

# Razvoj tlakova tijekom ugušivanja bušotine bušaćom i inženjerskom metodom

---

**Grubeša, Mislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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:169:348457>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**RAZVOJ TLAKOVA TIJEKOM UGUŠIVANJA BUŠOTINE  
BUŠAĆOM I INŽENJERSKOM METODOM**

Diplomski rad

Mislav Grubeša

N 133

Zagreb, 2016.

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

**RAZVOJ TLAKOVA TIJEKOM UGUŠIVANJA BUŠOTINE  
BUŠAĆOM I INŽENJERSKOM METODOM**

Diplomski rad

Mislav Grubeša

N 133

Zagreb, 2016

**RAZVOJ TLAKOVA TIJEKOM UGUŠIVANJA BUŠOTINE BUŠAĆOM I  
INŽENJERSKOM METODOM**

Mislav Grubeša

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

Sažetak

Svi postupci kontrole tlaka oslanjaju se na rano prepoznavanje dotoka i zatvaranje bušotine kako bi se spriječio daljni dotok. Nakon zatvaranja bušotine, pristupa se ugušivanju bušotine različitim metodama, najčešće bušaćom ili inženjerskom metodom kontrole tlaka. Poznate su prednosti i nedostaci obje metode, sa bušaćom metodom se može započeti odmah nakon očitavanja tlakova, dok se inženjerskom metodom razvijaju manji tlakovi na ušću bušotine i u području pete kolone. Razvoj tlakova tijekom ugušivanja može se pratiti na temelju karakterističnih očitavanja: početnog cirkulacijskog tlaka, konačnog cirkulacijskog tlaka i tlaka na ušću bušotine. Izrađenim modelom izračunati su karakteristični tlakovi u ovisnosti o hodovima pumpe nakon zatvaranja bušotine. Izrađeni model uz nekoliko pretpostavki potvrđuje razvoj manjih tlakova tijekom provedbe inženjerske metode. U stvarnosti, to ne mora nužno biti slučaj.

Ključne riječi: Kontrola tlaka, bušaća metoda, inženjerska metoda, ugušivanje, razvoj tlakova.

Diplomski rad sadrži: 42 stranice, 1 tablicu, 15 slika, 1 prilog i 9 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

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

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

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

Dr.sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Datum obrane: 05. veljače 2016.

**PRESSURE PROFILE DURING DRILLER'S AND WAIT & WEIGHT WELL  
KILL METHOD**

Mislav Grubeša

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

Abstract

Well killing methods rely on early kick detection and shutting in the well to prevent any further influx into wellbore. When the well is shut in, appropriate well kill method is selected, most commonly, driller's method or wait & weight method. Advantages and disadvantages of both methods are known, well kill procedure using driller's method can start immediately, while using wait & weight method lower pressure in the annulus are developed. Pressure profile can be tracked with characteristic pressures during well kill procedure: initial circulation pressure, final circulation pressure and casing pressure. Characteristic pressures are calculated using pressure model for well kill procedures, with few assumptions. Pressure model confirms lower casing pressures during wait & weight method, while in real situation, that does not have to be case.

Keywords: Well control, driller's method, wait & weight method, well kill, pressure profile.

Thesis contains: 42 pages, 1 table, 15 figures, 1 appendix and 9 references

Original in: Croatian

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

Mentor: PhD. Zdenko Krištafor, Full Professor

Reviewers: PhD. Zdenko Krištafor, Full Professor

PhD. Nediljka Gaurina-Medimurec, Full Professor

PhD. Borivoje Pašić, Assistant Professor

Date of defense: February 5th, 2016.

Sadržaj:

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	1
<b>2</b>	<b>UZROCI DOTOKA</b> .....	3
2.1	Nedovoljna gustoća isplake .....	4
2.2	Smanjenje hidrostatičkog tlaka uzrokovano manevrom .....	4
2.3	Klipovanje.....	5
2.3.1	Klipovanje tijekom izvlačenja alata .....	6
2.3.2	Hidraulički udar tijekom spuštanja alata .....	7
2.4	Gubitak dinamičke komponente tlaka na dno bušotine.....	7
2.5	Slojevi s abnormalnim tlakom .....	7
2.6	Bušenje kroz plinske leće.....	8
2.7	Prevelike brzine bušenja kroz plinonosne naslage .....	8
<b>3</b>	<b>POKAZATELJI DOTOKA</b> .....	9
3.1	Povećanje mehaničke brzine bušenja.....	10
3.2	Povećanje torzije i natega.....	10
3.3	Povećanje oblika i veličine krhotina.....	11
3.4	Povećanje temperature isplake na izlazu iz bušotine .....	11
3.5	Smanjenje vrijednosti d-eksponenta .....	12
<b>4</b>	<b>METODE UGUŠIVANJA BUŠOTINE</b> .....	14
4.1	Bušaća metoda.....	17
4.2	Inženjerska metoda.....	22
<b>5</b>	<b>RAZVOJ TLAKOVA TIJEKOM UGUŠIVANJA</b> .....	25
5.1	Korišteni podaci za proračun razvoja tlakova .....	25
5.1.1	Primjer proračuna .....	28
5.2	Razvoj tlakova tijekom bušaće metode.....	30
5.2.1	Prva cirkulacija bušaće metode .....	30

5.2.2	Druga cirkulacija bušaće metode.....	32
<b>5.3</b>	<b>Razvoj tlakova tijekom provođenja inženjerske metode .....</b>	<b>34</b>
<b>5.4</b>	<b>Usporedba tlakova bušaće i inženjerske metode.....</b>	<b>36</b>
<b>5.5</b>	<b>Odstupanja od realnog modela.....</b>	<b>37</b>
<b>5.6</b>	<b>Specifičnosti ugušivanja zakrivljenih bušotina .....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>42</b>

Popis slika:

<b>Slika 2-1.</b> Prikaz klipnog efekta. ....	6
<b>Slika 3-1.</b> Grafički prikaz temperature isplake na izlazu iz bušotine prilikom bušenja sloja s povećanim tlakom, podaci s Sjevernog mora. ....	11
<b>Slika 4-1.</b> Pojednostavljeni način prikaza komunikacije između bušačkog niza i prstenastog prostora – U-cijev. ....	16
<b>Slika 4-2.</b> Razvoj tlakova tijekom prve cirkulacije bušaće metode. ....	19
<b>Slika 4-3.</b> Razvoj tlakova tijekom druge cirkulacije bušaće metode. ....	21
<b>Slika 4-4.</b> Razvoj tlakova na bušačim šipkama tijekom inženjerske metode. ....	23
<b>Slika 4-5.</b> Razvoj tlakova na ušću tijekom inženjerske metode. ....	24
<b>Slika 5-1.</b> Prikaz bušotine s osnovnim podacima korištenim pri računanju tlakova tijekom ugušivanja. ....	26
<b>Slika 5-2.</b> Prikaz bušotine s osnovnim podacima korištenim za primjer računanja tlakova na ušću bušotine tijekom ugušivanja bušačom metodom. ....	29
<b>Slika 5-3.</b> Tlak na bušačim šipkama tijekom prve cirkulacije bušaće metode. ....	30
<b>Slika 5-4.</b> Tlak na ušću bušotine tijekom prve cirkulacije bušaće metode. ....	31
<b>Slika 5-5.</b> Tlak na bušačim šipkama tijekom druge cirkulacije bušaće metode. ....	32
<b>Slika 5-6.</b> Tlak na ušću bušotine tijekom druge cirkulacije bušaće metode. ....	33
<b>Slika 5-7.</b> Tlak na bušačim šipkama tijekom inženjerske metode. ....	34
<b>Slika 5-8.</b> Tlak na ušću bušotine tijekom inženjerske metode. ....	35



Popis tablica:

**Tablica 5-1.** Usporedba tlakova na ušću bušotine tijekom ugušivanja ..... 36

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA:

<u>Oznaka</u>	<u>Značenje</u>	<u>Jedinica</u>
d	- d-eksponent	[-]
D	- promjer dlijeta	[m]
g	- ubrzanje sile teže	[m/s <sup>2</sup> ]
h <sub>d</sub>	- visina stupca doteklog fluida	[m]
KOP <sub>MD</sub>	- mjerena dubina točke skretanja	[m]
KOPTC	- cirkulacijski tlak u točki skretanja	[bar]
KOP <sub>VD</sub>	- vertikalna dubina točke skretanja	[m]
MD <sub>buš</sub>	- mjerena dubina bušotine	[m]
N	- broj okretaja dlijeta	[s <sup>-1</sup> ]
n	- broj hodova pumpe	[hod]
p <sub>hbs</sub>	- hidrostatski tlak isplake u bušaćim šipkama	[bar]
p <sub>hd</sub>	- hidrostatski tlak doteklog fluida	[bar]
p <sub>hds</sub>	- tlak na dubini sredine doteklog fluida	[bar]
p <sub>hpp</sub>	- hidrostatski tlak isplake u prstenastom prostoru	[bar]
p <sub>i</sub>	- tlak na dno bušotine nakon zatvaranja	[bar]
p <sub>sl</sub>	- slojni tlak	[bar]
p <sub>TBŠZ</sub>	- tlak na bušaćim šipkama nakon zatvaranja	[bar]
p <sub>TCK</sub>	- konačni cirkulacijski tlak	[bar]
p <sub>TCP</sub>	- početni cirkulacijski tlak	[bar]
p <sub>TCS</sub>	- smanjeni tlak cirkulacije	[bar]
p <sub>TUBZ</sub>	- tlak na ušću bušotine nakon zatvaranja	[bar]
R	- mehanička brzina bušenja	[m/hr]

$T_{hd}$	- temperatura na dubini sredine dotoka	[K]
$T_i$	- temperatura na dnu bušotine	[K]
TVD	- stvarna vertikalna dubina ( <i>engl. true vertical depth</i> )	[m]
TVD <sub>d</sub>	- dubina sredine dotoka	[m]
$V_d$	- korigirani volume dotoka obzirom na temperaturu	[dm <sup>3</sup> ]
$V_i$	- volumen doteklog fluida, povećanje u bazenima	[dm <sup>3</sup> ]
$V_p'$	- kapacitet hoda pumpe	[dm <sup>3</sup> ]
$V_{pp}'$	- jedinični volumen prstenastog prostora	[dm <sup>3</sup> /m]
W	- opterećenje na dlijeto	[kg]
$\rho_i$	- gustoća isplake korištene tijekom bušenja	[kg/dm <sup>3</sup> ]
$\rho_{kmw}$	- gustoća otežane isplake za ugušivanje	[kg/dm <sup>3</sup> ]

# 1 UVOD

Istraživanje i eksploatacija nafte i plina, osim u pogledu poslovanja, nose rizik i u pogledu sigurnosti. Izrada bušotina predstavlja opasnost za ljude, opremu i okoliš. Stoga, kontrola tlaka u bušotini (*engl. well control*) predstavlja veoma važan aspekt tijekom bušenja. Kontrola tlaka podrazumjeva sve procese koji osiguravaju bušotinu i vraćaju ju u režim statičke stabilnosti. Svaka pogreška u procesu može dovesti do dotoka slojnih fluida u kanal bušotine, a zatim, ako se ne reagira pravilno i pravovremeno, i do nekontroliranog izbacivanja fluida iz bušotine, tj. erupcije, koje imaju katastrofalne posljedice. Naftna industrija prepoznala je potrebu za uvođenjem tečajeva kontrole tlaka u bušotini koji je obvezatan za sve odgovorne osobe na bušačim postrojenjima i koji se periodički mora obnavljati.

Kontrola tlaka u bušotini razmatra se kroz dvije osnovne kategorije, odnosno pojma:

- **Primarna kontrola tlaka**

U klasičnom načinu bušenja (*engl. overbalance*) primarna kontrola tlaka u bušotini definirana je kao proces kojim se održava hidrostatički tlak u bušotini većim od tlaka sloja, no manjim od tlaka frakturiranja. Ukoliko je hidrostatički tlak manji od tlaka sloja, slojni fluid će dotjecati u bušotinu što se naziva dotokom. Ako je tlak u bušotini veći od tlaka frakturiranja može doći do gubitka isplake u sloj, što uzrokuje smanjenje stupca isplake i mogućnost dotoka.

- **Sekundarna kontrola tlaka**

Ukoliko dođe do dotoka slojnog fluida u bušotinu preventeri se moraju zatvoriti u najkraćem mogućem vremenu kako bi se spriječilo dodatno dotjecanje slojnog fluida u kanal bušotine i, kao najnepovoljniji slučaj, nekontrolirano izbacivanje isplake iz bušotine (erupcija).

Preventeri moraju omogućiti zatvaranje bušotine u svim situacijama, s bušačim alatom u bušotini ili bez alata. Također, moraju biti u mogućnosti omogućiti kretanje bušačeg alata u bušotini pod tlakom i u krajnoj mjeri odrezati bušači alat. Kako bi se bušotina mogla dovesti

u stanje primarne kontrole tlaka preventeri još moraju omogućiti i provedbu različitih metoda uklanjanja doteklog slojnog fluida iz bušotine i ugušivanja.

Svrha sekundarne kontrole tlaka tijekom postupka ugušivanja je:

1. dovođenje doteklog fluida do površine;
2. održavanje konstantnog tlaka na dno bušotine.

Posljedica dotoka je izgubljeno vrijeme u kojem bušaće postrojenje ne radi, rizične operacije u bušotini u kojoj je prisutan plin pod povećanim tlakom, te mogući gubitak opreme (od zaglave bušaćih alatki do gubitka postrojenja) tijekom pokušaja da se ponovno uspostavi kontrola nad bušotinom.

U ovom radu predstavljen je razvoj teoretskih tlakova tijekom ugušivanja bušotine dvjema najčešće korištenim metodama, bušaćom i inženjerskom metodom ugušivanja bušotine. Izračunati tlakovi u radu su ostvareni u bušotini s isplakom na vodenoj bazi.

## 2 UZROCI DOTOKA

Dotok (*engl. kick, influx*) se definira kao svaki neželjni utok slojnih fluida u kanal bušotine, koji se javlja kada uvjet primarne kontrole tlaka nije zadovoljen tj. kao posljedica negativnog diferencijalnog tlaka na dno bušotine.

