nazad u zaštitne cijevi te usmjerava isplaku iz zaštitnih cijevi prema dlijetu prilikom bušenja. Sklop za zabavljanje se spušta u bušotinu opremom na žici i odsjeda u prethodno navrnutoj spojnici koja je posebnog profila za odsjedanje ovog sklopa. Nakon što je sklop spušten do profilirane spojnice on se zaključava aksijalnim i torzijskim bravama unutar zaštitnih cijevi i tako osigurava sve prethodno navedene zadaće (Warren 2004). Na sklop za zabavljanje s donje strane mogu se spojiti bilo koji od konvencionalnih alata koji pospješuju bušenje.



**Slika 2-8.** Sklop za zabavljanje (Forko, 2015.)

## Proširivač

Proširivač je još jedan dio opreme koji je neophodan za bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi s izvlačivim sklopom alata. Proširivač se koristi i kod konvencionalnog bušenja međutim proširivač koji se koristi pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi mora osigurati veće proširenje jer promjer dlijeta mora biti manji od promjera zaštitnih cijevi kako bi ga se moglo spustiti u bušotinu opremom na žici. Zbog toga što je promjer dlijeta manji od promjera zaštitnih cijevi iza dlijeta mora slijediti proširivač koji proširuje kanala bušotine i tako osigurava nesmetan napredak zaštitnih cijevi i naknadno pravilnu cementaciju (Kamp, 2018). Jedan od standardnih proširivača koji se koristi je proširivač koji koristi tlak isplake za izvlačenje reznih elemenata iz kućišta (slika 2-9). Rezni elementi (na slici 2-9, zeleno) zatvoreni su dok se spuštaju u bušotinu. Prije početka bušenja uspostavi se cirkulacija isplake te se rezni elementi proširivača zajedno s njihovim kućištem (na slici 2-9, crveno) izvlače van. Prilikom bušenja mora se osigurati minimalna razlika od 10 bara između tlaka u zaštitnim cijevima i tlaka u prstenastom prostoru. Nakon prestanka cirkulacije isplake rezači elementi se automatski povlače nazad u tijelo proširivača (Kamp, 2018).



**Slika 2-9.** Aktiviranje proširivača (Kamp, 2018)

### 2.3. Bušaće postrojenje

Kod bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi bušaće postrojenje mora biti namijenjeno za takav pothvat, no vrlo često se bušaće postrojenje namijenjeno za bušenje konvencionalnim načinom prenamjenjuje za potrebe bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi (Gaurina-Međimurec 2005). Uobičajeno se dodaje još jedna pumpa za isplaku zbog povećanog gubitka tlaka u prstenastom prostoru, postavljaju se posebni elementi za kontrolu tlaka te dodatni preventeri koji su neophodni za siguran proces bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi (Kerunwa i Anyadiegwu 2015). Postrojenja koja su specijalizirana za bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi imaju integriranu opremu na žici za manipulaciju izvlačivim sklopom alata na dnu (slika 2-10, b).

Za bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi potrebna je posebna oprema za manevar. Zbog razlike u vanjskom dizajnu zaštitnih cijevi od konvencionalnog niza vršni pogon je neophodan za bušenje. Korištenje isključivo vršnog pogona pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi pokazalo se neefikasno jer se vršni pogon kod zacjevljenja bušotine spaja navojnom spojnicom i često se navojni spoj oštećivao zbog velike torzije koje zaštitne cijevi trpe, osobito zbog toga što su dužinom veće od konvencionalnog alata (Kerunwa i Anyadiegwu, 2015). Zbog ovog problema na vršni pogon se montira sklop za hvatanje zaštitnih cijevi (engl. *Casing Drive System – CDS*) (slika 2-10, a) koji prenosi rotaciju s vršnog pogona na zaštitne cijevi pomoću beznavojne spojnice te tako istovremeno štiti navoj zaštitnih cijevi, osigurava potrebno brtvljenje za nesmetanu cirkulaciju isplake, prenosi rotaciju i eliminira jedno dotezanje/zatezanje alata zbog eliminacije spojnice s navojem, štedeći vrijeme.



(a) Sklop za hvatanje zaštitnih cijevi



(b) Bušaće postrojenje za bušenje zaštitnim cijevima

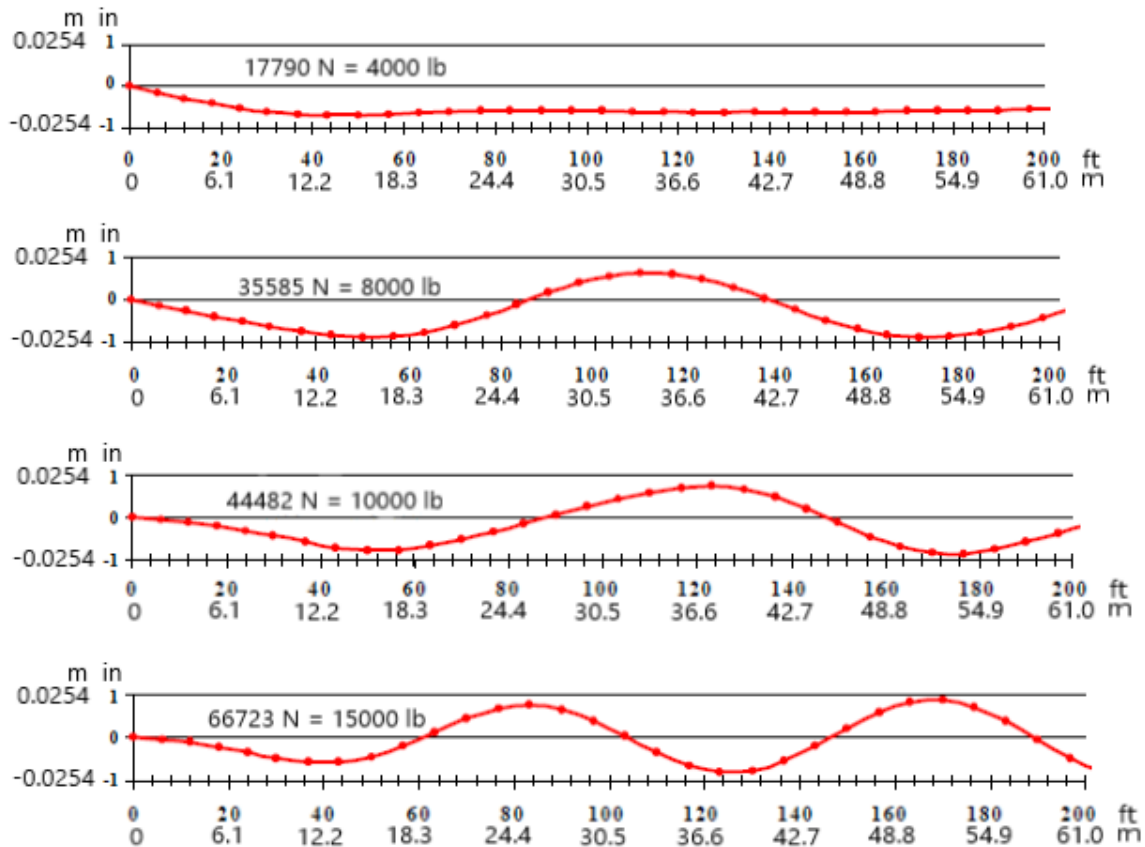
**Slika 2-10.** (a) Izvedba sklopa za unutrašnje i vanjsko hvatanje zaštitnih cijevi, (b) bušaće postrojenje (Patel et al., 2018)

## 2.4. Problemi pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi

U praksi bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi javljaju se slični problemi kao i kod konvencionalnog niza alata te se oni rješavaju na sličan način. Međutim zbog većeg promjera zaštitnih cijevi u odnosu na konvencionalni niz posebno se utvrđuju problemi nastali uslijed izvijanja, zamora materijala i otpora protjecanju bušaćeg fluida (Warren, 2000).