Uzroci dotoka su sljedeći (Aberdeen Drilling Schools, 2002):

- nedovoljna gustoća isplake;
- smanjenje hidrostatičkog tlaka zbog smanjenja stupca isplake u bušotini;
- klipovanje (*engl. swabbing*);
- gubitak dinamičke komponente tlaka na dno bušotine;
- slojevi s povećanim tlakom (*engl. abnormal pressured formations*);
- bušenje kroz plinonosne slojeve;
- gubitak cirkulacije.

Svaki od gore navedenih uzroka može dovesti do erupcije ukoliko se bušotina ne zatvori na vrijeme, bilo ljudskom greškom ili zbog neispravne ili neodgovarajuće opreme.

Svaki dotok zahtjeva poduzimanje određenih mjera kako bi se bušotina vratila u stanje primarne kontrole tlaka. Kada se ustanovi ili se sumnja na dotok, bušotinu je potrebno što prije moguće zatvoriti kako bi se smanjio volumen dotoka. Dotok plina je puno opasniji od dotoka slojne vode i nafte jer plin ekspandira prilikom migracije prema površini i ostvaruje znatno veći tlak na dno bušotine. Slojna voda i nafta imaju gustoću približne vrijednosti gustoći isplake, i što je važnije, ne ekspandiraju tijekom protiskivanja prema površini čime je njihovo čišćenje iz kanala bušotine jednostavnije, i uz manje tlakove.

## **2.1 Nedovoljna gustoća isplake**

Gustoća isplake koja se koristi tijekom bušenja u skladu je s očekivanim najvećim tlakom u sloju. Gustoću isplake potrebno je mjeriti na ulazu i izlazu iz bušotine u intervalima ne dužim od 15 min (Amak Petroleum, Well Control Manual 2013). Malo smanjenje gustoće neće uzrokovati dotok jer je nepisano pravilo da se tijekom bušenja koristi isplaka gustoće koja će ostvarivati 5 – 10 bara veći tlak od očekivanog. Smanjenje gustoće isplake zbog dotoka razlikuje se ovisno o fluidu koji je dotekao. Plin, nafta ili slojna voda neće uzrokovati isto smanjenje gustoće.

Dotok plina može se prepoznati po zaplinjenoj isplaci. Isplaka na površini može biti zaplinjena iako je tlak na dno bušotine veći od tlaka sloja. Plin u isplaci najčešće potječe iz nabušenih krhotina koje se tijekom cirkulacije kreću prema površini, u područja sve manjeg tlaka. Upravo to smanjenje tlaka omogućava oslobađanje i ekspanziju plina, te smanjenje tlaka stupca isplake na dno bušotine. Povećana razina u bazenima siguran je znak dotoka. Bušotinu je potrebno što prije zatvoriti kako bi se spriječio daljni dotok i primjenila odgovarajuća metoda ugušivanja.

Nafta i slojna voda također mogu ući u isplaku iz nabušenih krhotina, ali rijetko će se ostvariti dovoljno veliki pad tlaka da dođe do dotoka. Budući da i nafta i slojna voda imaju gustoću ne toliko manju, kao plin, od gustoće isplake, njihov utjecaj na smanjenje gustoće je znatno manji nego kod ulaska plina u isplaku.

## **2.2 Smanjenje hidrostatičkog tlaka uzrokovano manevrom**

Jedan od najčešćih uzroka dotoka uzrokovanog ljudskom greškom je smanjenje hidrostatičkog tlaka prilikom vađenja alata. Tijekom vađenja alata iz bušotine smanjenje nivoa isplake u prstenastom prostoru odgovara volumenu izvađenog alata. Ako se bušotina pravilno ne nadopunjava isplakom, doći će do pada hidrostatičkog tlaka, zbog smanjenja nivoa isplake. Bušotinu je potrebno nadopunjavati kako se hidrostatički tlak ne bi smanjio na veličinu manju od slojnog tlaka.

Za točno nadopunjavanje bušotine važno je osigurati zavoreni sustav. Spremnikom za nadopunjavanje bušotine (*engl. trip tank*) može se mjeriti količina isplake za nadopunjavanje tijekom izvlačenja i istisnute isplake tijekom spuštanja alata. Spremnik za punjenje bušotine

omogućuje točno mjerenje volumena, a promjene volumena treba redovito provjeravati. Uobičajena tolerancija pada nivoa u bušotini je 30 m, tj. nivo isplake se ne smije spustiti više od 30 m ispod ušća bušotine (Crosco, 2014).

Tijekom vađenja alata potrebno je poznavati dvije vrijednosti:

- teoretski volumen isplake za nadopunjavanje;
- stvarni volumen isplake za nadopunjavanje bušotine.

Usporedbom stvarnih i potrebnih volumena može se utvrditi ponašanje bušotine tijekom manevra. Ako je stvarni volumen isplake za nadopunjavanje bušotine manji od teoretskog, došlo je do dotoka slojnog fluida u kanal bušotine. Stvarni volumen isplake za nadopunjavanje bušotine manji je od teoretskog iz razloga što volumen slojnog fluida zauzima dio kanala bušotine. Ako je stvarni volumen isplake za nadopunjavanje bušotine veći od teoretskog, znači da je došlo do gubitka isplake u sloj (Crosco, 2014).

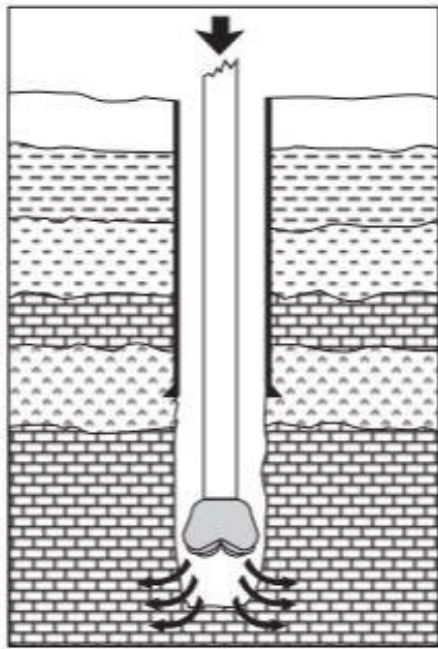
### **2.3 Klipovanje**

Klipni efekt uzrokuje privremeno smanjenje ili povećanje tlaka na dno bušotine tijekom manevra. Klipni efekt može nastati prilikom izvlačenja ili spuštanja bušaćeg alata (Slika 2-1).

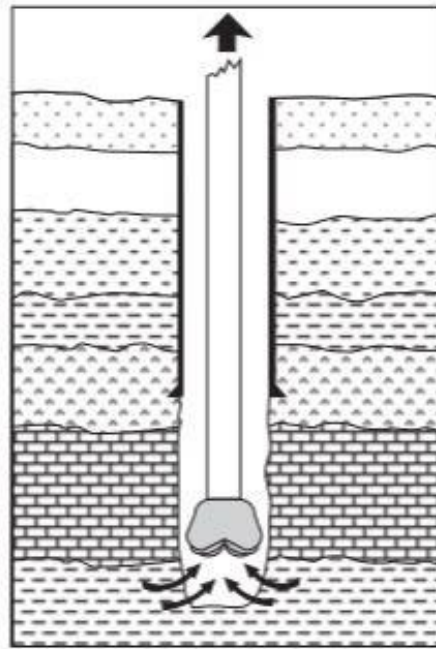
Prilikom svakog izvlačenja ili spuštanja bušaćeg alata doći će do promjene tlaka na dno bušotine. Promjenu tlaka uzrokuje trenje između niza bušaćih alatki i isplake, ili smanjeni zazor između niza bušaćih alatki i stijenki kanala bušotine, npr. obljepljeni niz bušaćih alatki. Na promjenu tlaka tijekom klipovanja utječu (Aberdeen Drilling Schools, 2002):

- brzina izvlačenja bušaćih alatki;
- reološka svojstva isplake;
- viskoznost isplake;
- geometrijski oblik kanala bušotine.





Klipovanje tijekom  
spuštanja alata  
(hidraulički udar)



Klipovanje tijekom  
izvlačenja alata

**Slika 2-1.** Prikaz klipnog efekta (Aberdeen Drilling Schools, 2002).

### 2.3.1 Klipovanje tijekom izvlačenja alata

Ako se klipni efekt dogodi tijekom izvlačenja bušačkog alata iz bušotine (*engl. swabbing*), tlak na dno bušotine će se privremeno smanjiti. Za vrijeme svakog izvlačenja bušačkog alata doći će do promjene tlaka na dno bušotine. Do dotoka će doći ukoliko se tlak na dno bušotine smanji na vrijednost manju od slojnog tlaka. Za osiguravanja nadtlaka koristi se sigurnosni faktor (*engl. trip margin*). Sigurnosni faktor je povećanje gustoće isplake koje osigurava nadtlak tijekom manevra.

Klipovanje se lako može ustanoviti pravilnim nadopunjavanjem bušotine tijekom manevra. Ako je potreban manji volumen isplake za nadopunjavanje bušotine od teoretskog, dio volumena bušotine popunio je dotekli slojni fluid.

### 2.3.2 Hidraulički udar tijekom spuštanja alata

Ako do klipnog efekta dođe tijekom spuštanja alata u bušotinu (*engl. surging*), doći će do gubitka isplake u formaciju ili frakturiranja sloja, ovisno o ostvarenom povećanju tlaka na dno. Preveliki porast tlaka može izazvati frakturu u sloju što uzrokuje dodatno gubljenje isplake u sloj. S većim gubicima isplake u sloj smanjuje se i nivo isplake u kanalu bušotine, shodno tome i tlak na dno bušotine što može izazvati dotok.

## 2.4 Gubitak dinamičke komponente tlaka na dno bušotine

Usljed cirkulacije, zbog otpora pri protjecanju, dolazi do pada tlaka u prstenastom prostoru bušotine što rezultira povećanim tlakom na dno bušotine. Tlak na dno bušotine tijekom cirkulacije ima vrijednost koja je jednaka zbroju hidrostatskog tlaka i pada tlaka uslijed otpora protjecanja u prstenastom prostoru. Ostvareni tlak u dinamičkim uvjetima izražava se ekvivalentnom gustoćom cirkulirajuće isplake (*engl. equivalent circulating density - ECD*), koja bi ostvarivala isti tlak u statičkim uvjetima. Ako se buši u uvjetima malog nadtlaka svaki prestanak cirkulacije može dovesti do dotoka slojnog fluida u kanala bušotine.

## 2.5 Slojevi s abnormalnim tlakom

Smatra se da su slojevi pod normalnim tlakom ako je gradijent pornog tlaka jednak gradijentu tlaka slojne vode u iznosu od 0,0981 – 0,105 bar/m (Aberdeen Drilling Schools, 2002). Granica od 0,105 bar/m smatra se gornjom granicom normalnog slojnog tlaka, odnosno donjom granicom povećanog slojnog tlaka. Iako abnormalni slojni tlak može biti manji ili veći od normalnog, u terminologiji je uvriježeno da se za slojeve s abnormalnim tlakom smatra one u kojima je tlak veći od normalnog.

Znakovi koji tijekom bušenja ukazuju na slojeve s povećanim tlakom su sljedeći (Aberdeen Drilling Schools, 2002):

- povećana brzina bušenja;
- povećane dimenzije krhotina;
- povećana temperatura isplake na izlazu iz bušotine;
- povećana pojava plina tijekom bušenja (*engl. background gas*).

Do dotoka može doći tijekom bušenja kroz propusne slojeve s abnormalnim tlakom. Za održavanje primarne kontrole, i sprječavanje dotoka, važno je na vrijeme prepoznati znakove i povećati gustoću isplake. Ako je propusnost sloja mala, slojni fluid sporije dotječe te se dotok ne smatra značajnim i opasnim. Sloj male propusnosti s abnormalnim tlakom može se bušiti u uvjetima podtlaka ako je u cilju povećanje brzine bušenja.

## **2.6 Bušenje kroz plinske leće**

Plinske leće se nalaze relativno plitko i ne sadrže veće količine plina. Plin iz leća napreduje velikom brzinom prema površini bez jasnih znakova, ostavljajući bušačem osoblju (*engl. rig crew*) malo vremena za reakciju. Jedini pokazatelj koji dovoljno rano ukazuje na dotok plina iz leća je mjerač protoka na izlazu bušotine. Prilikom nailaska na plinsku leću bušotina se ne zatvara zbog rizika od stvaranja frakture u području pete kolone, koja bi omogućila migraciju plina s vanjske strane kolone. Dotekli plin se preusmjerava kroz diverter, onemogućavajući veliki porast tlaka na dno bušotine da izazove frakturu. Statistički, plinske leće su, odmah nakon podzemnih erupcija, vodeći uzroci katastrofa tijekom bušenja, pogotovo pri bušenju u odobalju (*engl. offshore*).

## **2.7 Prevelike brzine bušenja kroz plinonosne naslage**

Tijekom bušenja slojeva s plinom, krhotine koje isplaka iznosi prema površini dolaze u područje manjeg tlaka i dolazi do oslobađanja plina iz krhotina u isplaku. Oslobođeni plin uzrokuje smanjenje gustoće isplake. Intenzitet smanjenja gustoće isplake ovisit će o brzini bušenja, poroznosti i propusnosti formacije. Male količine plina mogu prouzročiti veliko smanjenje gustoće zbog ekspanzije plina tijekom cirkulacije. Da bi se spriječilo daljnje smanjenje gustoće, isplaku je potrebno otplinjavati koristeći separator za otplinjavanje isplake (*engl. poor-boy degaser*).

### 3 POKAZATELJI DOTOKA

Rano uočavanje dotoka od krucijalne je važnosti za sigurnost ljudi, opreme i bušotine. Ako se dotok ne prepozna na vrijeme, u kanal bušotine će doći veći volumen slojnog fluida što će uzrokovati razvoj velikih tlakova tijekom saniranja i ugušivanja dotoka.

Pokazatelje dotoka može se podijeliti na izravne i neizravne. Izravni se najprije uočavaju i kako bi se potvrdio dotok potrebno je zaustaviti bušenje i izvršiti kontrolu dotoka (*engl. flow check*). Izravni pokazatelji su prije svega (Aberdeen Drilling School, 2002):

- povećanje izlaznog protoka isplake koji se registrira uređajem za kontrolu protoka (*engl. flowmeter*);
- povećanje razine u isplačnim bazenima;
- prelijevanje kroz bušaće šipke tijekom dodavanja ili na izljevnoj cijevi kad su pumpe isključene.