### 2.4.1. Izvijanje

Kod konvencionalnog niza alata izvijanje se izbjegava dodavanjem teških bušaćih šipki na dno niza bušaćeg alata. Teške šipke održavaju niz pravocrtnim jer su veće jedinične težine od bušaćih i tako drže nul-točku uzdužnog opterećenja dovoljno visoko u nizu alata. Pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi ne postoji takvo rješenje jer su zaštitne cijevi jednolikog promjera i sklonije su izvijanju. Ovo se čini kao veliki problem, međutim kod bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi prstenasti prostor je relativno malen te se zaštitne cijevi naslanjaju na stijenke bušotine te se tako sprječava daljnje izvijanje i osigurava potrebno opterećenje na dlijeto (Warren, 2000). Izvijanje zaštitnih cijevi postaje problem kada se cijevi izviju u tolikoj mjeri da previše utječu na torziju cijelog niza i povećavaju snagu potrebnu za rotaciju. Preveliko izvijanje osim naglog povećanja torzije, može izazvati kidanje materijala i pucanje cijevi. Kod pravocrtnih bušotina cijevi su sklonije izvijanju što im je krutost manja, pa tako u savršeno vertikalnim bušotinama dio zaštitnih cijevi koji je opterećen tlačno uvijek će se izviti. Međutim ako je bušotina pod određenim otklonom (najčešće jest jer bušotine u pravilu nikad nisu savršeno vertikalne) centralizeri koji su postavljeni na zaštitne cijevi preuzimaju dio opterećenja i cijevi ostaju pravocrtne (Warren, 2000). Na slici 2-11 je prikazan dijagram različitih stadija izvijanja kod različitih opterećenja na dlijeto. Izvijanje pri malim opterećenjima poprima oblik sinusoide što se i naziva sinusoidalno izvijanje, a kako se opterećenje na dlijeto povećava izvijanje se pretvara u helikoidalno.



**Slika 2-11.** Krivulje izvijanja cijevi ovisno o opterećenju na dlijeto (os apscisa pokazuje udaljenost pojedine točke cijevi od dlijeta, dok os ordinata prikazuje udaljenost središta bušotine do središta cijevi u pojedinoj točki) (Warren, 2000).

#### 2.4.2. Zamor materijala

Još uvijek dosta nepoznato područje pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi je zamor materijala odnosno opterećenje pri kojem će na zaštitnim cijevima nastati pukotine koje će pri daljnjem izlaganju takvom opterećenju postati veće i cijev će puknuti. Tome je tako jer je metoda bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi relativno nova te nije bilo dovoljno ispitivanja u praksi i zaštitne cijevi nisu primarno dizajnirane za izlaganje opterećenjima koja dovode materijal daleko iznad granice tečenja. Kod onih slučajeva gdje je došlo do rupture tijela cijevi zaključeno je da materijal počne popuštati zbog osciliranja opterećenja na zaštitne cijevi prilikom izvijanja i to u predjelu spojnica. Broj oscilacija s kritičnim opterećenjem koji je potreban za pucanje cijevi i dalje ostaje nepoznanica jer raspon potrebnih oscilacija varira od nekoliko kritičnih opterećenja do beskonačno mnogo (Warren, 2000).

### 2.4.3. Otpori protjecanju

Neki od rijetkih procesa koji se, osim samog principa, u potpunosti razlikuju od konvencionalnog načina bušenja su otpori protjecanju i hidraulički parametri u bušotini i cijevima tijekom bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi.

Zbog toga što su hidraulički parametri i raspored padova tlaka drugačiji kod bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi u odnosu na konvencionalno bušenje, ključno je poznavati te parametre i pravilno kondicionirati isplaku za nesmetano bušenje (Mijić, 2013). Najveći dio pada tlaka u sustavu pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi uzrokovano je smanjenim prstenastim prostorom između stijenke bušotine i tijela cijevi. Iako je takav pad tlaka kompenziran time što je pad tlaka u cijevima smanjen, zbog njihovog većeg promjera u odnosu na konvencionalni niz alata, potrebne su preinake u proračunu potrebne dobave pumpe i dodavanja aditiva u isplaku odnosno smanjenju količine istih.

Pad tlaka u prstenastom prostoru smanjuje se pojavom ekscentričnosti. Drugim riječima, centar poprečnog presjeka zaštitnih cijevi u procesu bušenja ne podudara se s centrom poprečnog presjeka bušotine. Ova se pojava koristi pri proračunu dobave i kondicioniranju isplake jer se tako smanjuju troškovi izrade bušotine, pospješuje iznošenje krhotina i napredak dlijeta, te smanjuje mogućnost nastajanja problema poput nepotpunog čišćenja dna i zaglave alata. Iako je diferencijalni prihvat inherentan pojavi ekscentričnosti on se u praksi bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi vrlo rijetko događa jer je površina zaštitnih cijevi daleko veća od bušaćih šipki (Mijić, 2013).