Neizravni pokazatelji dotoka su brojni i može ih se potvrditi često posredno ili nakon određenog vremena od početka samog dotoka (Aberdeen Drilling School, 2002):

- povećanje mehaničke brzine bušenja (*engl. rate of penetration*);
- povećanje natega i torzije;
- promjena oblika i veličine krhotina;
- povećanje temperature isplake na izlazu iz bušotine;
- smanjenje veličine d-eksponenta;
- prelijevanje iz bušotine;
- smanjenje izlazne gustoće isplake;
- povećanje težine bušaćeg alata na indikatoru težine;
- povećanje broja hodova isplačne pumpe.

### **3.1 Povećanje mehaničke brzine bušenja**

Uobičajeno je da bušenjem uz održavanje konstantnih parametara režima bušenja (broj okretaja, opterećenje na dlijeto, dobava isplake) dolazi do smanjenja brzine bušenja zbog trošenja dlijeta. Povećanje mehaničke brzine bušenja upućuje na promjenu vrste stijene koja se buši ili na smanjenje diferencijalnog tlaka kojeg isplaka ostvaruje na sloj. Smanjenjem diferencijalnog tlaka tj. gubitkom nadtlaka smanjuje se i sila kojom hidrostatički tlak isplake pritišće krhotine prema dnu bušotine (*engl. chip hold down effect*). Ako se isplaka ne oteža, ulaskom u sloj s tlakom koji je veći od očekivanog, može doći do dotoka zbog gubitka nadtlaka. Takavi dotoci mogu biti manjeg volumena i teško ih je otkriti prilikom cirkulacije jer dinamička komponenta tlaka još uvijek je dostatna za održavanje slojnog tlaka pod kontrolom. U tom slučaju će doći do značajnijeg dotoka tek kada pumpe prestanu raditi, npr. prilikom izvlačenja niza bušaćih alatki.

Postupno i konstantno povećanje mehaničke brzine bušenja je dobar pokazatelj da dlijeto ulazi u prijelaznu zonu. Naglo povećanje brzine bušenja ukazuje na ulazak u naslage s povećanim slojnim tlakom i bušenje u uvjetima podtlaka.

### **3.2 Povećanje torzije i natega**

Povećanje torzije i natega se primjećuje prilikom bušenja sloja s povećanim slojnim tlakom. Do povećanja dolazi zbog smanjenja promjera kanala bušotine, kao i zbog povećanja količine krhotina kao posljedica veće mehaničke brzine bušenja. U slojevima s abnormalnim tlakom, formacija se fizički širi prema kanalu bušotine zbog premalog tlaka koji ostvaruje isplaka. Zbog malog zazora između kanala bušotine i dubinskog bušaćeg sklopa (*engl. bottomhole assembly - BHA*), uz širenje formacije i suženje kanala bušotine, dolazi do povećanja trenja što se na površini očituje kao povećanje natega i torzije.

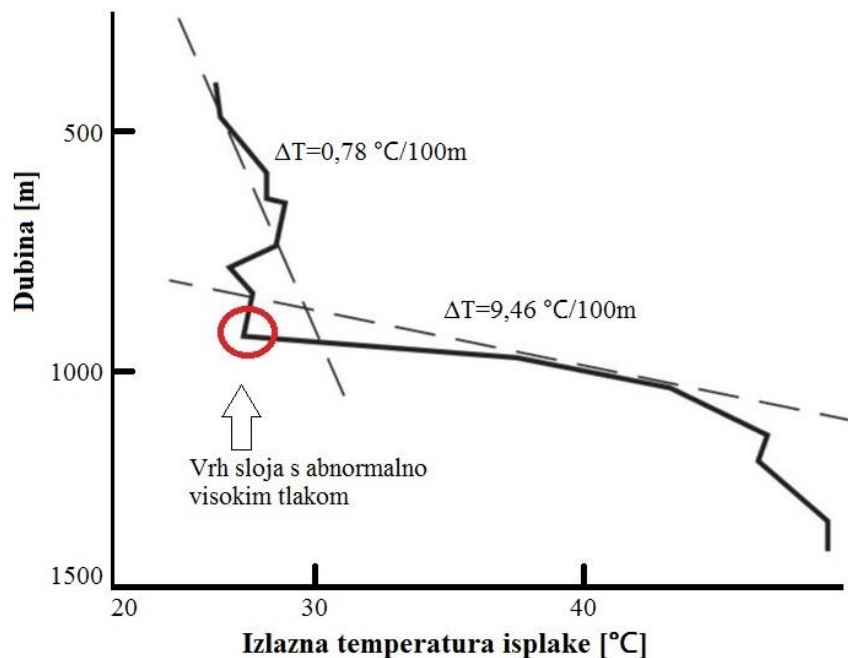
Povećanje natega i torzije može značiti i nestabilnost kanala bušotine (Aberdeen Drilling School, 2002).

### 3.3 Povećanje oblika i veličine krhotina

U prijelaznim zonama i slojevima s povećanim slojnim tlakom, najčešće šejlovima, stijene se odlamaju zbog uvjeta podtlaka (porni tlak veći od hidrostatskog). Tijekom bušenja kroz slojeve s normalnim tlakom krhotine će biti manjih dimenzija s zaobljenim rubovima dok će krhotine iz slojeva s abnormalnim tlakom biti duže s oštrijim i nepravilnijim rubovima.

### 3.4 Povećanje temperature isplake na izlazu iz bušotine

Temperatura povratne isplake će naglo porasti prilikom ulaska u prijelaznu zonu. Slojevi s abnormalnim tlakom u pravilu imaju veći temperaturni gradijent od slojeva s normalnim tlakom. Temperaturni gradijent je znatno manji u slojevima koji se nalaze iznad sloja s povećanim tlakom. Grafički prikaz razlike temperature isplake uzrokovane različitim temperaturama slojeva (Slika 3-1) može dati vrlo jasan znak nailaska na sloj s povećanim tlakom.



**Slika 3-1.** Grafički prikaz temperature isplake na izlazu iz bušotine prilikom bušenja sloja s povećanim tlakom, podaci sa Sjevernog mora (Aberdeen Drilling School, 2002)

### 3.5 Smanjenje vrijednosti d-eksponenta

Korištenjem metode d-eksponenta može se dobiti očekivana, normalna mehanička brzina bušenja uz poznate parametre bušenja. Naglo smanjenje d-eksponenta označuje ulazak u prijelaznu zonu i vjerojatnost nailaska na sloj s abnormalnim tlakom. D-eksponent se računa koristeći sljedeću formulu (Aberdeen Drilling School, 2002):

$$d = \frac{\log\left(5,49 \times 10^{-2} \frac{R}{N}\right)}{\log\left(21,4 \frac{W}{D}\right)} \quad [-] \quad (3.1)$$

pri čemu su:

d – d-eksponent [-]

R – mehanička brzina bušenja [m/hr]

N – broj okretaja dlijeta [ $s^{-1}$ ]

W – opterećenje na dlijeto [kg]

D – promjer dlijeta [m]

D-eksponent se može korigirati obzirom na gustoću isplake, ekvivalentnu gustoću cirkulirajuće isplake, istrošenost dlijeta i tvrdoću pojednih stijena.

## Ispravak formule 3.1

Detaljnom provjerom formule 3.1 ustanovljeno je da se preuzeta formula za d-eksponent iz „Well Control: Form the Man on the Rig“, Aberdeen Drilling School and Well Control Training Center, 2002 razlikuje od izvorne formule koju su dali Jordan i Shirley 1966. godine u radu „Application of Drilling Performance Data to Overpressure Detection.“

Formula preuzeta iz Well Control: Form the Man on the Rig, Aberdeen, 2002 glasi:

$$d = \frac{\log\left(\frac{R}{60N}\right)}{\log\left(\frac{12W}{10D}\right)}$$

Izvorna formula Jordena i Shirleya u anglosaksonskim jedinicama glasi:

$$d = \frac{\log\left(\frac{R}{60N}\right)}{\log\left(\frac{12W}{10^6 D}\right)}$$

gdje su:

d – d-eksponent [-]

R – mehanička brzina bušenja (*engl. rate of penetration*) [ft/hr]

N – broj okretaja dlijeta (*engl. rotary speed*) [rpm]

W – opterećenje na dlijeto (*engl. bit load*) [lb]

D – promjer dlijeta (*engl. bit diameter*) [in]

Prevedena u SI sustav mjernih jedinica, formula Jordena i Shirleya glasi:

$$d = \frac{\log\left(a \times \frac{R}{N}\right)}{\log\left(b \times \frac{W}{D}\right)}$$

pri čemu su:

d - d-eksponent[-]

a =  $9,113442 \times 10^{-4}$

b =  $6,71365688 \times 10^{-7}$

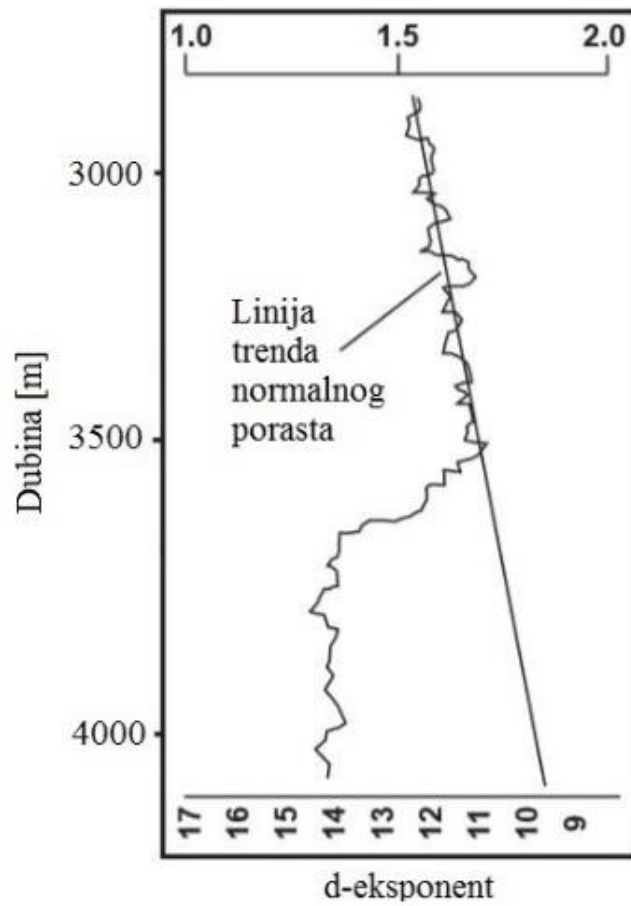
R – mehanička brzina bušenja [m/hr]

N – broj okretaja [ $s^{-1}$ ]

W – opterećenje na dlijeto [kg]

D – promjer dlijeta [m]





**Slika 3-2.** Grafički prikaz smanjenja d-eksponenta (Aberdeen Drilling School, 2002)

## 4 METODE UGUŠIVANJA BUŠOTINE

Cilj svih metoda ugušivanja je iscirkuliranje doteklog fluida i uspostavljanje cirkulacije isplake povećane gustoće, koja će osigurati primarnu kontrolu bušotine. Isplaka povećane gustoće cijelo vrijeme, bez obzira na uvjete u bušotini, treba ostvarivati tlak na dno bušotine veći od tlaka sloja iz kojeg je došlo do dotoka. Nakon uspostavljanja primarne kontrole, bušotina se može otvoriti i nastaviti s planiranim operacijama.

Ugušivanje bušotine vrši se smanjenim brojem hodova pumpe tj. smanjenom dobavom. Smanjeni tlak cirkulacije ( $p_{TCS}$ ) predstavlja otpore protjecanja u sustavu pri smanjenom broju hodova. Poželjno je zabilježiti smanjeni tlak cirkulacije kod najmanje dvije različite smanjene dobave za sve pumpe na postrojenju. Također, poželjno je tlak očitati na manometru koji će se koristiti tijekom provođenja postupka kontrole tlaka, ukoliko bude potrebno.

Više je razloga za ugušivanje smanjenom dobavom:

- smanjeni tlakovi u prstenastom prostoru, odnosno, otpori protjecanju;
- lakše otplinjavanje isplakom;
- lakša manipulacija dotokom koji prolazi kroz sapnicu;
- manja erozija sapnice;
- na raspolaganju je više vremena za otežavanje isplake.

Nakon utvrđivanja dotoka i zatvaranja bušotine, na površini se očitavaju tlakovi na bušačim šipkama i na ušću bušotine pomoću kojih se pristupa pripremi za ugušivanje bušotine.

Tlak na bušačim šipkama nakon zatvaranja ( $p_{TBŠZ}$ ) – očitavanje pokazuje razliku između slojnog tlaka i hidrostatičkog tlaka stupca isplake u bušačim šipkama.

$$p_{sl} = p_{TBŠZ} + p_{hbš} \text{ [bar]} \quad (4.1)$$

gdje su:

$p_{sl}$  – slojni tlak [bar]

$p_{TBŠZ}$  – tlak na bušačim šipkama nakon zatvaranja [bar]

$p_{hbš}$  – hidrostatički tlak isplake u bušačim šipkama [bar]

Tlak na ušću bušotine nakon zatvaranja ( $p_{TUBZ}$ ) – očitavanje pokazuje razliku između slojnog tlaka i hidrostatičkog tlaka u prstenastom prostoru.

$$p_{sl} = p_{hpp} + p_{hd} + p_{TUBZ} \text{ [bar]} \quad (4.2)$$

gdje su:

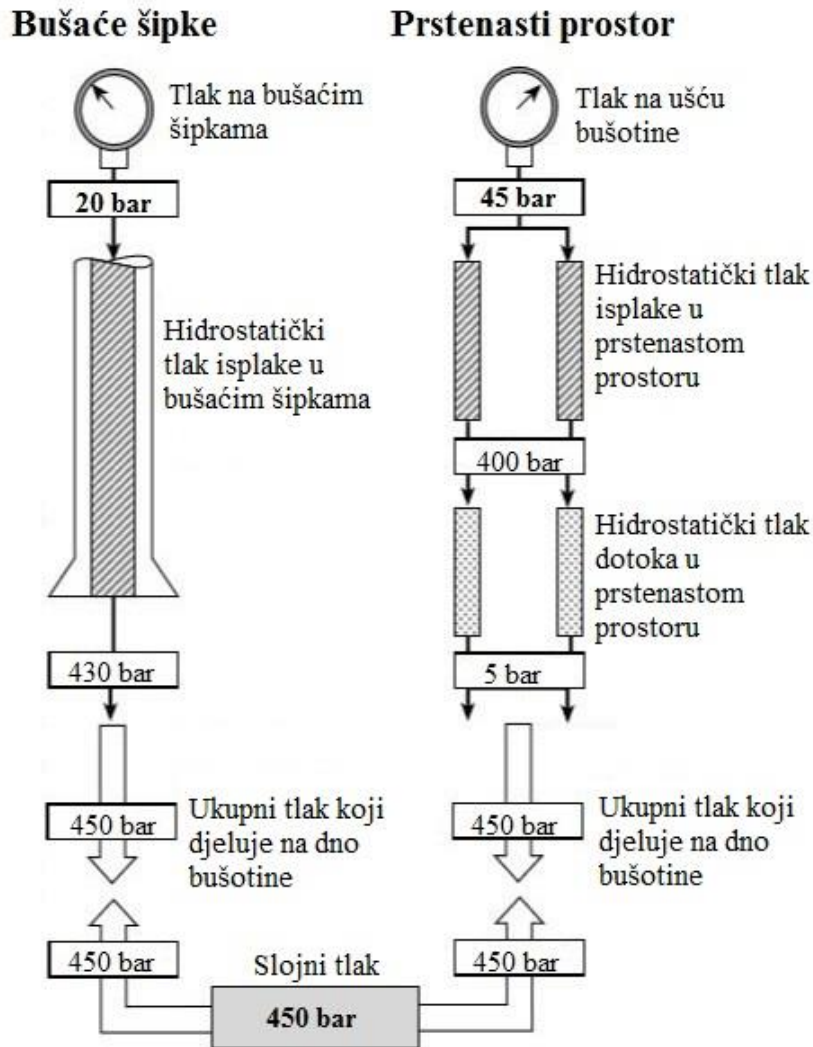
$p_{hpp}$  – hidrostatički tlak isplake u prstenastom prostoru [bar]

$p_{hd}$  – hidrostatički tlak doteklog fluida [bar]

$p_{TUBZ}$  – tlak na ušću bušotine nakon zatvaranja [bar]

Obzirom na dotekli fluid nepoznate gustoće u prstenastom prostoru, nije praktično koristiti očitavanje tlaka na ušću bušotine za određivanje gustoće isplake za ugušivanje. Isto tako nije izvjesno o kojem se fluidu radi niti koliko ga je ušlo u kanal bušotine. Zato se za proračun ugušivanja bušotine koristi očitavanje tlaka na bušaćim šipkama. Tlak na bušaćim šipkama biti će manje vrijednosti od tlaka na ušću bušotine jer se dotekli fluid manje gustoće nalazi u prstenastom prostoru. Odstupanje od ovoga može se dogoditi jedino kada se u prstenastom prostoru nalazi veća količina nabušenog materijala.

Za pojednostavljeni način prikaza odnosa tlakova u bušaćem nizu i prstenastom prostoru koristi se sustav U-cijevi (slika 4-1). Atmosferski tlak se u ovom slučaju može zanemariti jer jednako djeluje na oba dijela sustava.



**Slika 4-1.** Pojednostavljeni način prikaza komunikacije između bušaćeg niza i prstenastog prostora – U-cijev (Aberdeen Drilling School, 2002)

Nakon očitavanja tlaka na bušaćim šipkama nakon zatvaranja, može se izračunati gustoća potrebne isplake za ugušivanje.

$$\rho_{KMW} = \frac{p_{TBŠZ}}{TVD \times g \times 10^{-2}} + \rho_i \text{ [kg/dm}^3\text{]} \quad (4.3)$$

gdje su:

$\rho_{KMW}$  – gustoća otežane isplake za ugušivanje [kg/dm<sup>3</sup>]

TVD – vertikalna dubina (*engl. true vertical depth*)

$g$  – ubrzanje sile teže [m/s<sup>2</sup>]

$\rho_i$  – gustoća isplake [kg/dm<sup>3</sup>]

Ovisno o položaju i stanju bušaćeg alata u bušotini te o veličini očitanih tlakova koriste se različite metode ugušivanja bušotine:

- bušaća metoda (*engl. driller's method*);
- inženjerska metoda (*engl. wait and weight method*);
- volumetrijska metoda (*engl. volumetric method*).

#### **4.1 Bušaća metoda**

Bušaća metoda provodi se u dvije potpune cirkulacije. U prvoj cirkulaciji dotok se iz kanala bušotine uklanja postojećom isplakom, izračunava se potrebna gustoća otežane isplake za ugušivanje i priprema se otežana isplaka. U drugoj cirkulaciji postojeća isplaka se zamjenjuje otežanom isplakom kako bi se ponovo uspostavila primarna kontrola tlaka. Bušaća metoda se smatra i najjednostavnijom zbog odvojenog uklanjanja dotoka i utiskivanja otežane isplake, te jednostavnog proračuna.

Prednosti bušaće metode:

- uklanjanje dotoka može započeti odmah;
- jednostavan proračun;
- dotok se može ukloniti čak i ako na postrojenju nema dovoljno barita;
- potrebna mala količina informacija o dotoku.

Nedostaci bušaće metode:

- veći tlakovi na ušću bušotine;
- veći tlakovi u području pete kolone;
- duže vrijeme rada sa sapnicom;
- dvije cirkulacije.

## Provedba bušaće metode:

### Prva cirkulacija

Ugušivanje bušotine bušaćom metodom provodi se u dvije cirkulacije pri čemu se u prvoj cirkulaciji uklanja dotok isplakom početne gustoće kod koje je došlo do dotoka. To se čini na način da se primjenjuju sljedeći koraci:

1. Poništava se brojač hodova pumpi.
2. Uključe se pumpe uz dovođenje do željene, smanjene dobave (broja hodova). Kako bi se održao konstantan tlak na dno bušotine, tlak na ušću bušotine ( $p_{TUBZ}$ ) podesivom sapnicom se održava konstantnim čime se eliminira utjecaj otpora prtljecanju u vodu za prigušivanje (*engl. choke line friction losses*).

Računa se početni cirkulacijski tlak ( $p_{TCP}$ ):

$$p_{TCP} = p_{TCS} + p_{TBŠZ} \text{ [bar]} \quad (4.4)$$

pri čemu su:

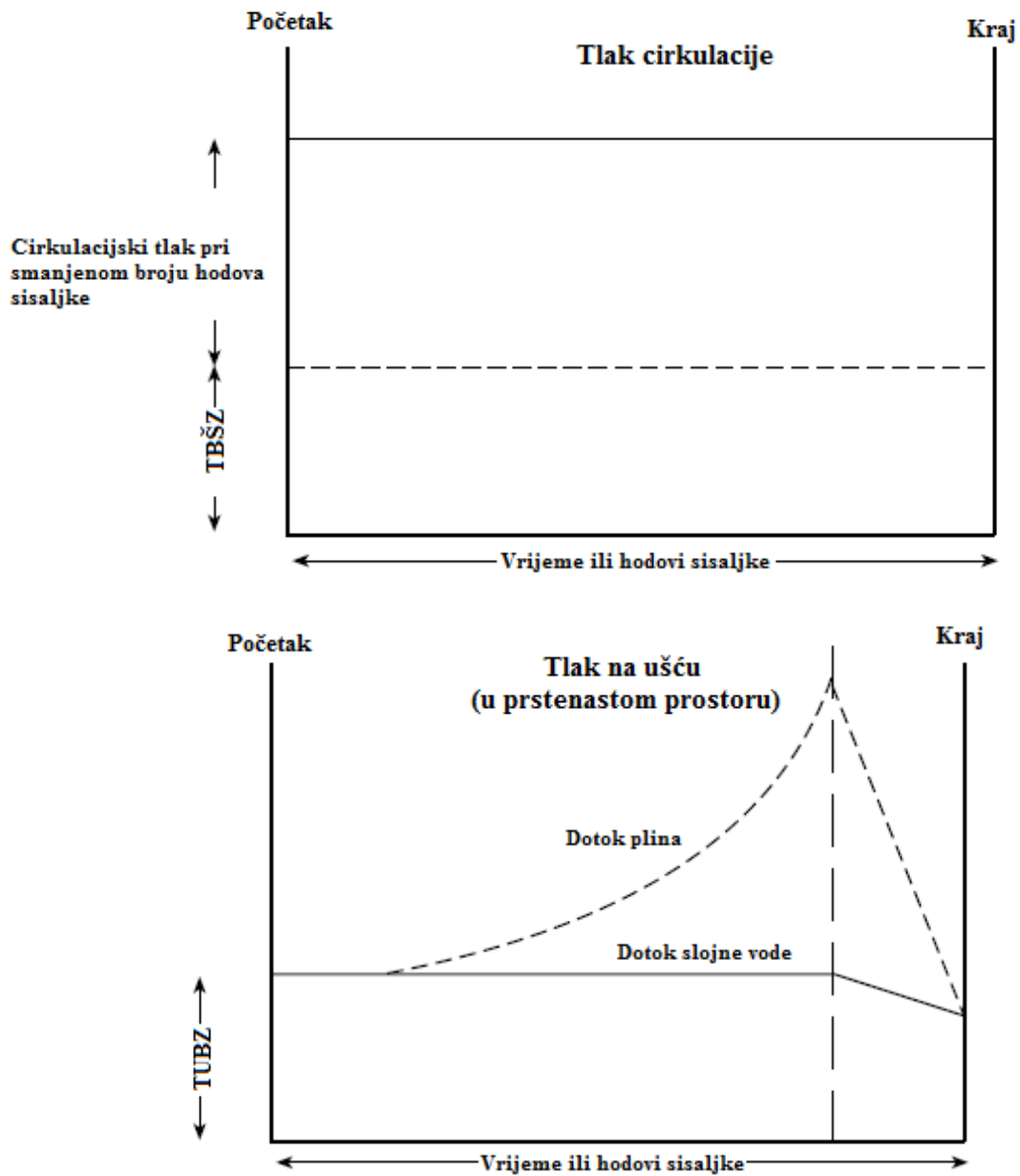
$$p_{TCP} - \text{početni cirkulacijski tlak [bar]}$$

$$p_{TCS} - \text{smanjeni tlak cirkulacije [bar]}$$

3. Nakon što su pumpe podešene na smanjeni broj hodova prelazi se na kontrolu tlaka na bušaćim šipkama, podesivom sapnicom se održava konstantan početni cirkulacijski tlak.
4. Početni cirkulacijski tlak se održava konstantnim do kraja prve cirkulacije tj. dok dotok nije iscirkuliran iz bušotine.
5. Nakon završetka prve cirkulacije bušotina se zatvara i očitavaju se tlakovi na površini.

Očitavanja mogu biti sljedeća:

- ako je  $p_{TBŠZ} = p_{TUBZ}$ ; dotok je iscirkuliran iz bušotine, pristupa se ugušivanju;
- ako je  $p_{TBŠZ} = p_{TUBZ} = 0$  bar; uzrok dotoka nije bila nedovoljna gustoća isplake nego neki drugi faktor, najčešće klipovanje;
- ako je  $p_{TBŠZ} \neq p_{TUBZ}$ ; u prstenastom prostoru još uvijek ima slojnih fluida.



**Slika 4-2.** Razvoj tlakova tijekom prve cirkulacije bušaće metode (Aberdeen Drilling School, 2002)

## Druga cirkulacija

Tijekom druge cirkulacije, u cilju ostvarivanja primarne kontrole tlaka u bušotini, isplaka početne gustoće kod koje je došlo do dotoka zamjenjuje se otežanom isplakom. To se čini na način da se primjenjuju sljedeći koraci:

1. Nakon pripreme otežane isplake za ugušivanje, pumpa se dovode do smanjenog broja hodova održavajući konstantan tlak na ušću bušotine na vrijednosti  $p_{TUBZ}$ . Brojač hodova pumpe se poništi kada se napune površinski vodovi.
2. Tlak na ušću bušotine se održava konstantnim dok otežana isplaka ne dosegne dlijeto. Tlak na bušačim šipkama padati će od vrijednosti početnog cirkulacijskog tlaka ( $p_{TCP}$ ) do konačnog cirkulacijskog tlaka ( $p_{TCK}$ ).