### **3. USMJERENO BUŠENJE UZ PRIMJENU ZAŠTITNIH CIJEVI**

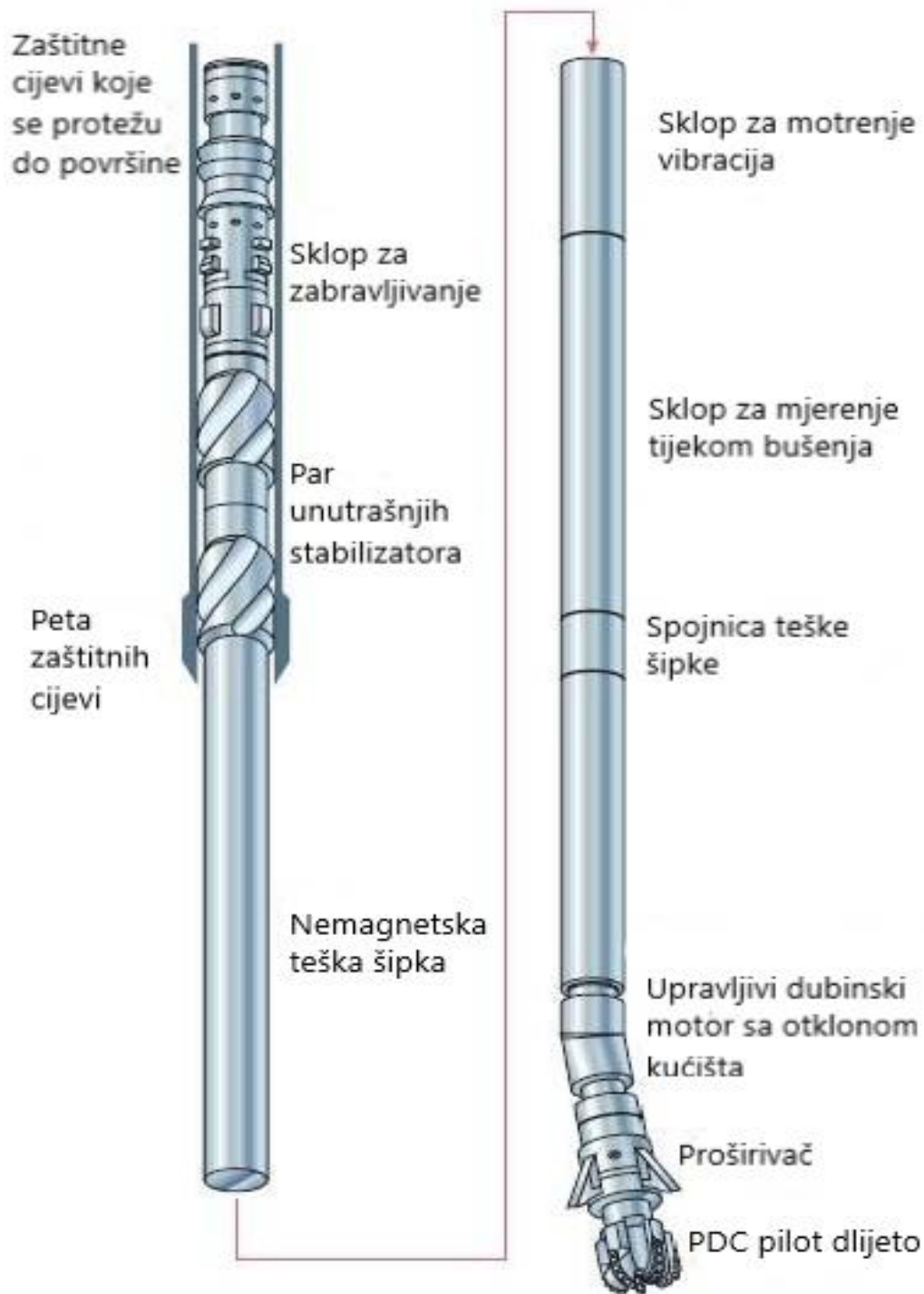
Kako se tehnologija razvijala popularizacijom ove metode tijekom 21. stoljeća tako se korištenje zaštitnih cijevi za bušenje proširilo i na područje usmjerenog bušenja. Tehnologije koje su se koristile kod konvencionalnog alata, kao što su sonde za dubinska mjerenja i karotažu, dubinski motori i upravljivi sustavi, su našle svoju primjenu i u nizu zaštitnih cijevi pri bušenju.

Primjena zaštitnih cijevi pri usmjerenom bušenju (engl. *Directional Casing While Drilling - DCWD*) došlo je sa svojim izazovima. Bilo je potrebno neko vrijeme da se ovakva metoda počne upotrebljavati komercijalno. Teško je bilo uskladiti malu brzinu protoka isplake i velike skokove u torziji niza, a istovremeno održati prihvatljiv napredak dlijeta. U daljnjem tekstu razmotrit će se razvoj primjene zaštitnih cijevi u usmjerenom bušenju te sva oprema i izazovi ove metode.

#### **3.1. Oprema kod usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi**

Usmjerenom bušenje u konvencionalnom smislu nemoguće je izvesti bez upotrebe opreme za mjerenja tijekom bušenja (engl. *Measurement While Drilling – MWD*). Bez opreme za mjerenje ne zna se trenutni položaj dlijeta tijekom bušenja, odnosno nema kontrole nad otklonom bušotine. Stoga je primjenu zaštitnih cijevi u usmjerenom bušenju nemoguće obaviti s neizvlačivim sklopom alata na dnu. Na izvlačiv sklop alata mogu se navrnuti, osim opreme za mjerenje, dubinski motori te sva popratna oprema za usmjerenom bušenje.

Kod usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi oprema izvlačivog sklopa alata na dnu se sastoji od PDC pilot dlijeta, proširivača, upravljivog dubinskog motora, sustava za mjerenje tijekom bušenja, nemagnetičnih teških šipki, unutarnjeg para stabilizatora te sklopa za zabavljanje (slika 3-1)(Warren et al., 2005).



**Slika 3-1.** Sklop alata na dnu pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi (Fontenot et al., 2005)



### 3.1.1. Upravljivi sustavi

Osim standardne izvedbe sklopa alata na dnu s upravljivim motorom. U posljednjem desetljeću razvila se tehnologija koja je uvelike pospješila usmjereno bušenje ne samo zaštitnim cijevima nego i konvencionalnim alatkama. Ona koristi rotacijski upravljivi sustav (engl. *Rotary Steerable System – RSS*). Ovakav način bušenja koji koristi rotaciju s vrha niza i eliminira upotrebu motora prvobitno se koristio u izradi usmjerenih, horizontalnih i bušotina velikog doseg na odobalnim postrojenjima. Razvojem tehnologije i povećanjem dostupnosti opreme ovaj je sustav našao svoje mjesto i u usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi (Forko, 2015). Postoje dvije izvedbe ovakvog sustava. Sustavi koji usmjeravaju dlijeto (engl. *“point-the-bit“*) i sustavi koji guraju dlijeto (engl. *“push-the-bit“*). Sustavi koji usmjeravaju dlijeto ostvaruju otklon tako što savijaju rotirajuću cijev koja prolazi kroz nerotirajuće kućište. Sustavi koji guraju dlijeto imaju elemente na rotirajućem tijelu koji “odguruju“ niz alata od stijenke bušotine te tako stvaraju otklon. Jedan ovakav sustav razvila je tvrtka Halliburton nazvan “iCruise“ (slika 3-2). Ova tehnologija uklopila je moderan sustav mikroprocesora i sklopova za mjerenje tijekom bušenja gdje bušač dobiva 3D prikaz položaja alata u realnom vremenu, te je omogućeno praćenje realnih parametara poput otklona, napretka dlijeta, temperature, azimuta i vibracija. Osim što daje sliku niza alata u realnom vremenu sustav može bušiti automatski prema zadanim parametrima bez dodatne intervencije bušača. Ovakav sustav se na zaštitne cijevi spaja pomoću sklopa za zabavljanje.