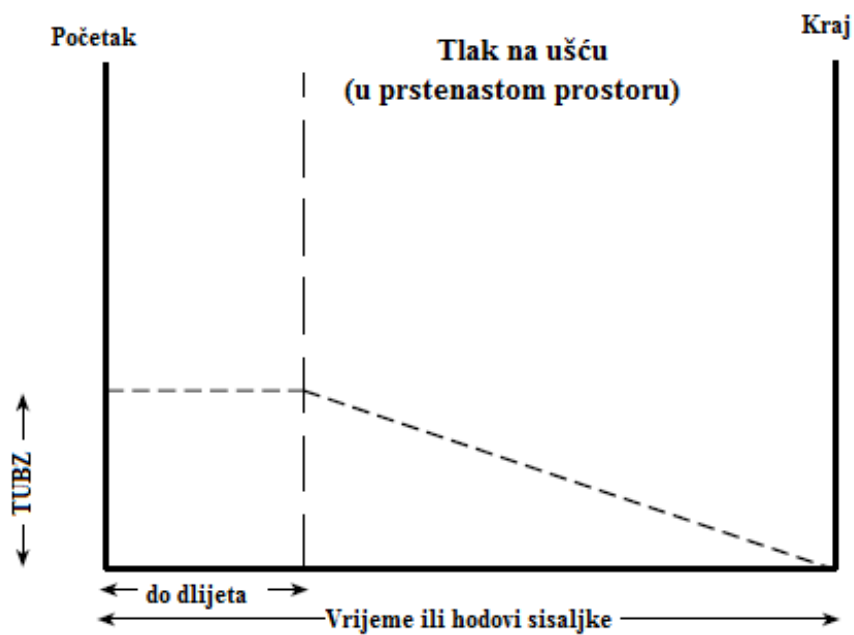
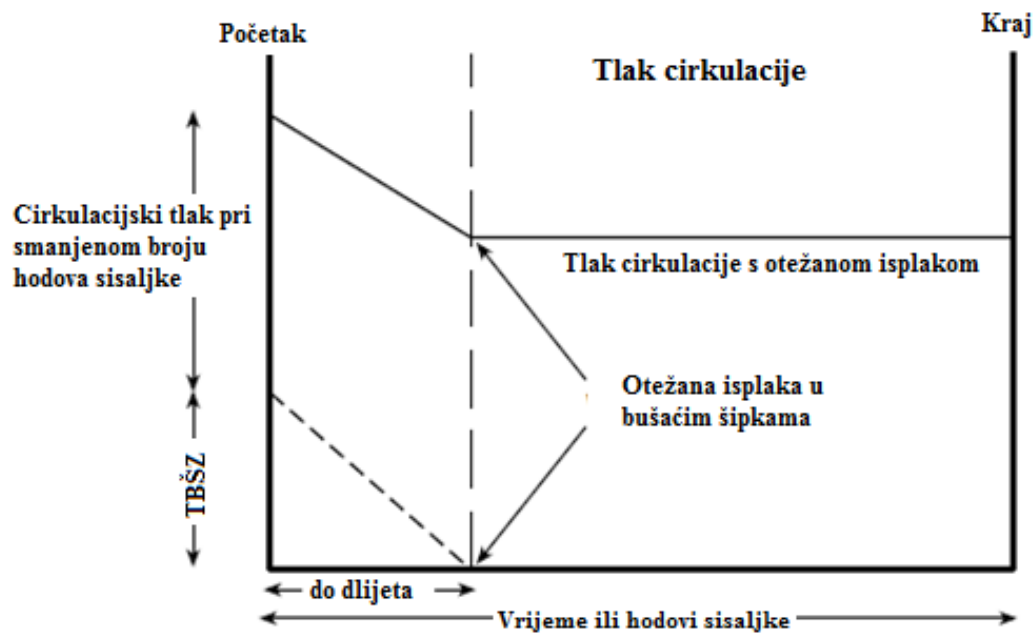
$$p_{TCK} = p_{TCS} \times \frac{\rho_{KMW}}{\rho_i} \quad [\text{bar}] \quad (4.5)$$

gdje je:

$p_{TCK}$  – konačni cirkulacijski tlak [bar]

3. Kada isplaka stigne do dlijeta, prelazi se na kontrolu tlaka na bušačim šipkama koji se održava na vrijednosti konačnog tlaka cirkulacije ( $p_{TCK}$ ). Podesivom sapnicom se tlak održava konstantnim sve dok se otežana isplaka ne pojavi na površini. Tijekom zamjene isplake u prstenastom prostoru, tlak na ušću bušotine bi trebao padati i doseći vrijednost 0 bar kada otežana isplaka dosegne površinu.
4. Nakon pojave otežane isplake na površini, bušotina se zatvara i očitavaju se tlakovi:
  - ako je  $p_{TBŠZ} = p_{TUBZ} = 0$ ; bušotina je ugušena;
  - ako je  $p_{TBŠZ} = p_{TUBZ} \neq 0$ ; premala gustoća otežane isplake, treba nastaviti s otežavanjem isplake kako bi se bušotina ugušila;
  - ako je  $p_{TBŠZ} \neq p_{TUBZ}$ ; tijekom ugušivanja došlo je do novog dotoka, moguće zbog pogrešnog rukovanja sapnicom.





**Slika 4-3.** Razvoj tlakova tijekom druge cirkulacije bušaće metode (Aberdeen Drilling School, 2002)

## 4.2 Inženjerska metoda

Inženjerska metoda (*engl. wait and weight*) provodi se u jednoj cirkulaciji, u kojoj se bušotina, uz smanjenju dobavu, čisti od dotoka uz istovremeno zamjenjivanje otežanom isplakom. Nakon zatvaranja bušotine očitavaju se tlakovi na površini. Tlak na bušaćim šipkama ( $p_{TBŠZ}$ ) koristi se za izračunavanje gustoće otežane isplake. S postupkom ugušivanja bušotine se može započeti nakon pripreme otežane isplake.

Prednosti inženjerske metode:

- razvoj manjih tlakova u području pete kolone, i tlakova na površini;
- kratko vrijeme rada s podesivom sapnicom, minimalan erozijski utjecaj na sapnicu.

Nedostaci inženjerske metode:

- mogućnost migracije dotoka prema površini zbog čekanja na pripremu otežane isplake;
- kompliciraniji proračun;
- mogućnost slijeganja krhotina i blokiranja prstenastog prostora zbog duljeg vremena čekanja.

### Provedba inženjerske metode:

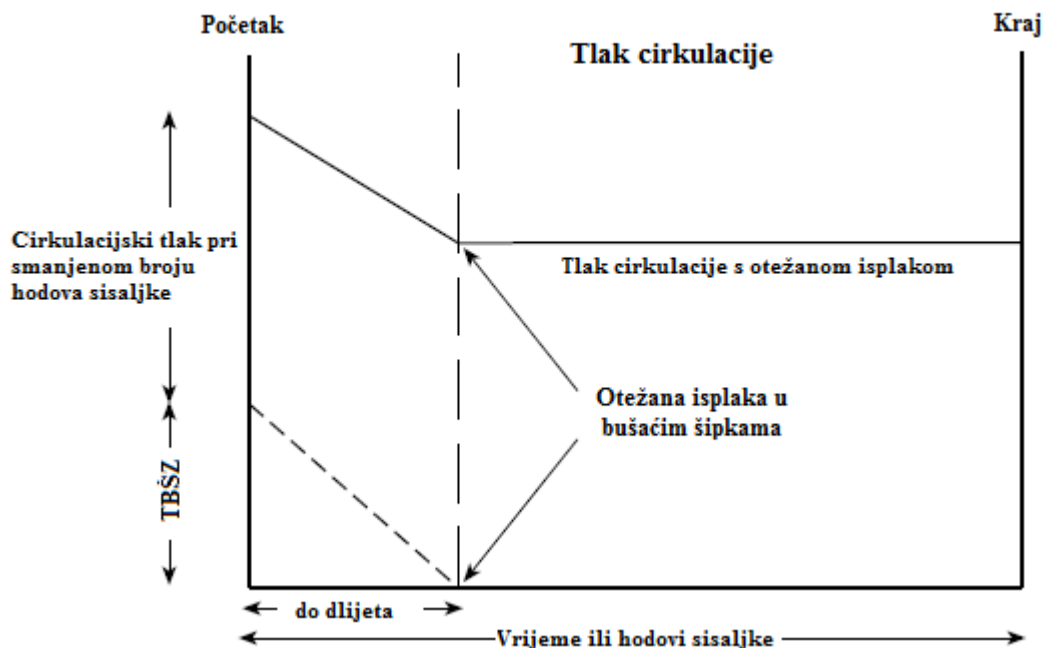
Tijekom ugušivanja bušotine inženjerskom metodom, u jednoj punoj cirkulaciji dotok se iscirkulirava otežanom isplakom koja uspostavlja primarnu kontrolu tlaka u bušotini. To se čini na način da se primjenjuju sljedeći koraci:

1. Nakon zatvaranja bušotine i stabiliziranja tlakova očitavaju se tlakovi na bušaćim šipkama i ušću bušotine. Tlak na bušaćim šipkama se koristi za izračunavanje gustoće otežane isplake.

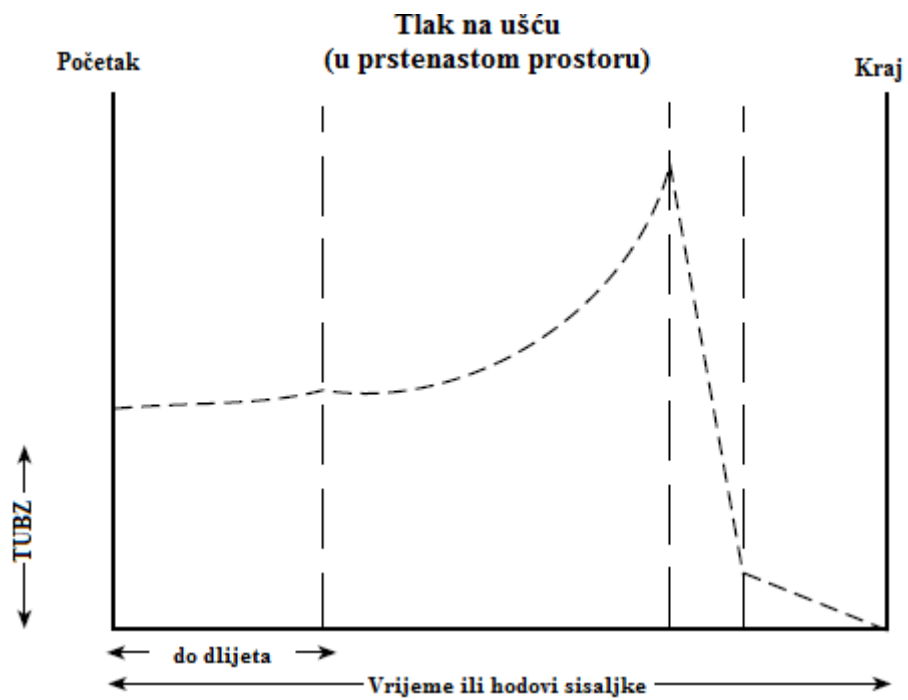
$$\rho_{KMW} = \rho_i + \frac{p_{TBŠZ}}{TVD \times g \times 10^{-2}} \text{ [kg/dm}^3\text{]} \quad (4.6)$$

2. Nakon pripreme otežane isplake pumpe se postupno dovode do smanjenog broja hodova, održavajući tlak na ušću bušotine konstantnim podesivom sapnicom.
3. Potrebno je pričekati određeno vrijeme do uspostave tlaka na bušaćim šipkama na vrijednost početnog cirkulacijskog tlaka ( $p_{TCP}$ ).

4.  $p_{TCP}$  će padati do vrijednosti konačnog cirkulacijskog tlaka kako otežana isplaka puni bušaću šipku. U trenutku kada otežana isplaka stigne do dlijeta, tlak na bušaćim šipkama će biti jednak konačnom tlaku cirkulacije.
5. Tijekom zamjene postojeće isplake otežanom u prstenastom protoru potrebno je održavati tlak na bušaćim šipkama na vrijednosti konačnog cirkulacijskog tlaka ( $p_{TCK}$ ). Cirkulacija prestaje kada se otežana isplaka pojavi na površini, nakon čega se zatvara bušotina i očitavaju tlakovi:
  - ako je  $p_{TBŠZ} = p_{TUBZ} = 0$ ; bušotina je ugušena;
  - ako je  $p_{TBŠZ} = p_{TUBZ} \neq 0$ ; premala gustoća otežane isplake, treba nastaviti s otežavanjem isplake kako bi se bušotina ugušila;
  - ako je  $p_{TBŠZ} \neq p_{TUBZ}$ ; tijekom ugušivanja došlo je do novog dotoka, moguće zbog pogrešnog rukovanja sapnicom. (Crosco, 2014)



**Slika 4-4.** Razvoj tlakova na bušaćim šipkama tijekom provođenja inženjerske metode (Aberdeen Drilling School, 2002)



**Slika 4-5.** Razvoj tlakova na ušću tijekom provođenja inženjerske metode (Aberdeen Drilling School, 2002)

## 5 RAZVOJ TLAKOVA TIJEKOM UGUŠIVANJA

U primjeni dvije najčešće korištene metode za ugušivanje bušotina koje održavaju tlak na dno bušotine konstantim i malo većim od slojnog tlaka, razvijaju se različiti tlakovi na ušću bušotine i u razini pete kolone. Za potrebe ovog rada izračunati su tlakovi tijekom ugušivanja vertikalne bušotine s istim početnim uvjetima dotoka u identičnoj bušotini.

Razvoj tlakova prati se pomoću karakterističnih točaka uz korištenje „Radnog lista za ugušivanje“ (*engl. kill sheet*) za početni i konačni cirkulacijski tlak.

Karakteristični tlakovi za vertikalnu bušotinu:

- Početni cirkulacijski tlak ( $p_{TCP}$ );
- Konačni cirkulacijski tlak ( $p_{TCK}$ );
- Tlak na bušaćim šipkama ( $p_{TBŠZ}$ );
- Tlak na ušću bušotine ( $p_{TUBZ}$ ).

### 5.1 Korišteni podaci za proračun razvoja tlakova

U ovom radu niže navedeni ulazni podaci korišteni su kod proračuna tlakova za obje metode ugušivanja bušotine (radni list za ugušivanje bušotine se nalazi u prilogu).

Podaci o bušotini:

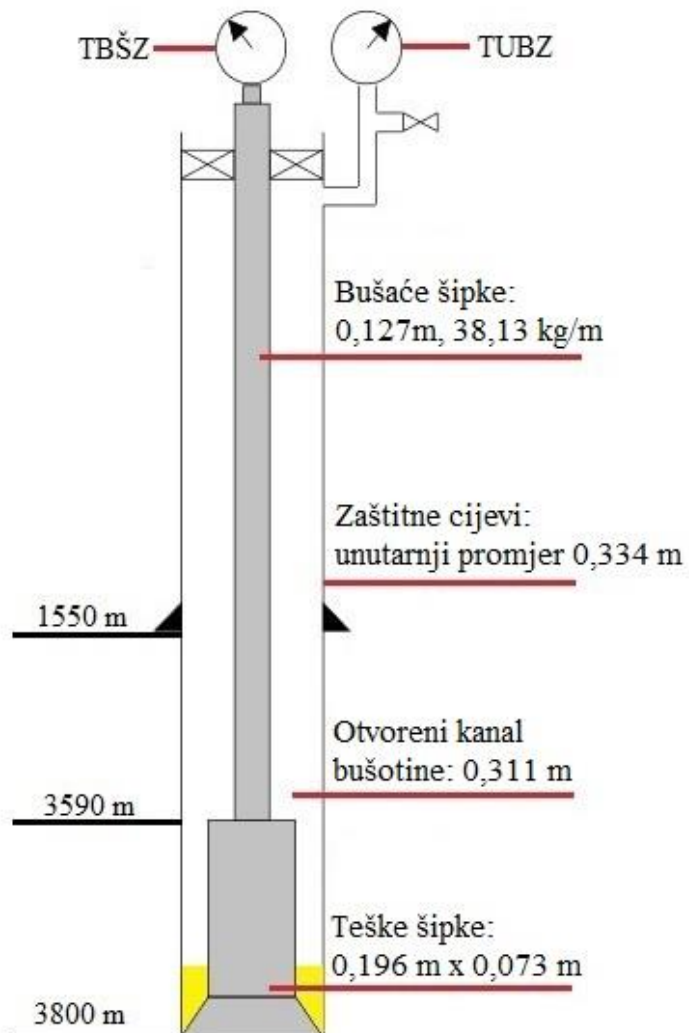
- gustoća isplake za bušenje:  $1,50 \text{ kg/dm}^3$ ;
- promjer pete kolone:  $0,334 \text{ m}$  ( $13 \frac{3}{8} \text{ in}$ );
- mjerena dubina pete kolone:  $1550 \text{ m}$ ;
- vertikalna dubina pete kolone:  $1550 \text{ m}$ ;
- promjer bušotine:  $0,311 \text{ m}$  ( $12 \frac{1}{4} \text{ in}$ );
- mjerena dubina bušotine:  $3800 \text{ m}$ ;
- vertikalna dubina bušotine (*engl. true vertical depth, TVD*):  $3800 \text{ m}$ ;
- bušaće šipke:  $0,127 \text{ m}$  ( $5 \text{ in}$ );  $38,13 \text{ kg/m}$  ( $25,60 \text{ lb/ft}$ );
- teške šipke:  $0,196 \text{ m}$ ; ( $7 \frac{3}{4} \text{ in}$ ) x  $0,073 \text{ m}$  ( $2 \frac{7}{8} \text{ in}$ );
- duljina teških šipki:  $210 \text{ m}$ .

Podaci o čvrstoći sloja:

- površinski tlak primanja (*engl. leak off test, LOT*): 90 bar;
- gustoća isplake tijekom testa (LOT-a): 1,30 kg/dm<sup>3</sup>.

Podaci o dotoku:

- povećanje volumena u bazenima: 3000 dm<sup>3</sup>;
- $p_{TBŠZ}$ : 30 bar;
- $p_{TUBZ}$ : 45 bar.



**Slika 5-1.** Prikaz bušotine s osnovnim podacima korištenim pri računanju tlakova tijekom ugušivanja.

Podaci za ugušivanje:

Podaci za ugušivanje izračunati su korištenjem „Radnog lista za ugušivanje“ i isti su za obje metode.

- Gustoća isplake za ugušivanje ( $\rho_{KMW}$ ): 1,58 kg/dm<sup>3</sup>,

$$\rho_{KMW} = \frac{p_{TB\dot{S}Z}}{TVD \times g \times 10^{-2}} + \rho_i = \frac{30}{3800 \times 0,0981} + 1,5 = 1,58 \text{ [kg/dm}^3\text{]}$$

- Početni cirkulacijski tlak ( $p_{TCP}$ ): 74 bar,

$$p_{TCP} = p_{TCS} + p_{TB\dot{S}Z} = 44 + 30 = 74 \text{ [bar]}$$

- Konačni cirkulacijski tlak ( $p_{TCK}$ ): 46,36 bar,

$$p_{TCK} = p_{TCS} \times \frac{\rho_{KMW}}{\rho_i} = 44 \times \frac{1,58}{1,5} = 46,36 \text{ [bar]}$$

- Smanjeni broj hodova pumpe: 30 hod/min.

Tlakovi koji su predstavljeni grafovima za bušaću i inženjersku metodu računati su korištenjem tabličnog kalkulatora (Microsoft Excel 2013). Razvoj tlakova tijekom ugušivanja predstavljen je u ovisnosti o hodovima pumpe jer o tome ovisi i položaj dotoka, isplake korištene tijekom bušenja i isplake za ugušivanje u bušotini. Tlakovi su dobiveni na način da se pretpostavlja da je bušotina u statičkim uvjetima za svaki određeni broj hodova pumpe. Time je bilo moguće izračunati položaj, volumen i tlak fluida u svakom dijelu bušotine u svakom trenutku. U tu svrhu su tijekom proračuna tlakova korištene sljedeće pretpostavke:

1. Bušotina je u statičkim uvjetima tj. pumpe su zaustavljene.
2. Temperatura je konstantna.
3. Migracija plina prema površini uzrokovana je jedino radom pumpi tijekom ugušivanja.
4. Za vrijeme dotoka dlijeto se nalazi na dnu bušotine.
5. Ekspanzija plina uzrokovana je jedino smanjenjem tlaka.
6. Tijekom ugušivanja, tlak na dno bušotine je konstantan.
7. Kanal bušotine je kružnog poprečnog presjeka.

### 5.1.1 Primjer proračuna

Tlak na ušću bušotine – prva cirkulacija bušaće metode ugušivanja.

Ulazni podatak (ukupan broj hodova pumpe) za primjer proračuna odabran je proizvoljno.

Ukupan broj hodova pumpe nakon početka početka provođenja prve cirkulacije bušaće metode (n): 14 000 hod.

Dubina sredine dotoka: 447 m

$$TVD_d = TVD - \frac{(V'_p \times n)}{V'_{pp}} = 3800 - \frac{(16 \times 14000)}{77,3} = 447 \text{ [m]} \quad (5.1)$$

Dubina sredine dotoka računata je uz konstantne hodove pumpe, uzimajući u obzir različite jedinične volumene prstenastog prostora u bušotini.

Visina stupca doteklog fluida u prstenastom prostoru: 213,42 m

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 \quad (\text{Boyle-Marrioteov zakon}),$$

$$h_d = \frac{\left(\frac{p_i \times V_i}{p_{h_d}}\right)}{V'_{pp}} = \frac{\left(\frac{603,6}{110,78} \times 3000\right)}{77,3} = 213,42 \text{ [m]} \quad (5.2)$$

Ekspanzija plina računata je sukladno Boyle-Mariotteovom zakonu poznavajući početne uvjete dotoka ( $p_{TB\SZ} = 30 \text{ bar}$ , volumen dotoka  $3000 \text{ dm}^3$ )

Visina stupca dotoka računata je uzimajući u obzir ekspanziju doteklog fluida, položaj dotoka u bušotini, i jedinični volumen prstenastog prostora.

Tlak na ušću bušotine: 60,19 bar

$$p_{TUBZ} = p_i - \left(TVD - \frac{h_d}{2}\right) \times \rho_i \times g \times 10^{-2} = 603,6 - \left(3800 - \frac{213,42}{2}\right) \times 1,50 \times 9,81 \times 10^{-2} = 60,19 \text{ [bar]} \quad (5.3)$$

Uz pretpostavljeni konstantan tlak na dno bušotine tijekom ugušivanja, tlak na ušću bušotine je računat kao razlika tlaka na dnu i tlaka kojeg ostvaruju fluidi u prstenastom prostoru.

gdje su:

$TVD_d$  – dubina sredine dotoka [m]

$V'_p$  – kapacitet hoda pumpe [ $\text{dm}^3/\text{hod}$ ]

n – broj hodova pumpe [hod]

$V'_{pp}$  – jedinični volumen prstenastog prostora [ $\text{dm}^3/\text{m}$ ]

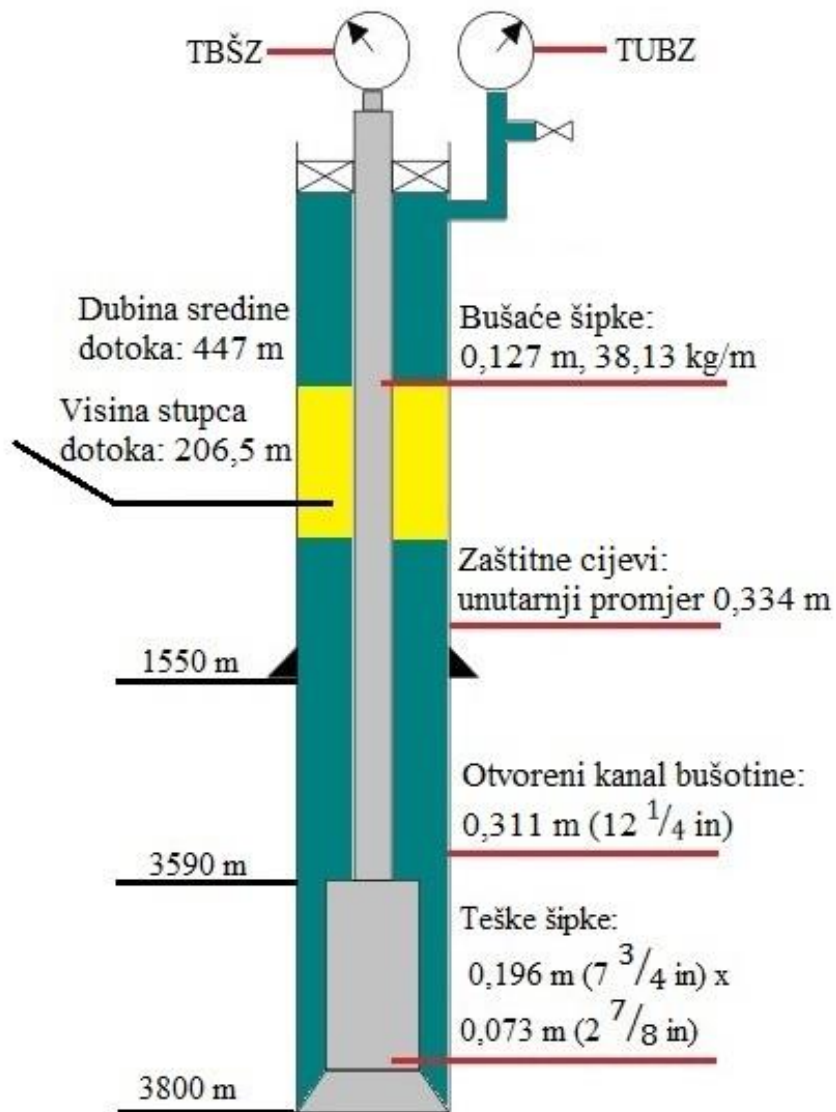


$h_d$  – visina stupca doteklog fluida [m]

$p_i$  – tlak na dno bušotine nakon zatvaranja [bar]

$p_{hds}$  – tlak na dubini sredine doteklog fluida [bar]

$V_i$  – povećanje volumena u bazenima, volumen doteklog fluida [ $\text{dm}^3$ ]

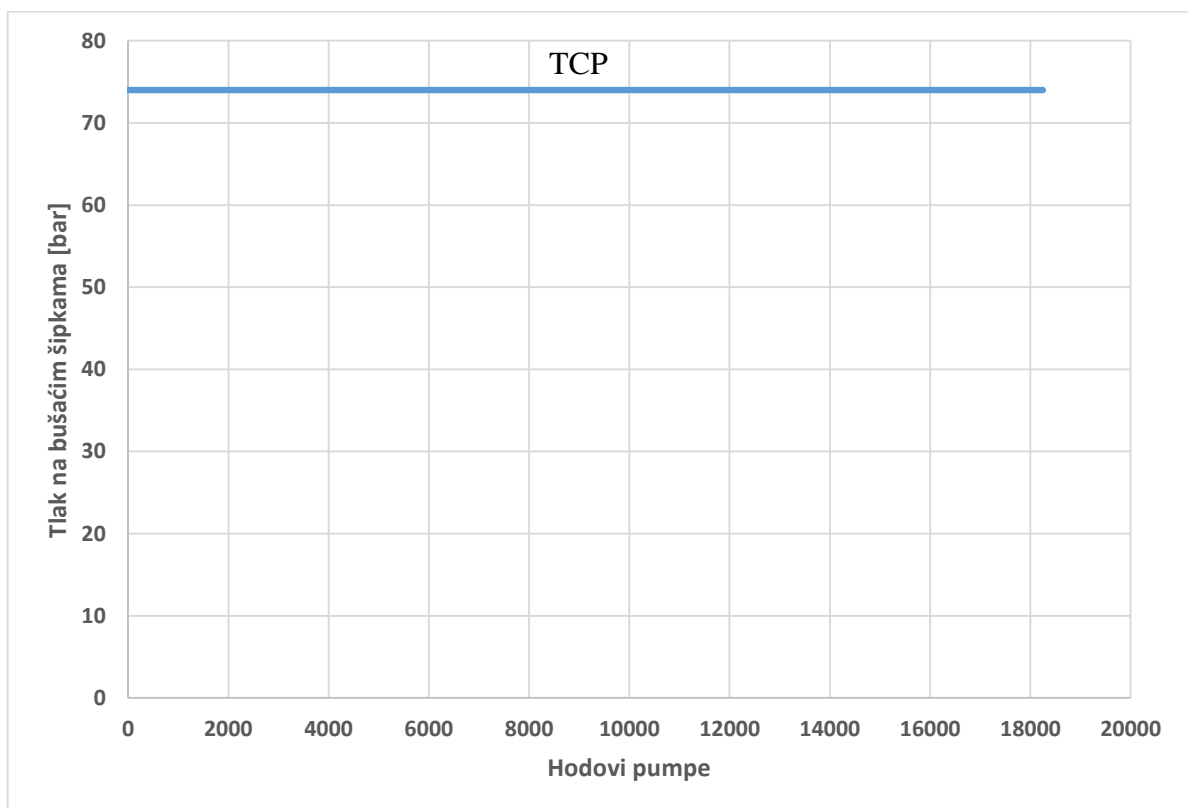


**Slika 5-2.** Prikaz bušotine s osnovnim podacima korištenim za primjer računanja tlakova na ušću bušotine tijekom ugušivanja bušačom metodom.