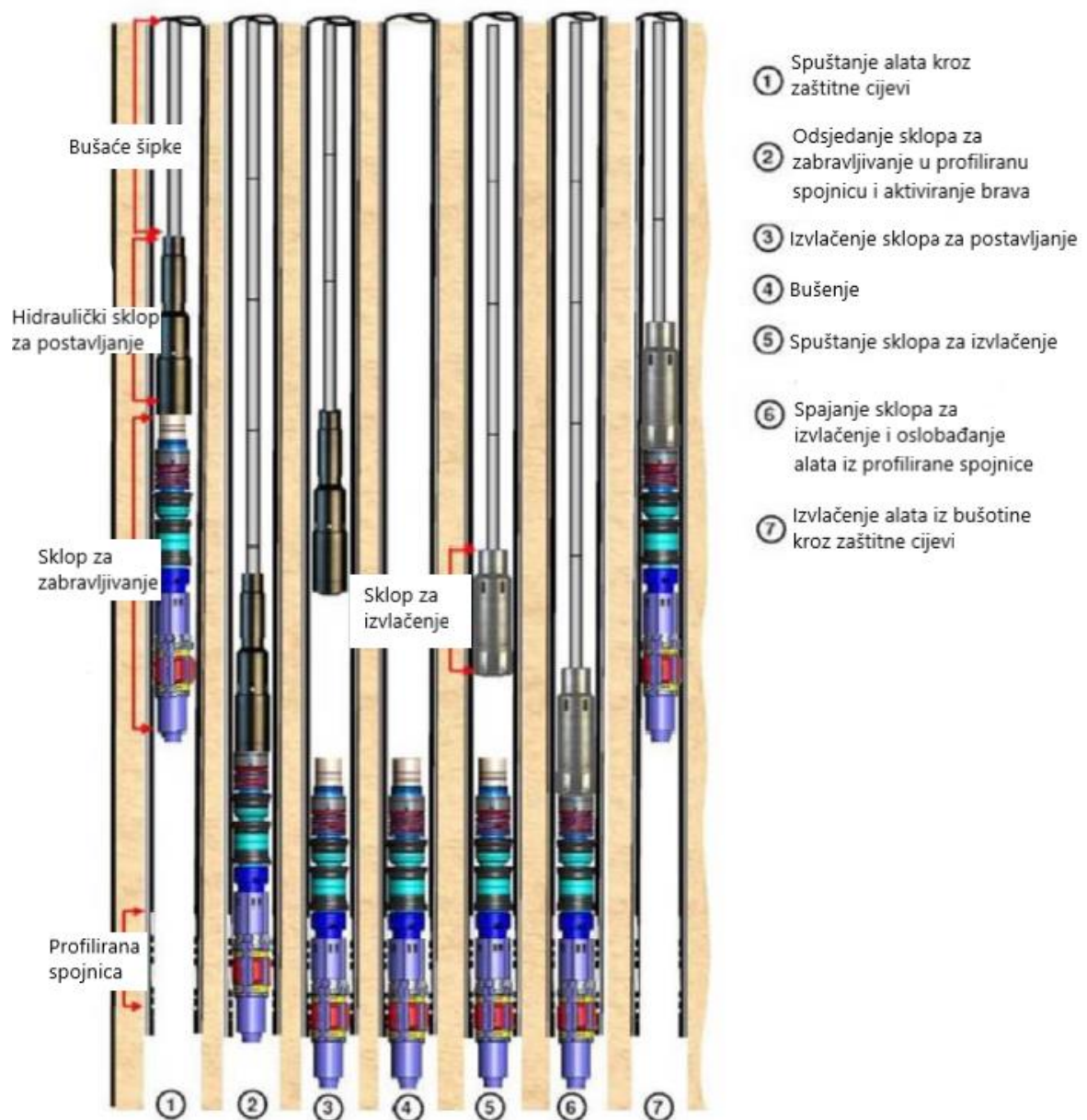


**Slika 3-2.** Halliburton upravljivi sustav za usmjereno bušenje (Marck i Vitta, 2018)

### 3.2. Proces usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi

Usmjereni bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi vrši se sklopom alata na dnu koji je učvršćen pomoću sklopa za zabravljivanje unutar zaštitnih cijevi. Zaštitne cijevi koje se koriste za bušenje nisu drugačije od onih koje se koriste pri konvencionalnom zacjevljivanju bušotina. Zaštitne cijevi se podižu na podište tornja preko automatiziranog pristupnog mosta gdje ih preuzima hidraulički elevator. Zaštitne cijevi spojene su na vršni pogon preko sklopa za hvatanje zaštitnih cijevi pomoću nenavojne spojnice. Na taj način izbjegava se oštećenje gornjeg navojnog spoja i izuzimanja jednog dotezanja i otpuštanja na spojnici koje bi se obavljalo vršnim pogonom da nema sklopa za hvatanje. Preko sklopa za hvatanje moguće je vršiti otpajanje i dotezanje navojnih spojeva bez intervencije klinaša. Prilikom spajanja zaštitne cijevi u samu cijevi ulazi "trn" sklopa za hvatanje koji osigurava hermetičnost sustava prilikom cirkulacije isplake (Forko, 2015).

Prethodno navedeni sklop alata na dnu spušta se opremom na žici, savitljivim tubingom ili bušaćom šipkom u bušotinu dok sklop za zabravljivanje ne odsjedne u profiliranoj spojnici. Cirkulacijom isplake pucaju sigurnosni zatici i sklop se zabravluje unutar profila zaštitne cijevi te je sustav tada spreman za bušenje. Izbor korištenja dubinskog motora za usmjereni bušenje ili rotacijskog upravljivog sustava ovisi o ekonomskoj prihvatljivosti pojedinog sustava i dostupnoj opremi, te karakteristikama bušaće garniture. Do sada se u praksi upravljivi sustav najčešće koristio za bušenje samo u kombinaciji sa zaštitnim cijevima promjera 0,1778 m (7") do 0,2445 m (9 5/8"). Cijevi koje se koriste za veće promjere od navedenih stvaraju preveliki nateg i povećanje torzije, a sve manje od toga su sklonije izvijanju i ne podržavaju težinu niza. Dubinski motori s otklonom kućišta rješenje su za različiti raspon promjera zaštitnih cijevi pri bušenju, iako imaju lošiji napredak i skloniji su greškama u podešavanju otklona nego upravljivi sustavi. Nakon spuštanja alata u bušotinu te nakon što se izbuši željeni interval u bušotinu se pomoću savitljivog tubinga ili bušaće šipke i sklopa za izvlačenje alat oslobađa iz profilirane spojnice i izvlači se na površinu (slika 3-3). Moderni sustavi za izvlačenje i spuštanje alata mogu obavljati svoju funkciju u punoj cirkulaciji i pod kutem većim od 90°. Nakon što je sklop alata izvučen s dna, zaštitne cijevi se cementiraju ili pomoću čepa za cementaciju, u ovom slučaju samo gornjeg, te se održava tlak dok se cement ne stvrdne ili se koristi prijelaz za cementaciju. Nakon uspješnog zacjevljenja kanala bušotine postupak se ponavlja s manjim promjerom zaštitnih cijevi kao i u konvencionalnom bušenju (Graves i Herrera, 2013).



**Slika 3-3.** Postupni prikaz spuštanja i izvlačenja izvlačivog sklopa alata s dna pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi (Graves i Herrera, 2013)

### 3.3. Izbor bušotine za primjenu usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi

Bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi namijenjeno je prvenstveno uštedi vremena i novca u zonama koje su inače problematične za izradu konvencionalnim nizom alata, no ipak su neke bušotine puno bolje za primjenu ove metode od drugih.