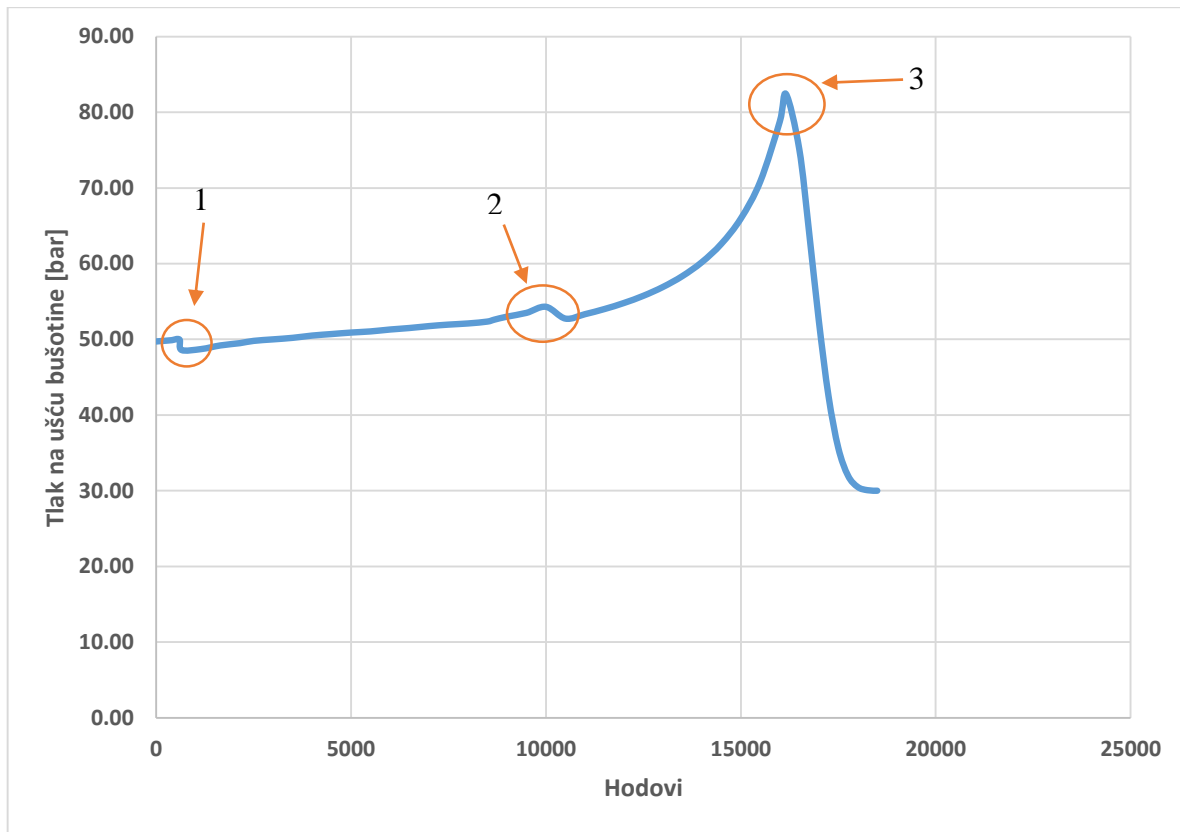
## 5.2 Razvoj tlakova tijekom bušaće metode

### 5.2.1 Prva cirkulacija bušaće metode

U prvoj cirkulaciji bušaće metode, tijekom iscirkuliranja dotoka iz bušotine, tlak na bušačim šipkama održava se konstantnim na vrijednosti  $p_{TCP}$  nakon što su pumpe dovedene do smanjenog broja hodova (Slika 5-3). Ukoliko tlak na bušačim šipkama padne ispod proračunom određene vrijednosti doći će do ponovnog utoka slojnih fluida u kanal bušotine.



**Slika 5-3.** Tlak na bušačim šipkama tijekom prve cirkulacije bušaće metode

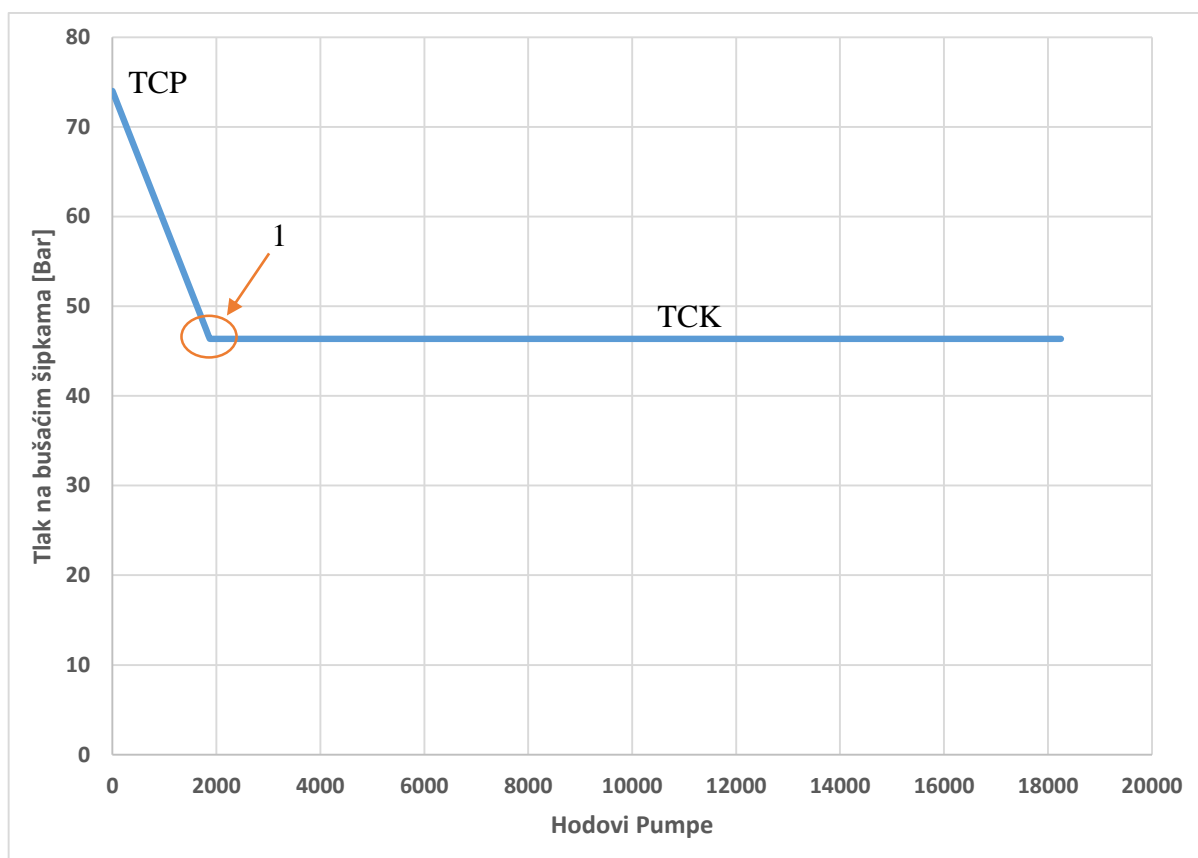


**Slika 5-4.** Tlak na ušću bušotine tijekom prve cirkulacije bušaće metode.

Tijekom prve cirkulacije dotekli plin u prstenastom prostoru expandira kretanjem prema površini zbog manjih tlakova. Od početka cirkulacije do strelice 1 plin expandira u prstenastom prostoru oko teških šipki u otvorenom kanalu bušotine. Zbog velikih tlakova pri dnu bušotine i malog jediničnog volumena oko teških šipki, porast tlaka na ušću bušotine malog je iznosa. Pad tlaka označen strelicom 1 uzrokovan je prelaskom dotoka u prstenasti prostor oko bušačkih šipki u otvorenom dijelu kanala bušotine. Zbog većeg jediničnog volumena prstenastog prostora, uz održavanje dobave konstantnom, brzina kretanja dotoka je smanjena te expandira sporije tj. smanjuje se visina stupca dotoka u bušotini. Posljedica manje ekspanzije dotoka tj. većeg stupca isplake u prstenastom prostoru bušotine je pad tlaka na ušću bušotine. Od strelice 1 do strelice 2, dotok se kreće prema površini u otvorenom kanalu bušotine u prstenastom prostoru oko bušačkih šipki, te expandira sukladno Boyle-Mariotteovom zakonu ( $p \times V = \text{konst.}$ ). Na mjestu označenom strelicom 2, na prijelazu iz otvorenog dijela u zacijevljeni dio bušotine, povećanje jediničnog volumena prstenastog prostora uzrokuje smanjenje visine stupca dotoka, te posljedično, pada tlak na ušću bušotine. Od strelice 2 do strelice 3 tj. trenutka kada vrh dotoka dolazi do ušća bušotine, dotok

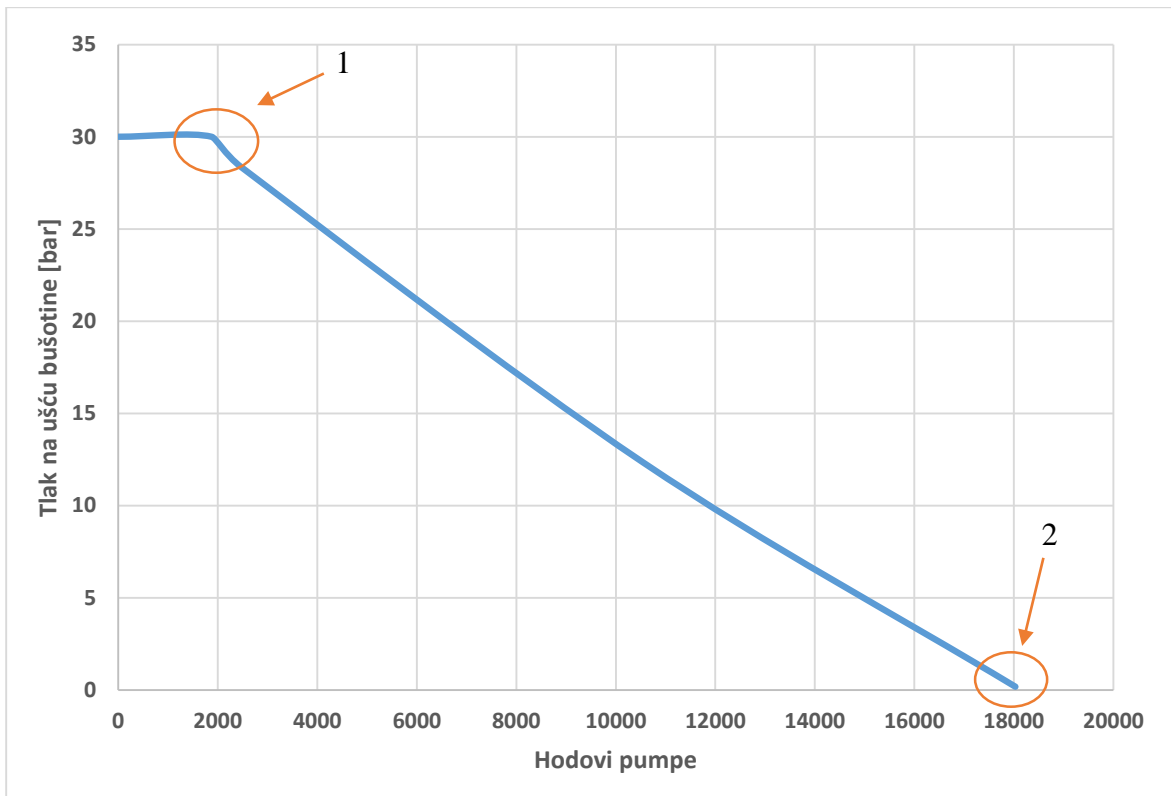
ekspandira sukladno Boyle-Mariotteovom zakon. U trenutku kada se vrh dotoka nalazi ispod ušća bušotine, razvija se najveći tlak na ušću. Tijekom izlaska dotoka iz bušotine postupno se smanjuje tlak na ušću. Nakon izlaska dotoka, tlak na ušću je jednak početnom zabilježenom tlaku na bušaćim šipkama nakon zatvaranja, što znači da je sav dotok iscirkuliran iz bušotine.

## 5.2.2 Druga cirkulacija bušaće metode



**Slika 5-5.** Tlak na bušaćim šipkama tijekom druge cirkulacije bušaće metode

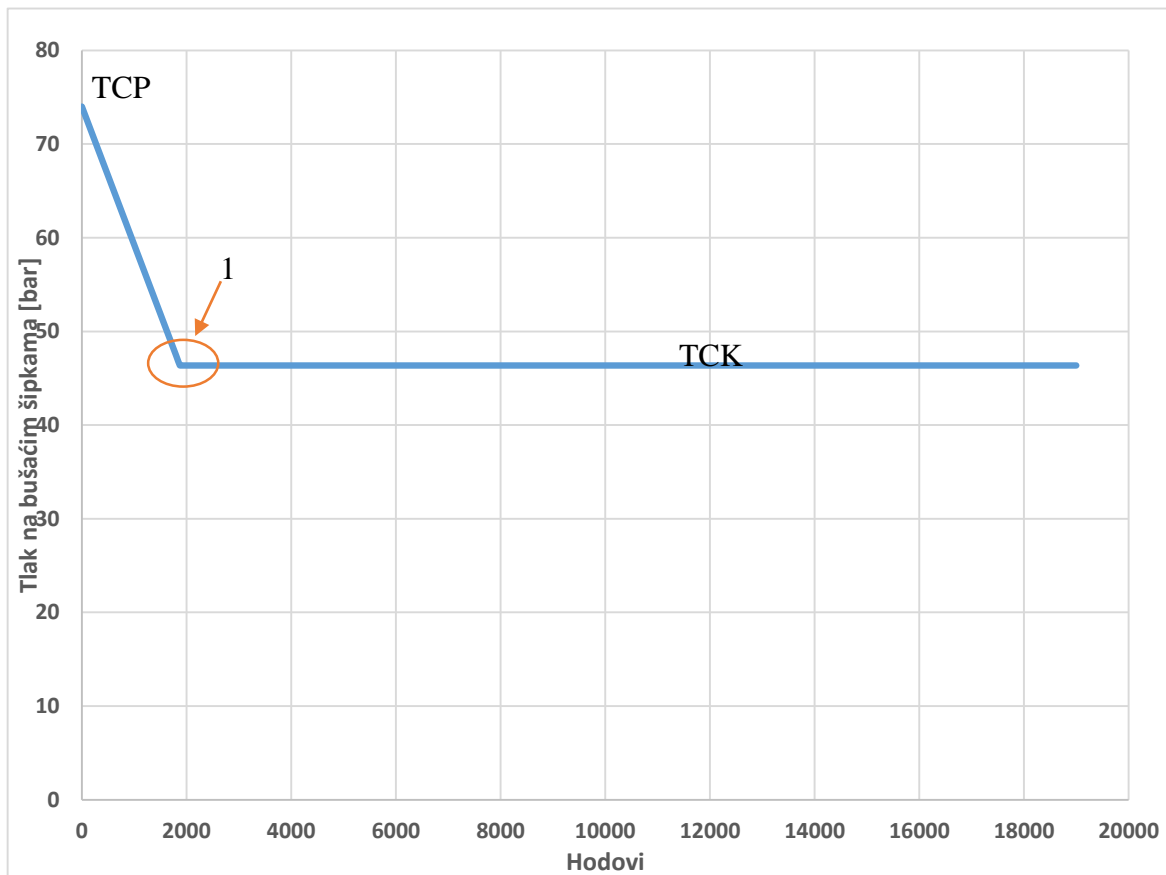
Tijekom druge cirkulacije, tlak na bušaćim šipkama postupno se smanjuje s vrijednosti  $p_{TCP}$  na vrijednost  $p_{TCK}$ . Uzrok pada tlaka je punjenje bušaćih šipki otežanom isplakom. U trenutku kada je tlak pao na vrijednost  $p_{TCK}$  (strelica 1), otežana isplaka je stigla do dlijeta. Za vrijeme dok otežana isplaka puni prstenasti prostor bušotine tlak na bušaćim šipkama se održava konstantnim.