Prvi limitirajući faktor je tehnička izvedivost. Usmjerenom bušenju s malim promjerima cijevi (manjim promjerima od 0,1778 m odnosno 7") što u potpunosti nije zaživjelo jer su dubinski motori, koji moraju biti manjeg promjera od samih cijevi da kroz njih mogu proći pri spuštanju i izvlačenju alata, premali da bi se postigao željeni napredak i da se primjena ove metode dugoročno isplati (Warren et al., 2005). Osim promjera cijevi pri projektiranju bušotine važan faktor je i torzija koju će ostvarivati zaštitne cijevi prilikom bušenja. Torzija se definira kao rotacijska sila potrebna za okretanje cijevi u bušotini, a ovisi o koeficijentu trenja i veličini kontaktne površine. Samim time torzija pri bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi može dosegnuti kritičnu razinu zbog smanjenog prstenastog prostora. Pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi torzija je ključan faktor pri izboru pogodne bušotine za primjenu ove metode. Zamor materijala može također predstavljati značajniju prepreku jer zaštitne cijevi nemaju stabilizaciju kakvu ima konvencionalni alat s upotrebom teških šipki (Warren et al., 2005).

Ekonomičnost izrade bušotine upotrebom zaštitnih cijevi donosi se na temelju nekoliko faktora:

- smanjeno gubljenje isplake u stijenu u odnosu na bušenje primjenom konvencionalnog alata;
- korisnost efekta oblaganja u gubljenju isplake i smanjenju oštećenja pribušotinske zone u proizvodnim intervalima stijena;
- bolja kontrola ekvivalentne gustoće isplake;
- duži intervali zacjevljenja;
- mogućnost spašavanja bušotine u slučaju problema.

Što je više ovih faktora zadovoljeno ili je jedan od njih kritičan za izradu bušotine konvencionalnim alatom to nam je isplativije koristiti zaštitne cijevi za bušenje (Warren, 2005).

### 3.4. Bušenje bušotina velikog dosega pomoću zaštitnih cijevi

Bušenje bušotina velikog dosega u posljednjem desetljeću napravilo je značajan skok u tehnologiji i to ponajviše u odobalnom bušenju. Kod izrade bušotina velikog dosega najznačajniji faktor je trenje što ga ostvaruje niza alata rotacijom u isplaci. Eksponencijalnim porastom ekvivalentne gustoće isplake (eng. *Equivalent Circulating Density – ECD*), smanjuje se napredak dlijeta, povećava se trošenje alata i dolazi do povećanja u torziji. Ekvivalentna gustoća isplake je gustoća gdje bi tlak koji tvori stupac takve isplake bio jednak zbroju hidrostatičkog tlaka isplake i padovima tlaka u prstenastom prostoru uslijed protjecanja. Sigurnosni raspon ekvivalentne gustoće isplake (eng. *Safe Mud-Weight Window – SMWW*) odnosi se u donjoj granici na tlak koji isplaka mora ostvarivati na otvoreni kanal bušotine da spriječi dotok i zarušavanje, a u gornjoj granici na tlak frakturiranja stijene. Tijekom bušenja nastoji se održavati ekvivalentna gustoća isplake da nam tlak bude unutar ove dvije granice. U bušotinama velikog dosega, s povećanjem ukupne duljine (engl. *Measured Depth – MD*) smanjuje se sigurnosni raspon zbog povećanog tlaka koje pumpe moraju održavati radi podržavanja ekvivalentne gustoće isplake. Kod bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi na manjim se dubinama ovaj raspon može povećati koristeći efekt oblaganja stijenki. Manje frakture koje nastaju zbog prevelikog tlaka odmah se zatvaraju efektom oblaganja i na takav način omogućeno je bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi u bušotinama velikog dosega (Li et al., 2017).

## **4. BUŠENJE UZ PRIMJENU ZAŠTITNIH CIJEVI U PRAKSI**

Bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi omogućilo je ekonomičnije i jednostavnije bušenje problematičnih stijena na nekim naftnim i plinskim poljima. Mnoge naftne kompanije pribjegle su takvom pristupu zbog velikih gubitaka vremena kod bušenja. U daljnjem tekstu govori se o bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi na naftnom polju u Egiptu, te usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi na naftnom polju u Rusiji.

### **4.1. Upotreba zaštitnih cijevi za bušenje u dolini Nila u Egiptu**

Godine 2011. na egipatskom polju Sjeverno od Nila (engl. West Of Nile – WON) otkrivene su komercijalne zalihe ugljikovodika. Od tada je izbušeno preko 50 bušotina te je to polje ujedno jedno od najaktivnijih bušačkih područja u Egiptu u posljednjem desetljeću. Ono što karakterizira ovo polje su debeli slojevi klastičnih sedimentnih stijena, koje su od samog početka zadavale probleme prilikom bušenja konvencionalnim alatom. Upotrebom zaštitnih cijevi za bušenje ovakvih naslaga dovelo je do toga da se vrijeme bušenja gotovo prepolovilo i ostvarilo mnoge ekonomske uštede (Shahin et al., 2018).

#### **4.1.1. Nestabilne formacije i izazovi pri bušenju konvencionalnim alatom**

Već spomenute klastične stijene relativnog mladog podrijetla protežu se od površine do 1500 metara vertikalne dubine. Prvih 500 metara se uglavnom sastoji od nekonsolidiranih pješčenjaka koji su vrlo propusni i već pri gornjim slojevima nastajali su problemi gubljenja isplake u stijenu. Raspon od 500 do 1500 metara čine siltne stijene koje su vrlo sklone zarušavanju. Svaka bušotina na spomenutom polju imala je problema sa zarušavanjem pri čemu su problemi bili rješavani na razne načine često bezuspješno i često se moralo pribjegavati konstantnom vađenju i spuštanju alata kako bi se stabilizirao kanal bušotine što je dodavalo neproduktivnom vremenu i povećavalo cijenu koštanja bušotine. Iako se vremenom i studijama pokazalo da je najbolje bušiti okomito na ravninu sloja odnosno ravninu taloženja, veliko neproduktivno vrijeme uzrokovano konstantnim kondicioniranjem bušotine je i dalje bilo prisutno. Još jedna pojava koja je bila čest problem pri zacjevljenju bušotine je nemogućnost spuštanja zaštitnih cijevi do dna izbušenog intervala.

#### 4.1.2. Predstavljanje i pokušaj bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi cijevima

Zbog velikih gubitaka i preskupih bušotina kontraktorske kompanije tražile su jeftinije rješenje za rješavanje konstantnih problema. Predstavljeno je rješenje za sve nastale problema u obliku bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi s neizvlačivim sustavom alata. Ovakvo rješenje trebalo je pridonijeti bušenju tako što će:

- se ujedno bušiti i zacjevljivati bušotinu eliminirajući problem nemogućnosti spuštanja zaštitnih cijevi do dna izbušenog intervala;
- smanjiti izloženost stijene isplaci, što sprječava zarušavanje i osigurava stabilan kanal bušotine;
- zaštitne cijevi izazivati efekt oblaganja limitirajući tako gubljenje isplake u stijenu u nekonsolidiranim pješčenjacima;
- osigurati bolje čišćenje dna zbog povećane brzine povratnog protoka u manjem prstenastom prostoru.

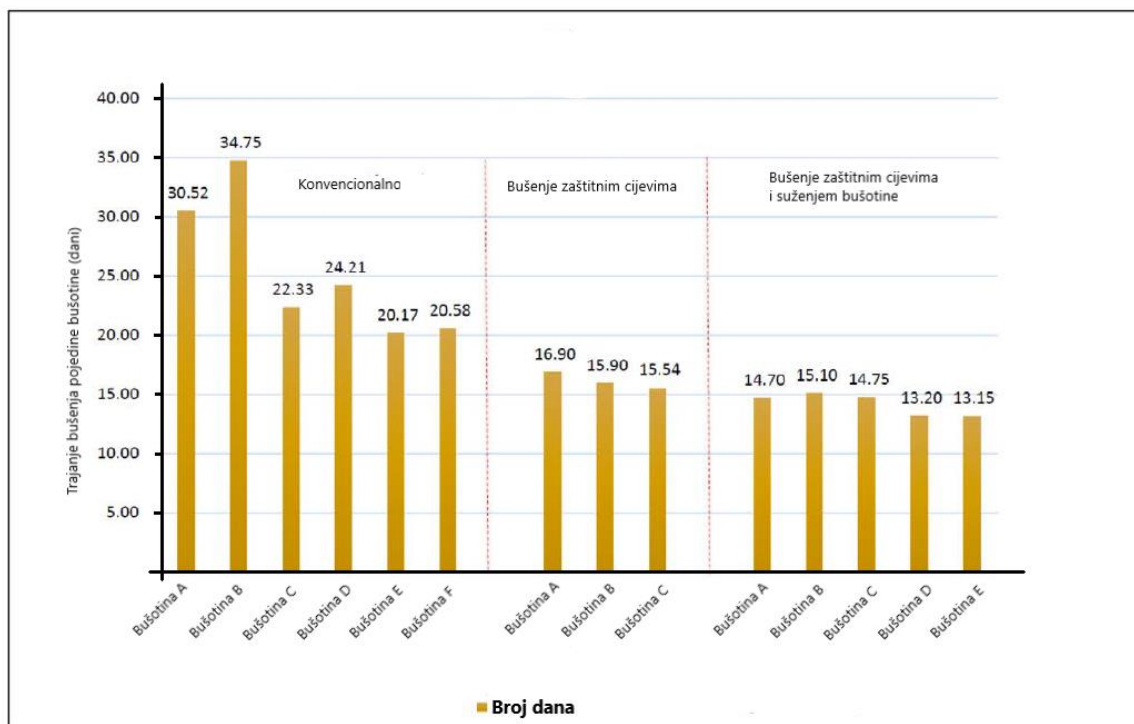
Iako je sustav izgledao dobro i izvedivo u teoriji, provodila su se testiranja da potvrde moguće nedostatke korištenja zaštitnih cijevi za bušenje umjesto konvencionalnog alata kao što su:

- dostatan napredak bušivog PDC dlijeta u usporedbi s konvencionalnim dlijetom;
- obljepljivanje većeg dlijeta u odnosu na konvencionalno jer je se buši kroz formacije bogate siltnim česticama;
- izdržljivost zaštitnih cijevi trenutnog API (engl. *American Petroleum Institute*) standarda, s obzirom na povećana naprezanja pri bušenju;
- isplativost prenamjene trenutnog postrojenja u ono koje je kompatibilno za bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi;
- stvaranje velikog podtlaka u slučaju izvlačenja zaštitnih cijevi radi promjene dlijeta;
- uspješnost cementacije.

Unatoč svim postavljenim izazovima testiranja su uspješno obavljena, riješeni su mogući problemi i iskorištene su sve prednosti primjenom zaštitnih cijevi u procesu bušenja (slika 4-1)(Shahin et al., 2018).

#### 4.1.3. Sužavanje kanala bušotine

Nakon nekoliko izrađenih bušotina bušenjem uz primjenu zaštitnih cijevi, projektanti su otišli korak dalje i napravili model gdje će se nove bušotine bušiti s manje intervala i s manjim promjerom cijevi te tako ostvariti dodatne uštede vremena i novca. Primjenom nove metode suženja novih bušotina koje su u prosjeku duboke 2200 metara bušene su u samo 3 intervala. To je donijelo velike uštede materijala budući da se je prvotno konvencionalnim nizom bušilo 3 intervala samo za premoštenje problematičnih zone koje završavaju na 1500 metara mjerene dubine.



**Slika 4-1.** Grafički prikaz dana potrebnih za bušenje pojedinih bušotina koristeći različite metode na jednom polju sjeverno od Nila (Shahin et al., 2018)



## 4.2. Usmjereno bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi u Timan-pečorskoj regiji u Rusiji

Timan-pečorski sliv je regija koja smještena između grebena Timan i Uralskih planina na sjeveru Rusije. U regiji ima nekoliko naftnih i plinskih polja. Kako priobalno plinsko-naftna regija nema homogenu geološku strukturu iskustva se ne podudaraju na različitim poljima.

Polje Labaganskoe jedno od polja trenutno u razvoju, a na kojem se zadnje ugrađena tehnička kolona, vanjskog promjera 0,2445 m ( $9 \frac{5}{8}$  ") prostire od 450 do 1500 metara što je ujedno i ciljana dubina ležišta. Trajektorije bušotina su obično S ili J tipa i završavaju horizontalno ili s većim otklonom. Ono što je problematično na ovom polju su debele glinovite sedimentne naslage sklone bubrenju. Česti problem pri bušenju u naslagama sklonima bubrenju su zaglava alata i obljepljivanje dlijeta. Velik dio sredstava troši se na kondicioniranje isplake posebnim aditivima koje sprečavaju bubrenje i isplakama koje nisu na bazi vode. Osim toga, bilo je puno neproduktivnog vremena, koje je u nekim slučajevima premašivalo vrijeme bušenja i trajalo po nekoliko dana, zabilježenog zbog česte zaglave alata i potrebe zadizanja alata radi proširivanja kanala do nominalnog promjera te otklanjanje naglih zakrivljenosti u kanalu bušotine (engl. dogleg). Napredak ovdje nije bio problem s konvencionalnim alatom jer su glinovite stijene relativno lako bušive te je dodatan zahtjev za primjenu bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi bio održavanje velikog napretka dlijeta što može biti jedan od ograničavajućih faktora.

Nakon brojnih problema pri konvencionalnom usmjerenom bušenju, kontraktorske i operatorske kompanije dogovorile su 3 testne bušotine za ispitivanje metode usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi (Fatkulin et al., 2019).

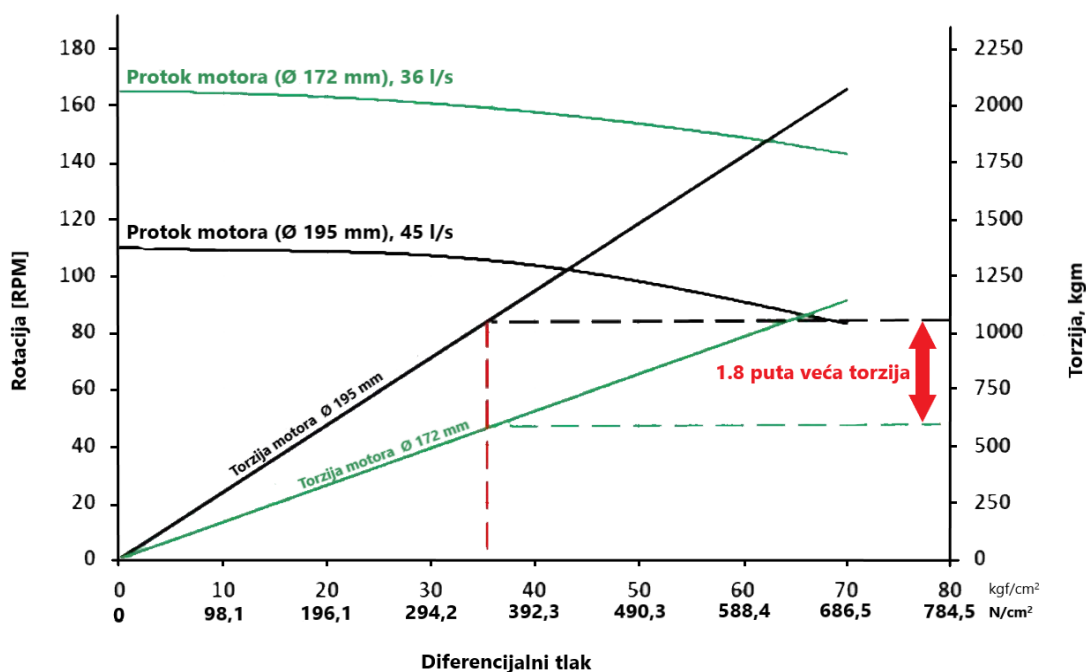
### 4.2.1. Oprema korištena pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi

Za bušenje u testnim bušotinama koristio se upravljivi sustav (RSS) u kombinaciji s konvencionalnim dubinskim volumetrijskim motorom (engl. Positive Displacement Motor – PDM). Sklop alata na dnu dobijao je dio potrebne torzije za rotaciju s vrha odnosno sklopa za hvatanje preko vršnog pogona, a dio preko dubinskog motora. Ovakva kombinacija može postići preko 350 okretaja u minuti.

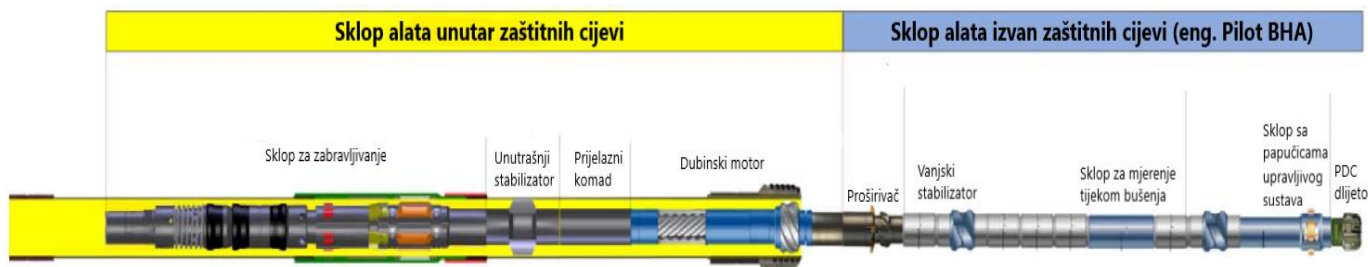
U prvoj testnoj usmjereoju bušotini čija je dionica duga 1056 metara koristilo se PDC dlijeto u kombinaciji s upravljivim sustavom i dubinskim motorom promjera 172 milimetra. Ova kombinacija rezultirala je napretkom od samo 26,2 metra po satu u

odnosnu na 42,8 metra po satu koje se dobivalo na istom polju bušenjem konvencionalnim načinom. Procjenom postupka došlo se do zaključka da motor promjera 172 milimetra ne proizvodi potrebnu torziju na dlijeto za dobar napredak. Osim manjka snage motor limitira protok isplake što uzrokuje nepotpuno čišćenje dna. Unatoč problemima s napretkom cijeli interval izbušen je odjednom bez vađenja alata i odstupanja od predviđene trajektorije kanala bušotine (Fatkulin et al., 2019).

Za druge dvije bušotine u sklopu alata promijenjen je dubinski motor koji je namijenjen isključivo bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi, promjera 195 milimetara koji postiže potrebnu torziju i protok za očekivani napredak dlijeta (slika 4-2). Drugi dijelovi sklopa krutog alata s dna kao što su sklop za mjerenje tijekom bušenja, proširivač, upravljivi sustav i stabilizatori, ostali su nepromijenjeni (slika 4-3). U drugoj bušotini zamijećeno je poboljšanje u napretku gdje je 1223 metra intervala izbušeno s prosječnim napretkom od 54,9 metara po satu, a u trećoj je interval od 1336 metara izbušen prosječnom brzinom od 61,9 metara po satu, što nije samo zadovoljilo kriterije jednakog napretka konvencionalnog alata nego je napredak povećan za 27%. Također, obje su bušotine izbušene do ciljane dubine bez neproduktivnog vremena, u jednom manevru, sa zadovoljenom planiranom otklonjenom putanjom (Fatkulin et al., 2019).



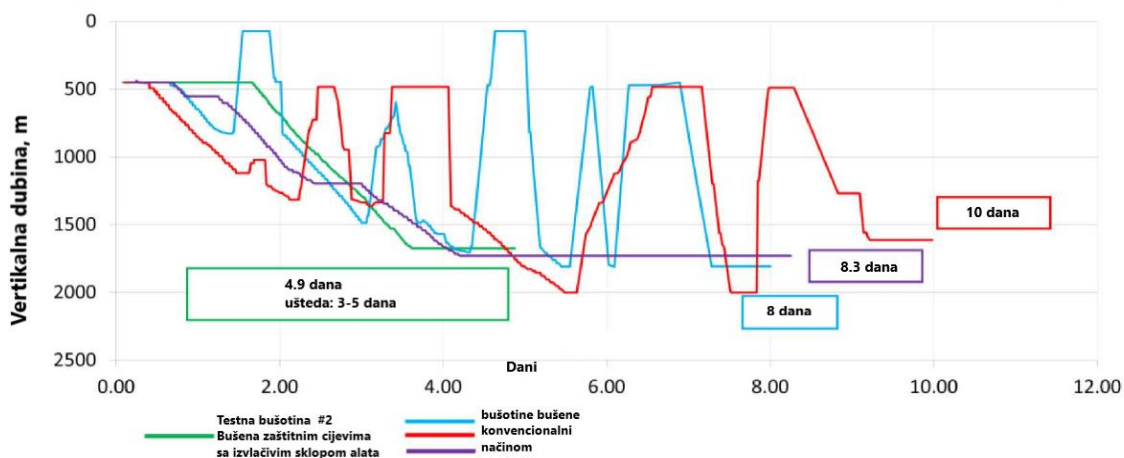
Slika 4-2. Usporedba primijenjenih motora na dvije testne bušotine (Fatkulin et al., 2019)



**Slika 4-3.** Sklop alata na dnu pri usmjerenom bušenju uz primjenu zaštitnih cijevi u testnim bušotinama na polju Labaganskoe (Fatkulin et al., 2019)

#### 4.2.2. Rezultati testnih bušotina

Sve tri testne bušotine izbušene su uspješno s metodom usmjerenog bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi. Pokazane su prednosti bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi u problematičnim glinovitim stijenama. Eliminacijom neproduktivnog vremena u vidu obljepljivanja i zaglave alata, te manevara s bušačim alatom u smislu proširivanje kanala zbog suženja, uštedjelo se je gotovo 3 dana u ukupnom vremenu izrade bušotine (slika 4-4). Optimizacijom sklopa alata na dnu nakon prve bušotine zbog problema s napretkom dlijeta postignuti su zadovoljavajući rezultati. Zaštitne cijevi postavljene su na ciljanoj dubini bez problema s prihvatom ili nepotpunim čišćenjem dna (Fatkulin et al., 2019).



**Slika 4-4.** Usporedba neproduktivnog vremena dobivenog konvencionalnim načinom bušenja u odnosu na bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi (Fatkulin et al., 2019)

## 5. ZAKLJUČAK

Bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi kao relativno nova tehnologija našla je svoju primjenu u naftnoj industriji. Danas neizostavan način bušenja na nekim poljima pokazao se kao djelotvorno rješenje u bušenju problematičnih naslaga, eliminirajući probleme nastale pri korištenja konvencionalnog alata. Zaštitne cijevi kao veza između dlijeta i vrha bušotine našle su svoje mjesto u svakom aspektu modernog bušenja i razvoju posebnih tehnologija samo za bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi. Primjena kolone zaštitnih cijevi pri bušenju danas je najveća alternativa konvencionalnom bušenju, osim što ostvaruje velike uštede vremena i ekonomske efekte, na nekim se primjerima pokazala kao efikasnija metoda u vidu boljega napretka dlijeta i stabilnijeg kanala bušotine. Iako je metoda bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi potaknula razvoj vršnog pogona kao zamjenu za radnu šipku, sama nije zaživjela do 90-ih godina, stoga je još uvijek u nekim aspektima limitirana dostupnom tehnologijom, iako su napravljeni veliki iskoraci u odnosu na 90-te godine prošlog stoljeća. Bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi sigurno će pronaći još veću primjenu u budućnosti pogotovo kada najveće svjetske kompanije sve više počnu razmatrati primjenu ove metode u bušenju na svojim problematičnim poljima.

## 6. LITERATURA

1. FATKULIN, S., EGOROV, P., GUMICH, D., JAMES, B., ZABUGA, S., KARIMOV, J., KONYSBEKULY, G., SMELOV, D., MERZLYAKOV, A., RYABOV, I., 2019. *The First Successful Experience of Directional Casing Drilling Technology in Timano-Pechora Region, Russia*, SPE-196784-MS, SPE Russian Technology Conference, 22-24 October, Moscow, Russia.
2. FONTENOT, K., LESSO, B., STICKER, R., WARREN, T., 2005. *Using casing to drill directional wells*.
3. FORKO, D., 2015. *Usmjereno bušenje uz primjenu zaštitnih cijevi*, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
4. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2005. *Casing drilling technology*, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol. 18, Zagreb, 19-26.
5. GRAVES, K., HERRERA, D., 2013. *Casing While Drilling Utilizing Rotary Steerable Technology In The Stag Field-Offshore Australia*, SPE 166166, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September–2 October, New Orleans, Louisiana, USA.
6. KAMP, P. A., 2018. *Design Study of an Underreamer for Casing While Drilling Operations*, Master of science thesis, Delft University of Technology, Faculty of Mechanical, Maritime and Material Engineering, Delft.
7. KERUNWA, A., ANYADIEGWU C. I. C., 2015. *Overview of the advances in casing drilling technology*, Petroleum & Coal ISSN 1337-7027, Department of Petroleum Engineering, Federal University of Technology, Owerri.
8. KRIŠTAFOR, Z., 2009 *Projektiranje zacjevljenja, za kolegij Bušenje*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

9. LI, H., GAO, D., LI, X., SUN, F., LIU, Y., 2017. *Drilling while casing extended-reach Wells-What is the limit?*, SPE-188490-MS, SPE International Petroleum Exhibition & Conference, 13-16 November, Abu Dhabi, UAE.
10. MARCK, J., VITTA, L., 2018. *The path to autonomous directional drilling*, World Oil magazine, October 2018 issue, pgs 29-34.
11. MIJIĆ, P., 2013. *Određivanje hidrauličkih otpora tijekom bušenja uz primjenu zaštitnih cijevi*, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
12. PATEL, D., THAKAR, V., PANDIAN, S., SHAH, M., SIRCAR, A., 2018. *A review on casing while drilling technology for oil and gas production with well control model and economical analysis*, School of Petroleum Technology, Pandit Deendayal Petroleum University, Gandhinagar, 382007, India.
13. PAVKOVIĆ, B., BIZJAK, R., PETROVIĆ, B., 2016. *Review of casing while drilling technology*, Underground mining engineering magazine, issue 29, 11-32.
14. SHAHIN, M., MOHAMED, I., SOFOS, P., 2018. *Casing Drilling Resulted in Slimmer Hole Design and Significant Cost Saving in the WON Field in Egypt*, SPE-192608-MS, SPE International Petroleum Exhibition & Conference, 12-15 November, Abu Dhabi, UAE.
15. WARREN, T., 2000. *Casing Drilling Application Design Considerations*, SPE-59179-MS, IADC/SPE Drilling Conference, 23-25 February, New Orleans, Louisiana.
16. WARREN, T., HOUTCHENS, B., MADELL, G., 2005. *Directional Drilling with Casing*, SPE-79914-PA, SPE Drilling & Completion, Vol. 20, Issue 01.
17. WARREN, T., TESSARI, R., HOUTCHENS, B., 2004. *Casing drilling with Retrievable Assemblies*, Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, U.S.A., 3-6 May.

18. WEATHERFORD, *Defyer™ DPA Series – Drillable casing bit*,  
URL:<https://www.weatherford.com/en/products-and-services/drilling/drilling-services/drilling-with-casing/> (04.08.2020.).
  
19. WEATHERFORD, *Weatherford's drilling-with-casing (DwC™) system*,  
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=pDUrmGILui4> (12.08.2020.).

IZJAVLJUJEM DA SAM SAMOSTALNO IZRADIO OVAJ ZAVRŠNI RAD ZNANJIMA  
STEČENIM NA RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNOM FAKULTETU KORISTEĆI SE  
NAVEDENIM REFERENCAMA.

TIN KRZNARIĆ

---

Tin Krznarić





KLASA: 402-04/20-01/131  
URBROJ: 251-70-03-20-2  
U Zagrebu, 10.09.2020.

**Tin Krznarić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

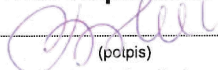
Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/131, UR.BROJ: 251-70-12-20-1 od 30.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

### PRIMJENA KOLONE ZAŠTITNIH CIJEVI U PROCESU BUŠENJA

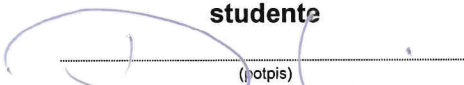
Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**Voditelj**  
  
(potpis)  
Prof. dr. sc. Zdenko Krištafor  
(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite**

  
(potpis)  
Doc. dr. sc. Vladislav Brkić  
(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i studente**

  
(potpis)  
Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek  
(titula, ime i prezime)