**Slika 5-6.** Tlak na ušću bušotine tijekom druge cirkulacije bušaće metode

Tlak na ušću bušotine tijekom druge cirkulacije ostaje nepromjenjen do trenutka kada otežana isplaka počne ispunjavati prstenasti prostor. Ukoliko je gustoća otežane isplake dovoljna za ugušivanje bušotine, tlak na ušću pada prema vrijednosti od 0 bar. Uzrok pada tlaka na ušću je ispunjenje prstenastog prostora otežanom isplakom (strelica 1) tj. povećanjem stupca otežane isplake koji ostvaruje potreban protutlak na sloj. Blaga odstupanja od linearnog pada tlaka između strelica 1 i 2 uzrokovana su promjenom jediničnog volumena prstenastog prostora bušotine na prijelazima između teških i bušaćih šipki, i na prijelazu iz otvorenog u zacijevljeni dio kanala bušotine. Povećanje jediničnog volumena uzrokuje smanjenu visinu stupca otežane isplake u prstenastom prostoru, što za posljedicu ima manji pad tlaka na ušću bušotine u istim intervalima hodova pumpe na grafu hodovi pumpe – tlak.

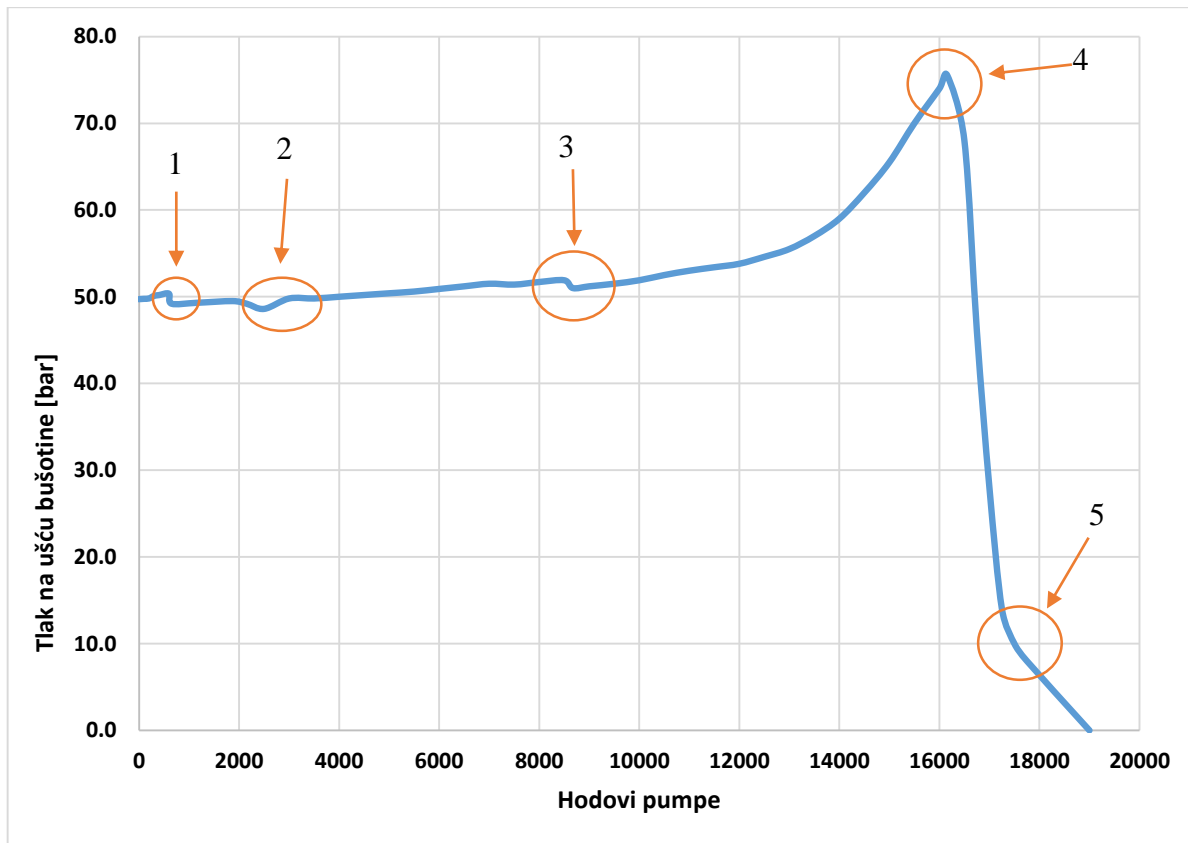
### 5.3 Razvoj tlakova tijekom provođenja inženjerske metode



**Slika 5-7.** Tlak na bušaćim šipkama tijekom provođenja inženjerske metode

Nakon uspostave smanjenog broja hodova pumpe, tlak cirkulacije na bušaćim šipkama smanjuje se od početnog ( $p_{TCP}$ ) do konačnog tlaka cirkulacije ( $p_{TCK}$ ). Strelica 1 označava trenutak kada otežana isplaka stiže do dlijeta. Uzrok smanjenja tlaka je punjenje unutrašnjeg volumena bušaćeg alata otežanom isplakom.

Na ispunjenom Radnom listu za ugušivanje koji se nalazi u Prilogu dobiveni su identični tlakovi na bušaćim šipkama. Uočava se da tlak na bušaćim šipkama pada tijekom ispunjavanja bušaćih alatki otežanom isplakom (1873 hodova pumpe) do vrijednosti konačnog cirkulacijskog tlaka.



**Slika 5-8.** Tlak na ušću bušotine tijekom inženjerske metode.

Od početka provedbe inženjerske metode ugušivanja do trenutka dok otežana isplaka ne stigne do dlijeta, porast tlaka na ušću bušotine uzrokovan je ekspanzijom plina. Pri prelasku dotoka iz prstenastog prostora oko teških šipki u prstenasti prostor oko bušačih šipki (strelica 1), pad tlaka je uzrokovan povećanjem jediničnog volumena koje uzrokuje smanjenje stupca dotoka. Strelica 2 označava ulazak otežane isplake u prstenasti prostor. Kako otežana isplaka ispunjava prstenasti prostor oko teških šipki, tlak na ušću blago pada. Pad tlaka na ušću nakon ulaska otežane isplake u prstenasti prostor uzrokovan je razlikom u jediničnom volumenu prstenastog prostora oko teških i bušačih šipki. Naime, jedinični volumen oko bušačih šipki je oko 40% veći od jediničnog volumena oko teških šipki. Uz konstantnu dobavu, brzina migracije dotoka je manja, dok otežana isplaka brzo ispunjava prstenasti prostor oko teških šipki, uzrokujući protutlak na sloj. Iz istog razloga dolazi do pada tlaka na ušću bušotine prilikom ulaska dotoka u prstenasti prostor oko bušačih šipki u zacijevljenom dijelu kanala (strelica 3) čiji jedinični volumen je za 24% veći od jediničnog volumena prstenastog prostora oko bušačih šipki u otvorenom kanalu. Najveći tlak na ušću ostvaren je u trenutku kada se vrh dotoka nalazi ispod ušća bušotine (strelica 4), u trenutku

kada dotekli fluid zauzima najveći volumen prstenastog prostora. Prilikom izlaska dotoka iz bušotine tlak na ušću naglo pada sukladno Boyle-Mariotteovom zakonu do vrijednosti koju označava strelica 5. Kada je sav dotok izašao iz bušotine, tlak na ušću još uvijek ima vrijednost veću od 0 bar. Razlog tomu je što se u bušotini još uvijek nalazi isplaka koja se koristila za bušenje, koja se nalazila unutar bušaćeg alata u trenutku zatvaranja bušotine. Nakon iscirkuliranja dotoka, volumen isplake za bušenje u bušotini odgovara unutrašnjem volumenu bušaćeg alata. Tijekom iscirkuliranja preostale isplake za bušenje tj. zamjenom otežanom isplakom, pad tlaka do vrijednosti 0 bar je linearan.

#### 5.4 Usporedba tlakova bušaće i inženjerske metode

**Tablica 5-1.** Usporedba tlakova na ušću bušotine tijekom ugušivanja

Hodovi pumpe [hod]	Tlak na ušću [bar] Bušaća metoda – prva cirkulacija	Tlak na ušću [bar] Inženjerska metoda	Razlika [%]
1873	49,5	49,5	<b>0,00</b>
2500	49,8	48,5	<b>2,68</b>
10575	54,3	52,5	<b>3,43</b>
16259	82,4	75,5	<b>9,14</b>
19000	30,0	0,0	

Uspoređeni su tlakovi na ušću bušotine tijekom prve cirkulacije bušaće metode i inženjerske metode budući da se tijekom iscirkuliranja dotoka ostvaruje najveći tlak na ušću.

Usporedbom izračunatih tlakova u karakterističnim točkama tijekom ugušivanja vidi se da inženjerska metoda ima za posljedicu manje tlakove na ušću bušotine. Tijekom iscirkuliranja dotoka inženjerskom metodom, dok otežana isplaka još nije počela ispunjavati prstenasti prostor bušotine, obje metode ugušivanja razvijaju iste tlakove na ušću bušotine. U trenutku kada je otežana isplaka ispunila prstenasti prostor oko teških šipki (2500 hodova pumpe), tlak na ušću bušotine tijekom inženjerske metode je 1,3 bar (2,68 %) manji nego tijekom prve cirkulacije bušaće metode. U trenutku kada je otežana isplaka ispunila prstenasti prostor oko bušaćih šipki u otvorenom dijelu kanala bušotine (10575 hodova), tlak na ušću je 1,8 bar (3,43 %) manji tijekom inženjerske metode nego u istom trenutku bušaće



metode. Najveći tlakovi se ostvaruju u trenutku kada je vrh doteklog plina ispod ušća bušotine (16259 hodova). U tom trenutku, tlak na ušću ostvaren primjenom inženjerske metode je 6,9 bar (9,14 %) manji nego tijekom provedbe bušaće metode. Nakon iscirkuliranja dotoka iz bušotine, tlak na ušću dobiven bušaćom metodom jednak je vrijednosti  $p_{TB\dot{S}Z}$  nakon zatvaranja bušotine. U slučaju inženjerske metode, jer je otežana isplaka ispunila prstenasti prostor, tlak na ušću iznosi 0 Pa, tj. bušotina je ugušena, odnosno vraćena je u stanju primarne kontrole tlaka.

Uspoređeni tlakovi i razlike tlakova bušaće i inženjerske metode vrijede samo za bušotinu i dotok opisane u ovom radu. Ostvareni tlakovi tijekom ugušivanja ovise o mnogo faktora (dubina, gustoća isplake tijekom bušenja, gustoća isplake za ugušivanje, volumen dotoka, jedinični volumeni itd.). Iz tog razloga se ne mogu izvući zaključci o usporedbi bušaće i inženjerske metode, samo na temelju razvoja tlakova dobivenih u ovom primjeru.

## 5.5 Odstupanja od realnog modela

Zbog navedenih pretpostavki prilikom proračuna, model razvoja tlakova odstupa od realnog.

Tijekom ugušivanja, u bušotini vladaju dinamični uvjeti zbog rada pumpi. Slično kao i kod tlakova ekvivalentne cirkulirajuće gustoće isplake, i tijekom ugušivanja, otpori protjecanja u prstenastom prostoru uzrokuju nešto veći tlak na dno bušotine od hidrostatičkog tlaka. Prilikom ugušivanja to je manje izraženo zbog smanjenog broja hodova pumpe tj. smanjene brzine protjecanja isplake. U pravilu, u dinamičkim uvjetima tlak na ušću bušotine bi trebao biti manji nego u statičkim uvjetima.

Prilikom računanja tlakova, pretpostavljeno je da je temperatura konstantna u svim točkama bušotine. Na taj način izračunati tlakovi nisu ovisili o temperaturi. Međutim, tijekom iscirkuliranja dotoka, krećući se prema površini, temperatura se smanjuje ovisno o geološkim parametrima. Manja temperatura u plićim dijelovima znači i manji volumen doteklog fluida u prstenastom prostoru, što za posljedicu ima manji tlak na ušću bušotine.

Za računanje volumena doteklog fluida pri različitim temperaturama koristiti se sljedeći izraz:

$$V_d = V_i \times \left( \frac{p_i}{p_{hd}} \right) \times \left( \frac{T_i}{T_{hd}} \right) \quad (5.4)$$

pri čemu su:

$V_d$  – korigirani volumen dotoka obzirom na temperaturu [ $\text{dm}^3$ ]

$T_i$  – temperatura na dnu bušotine [K]

$T_{hd}$  – temperatura na dubini sredine dotoka [K]

S ugušivanjem bušotine se može započeti odmah ukoliko se koristi bušača metoda ili na postrojenju već postoji pripremljena otežana isplaka za ugušivanje. Za vrijeme dok se priprema otežana isplaka za ugušivanje inženjerskom metodom, dotekli plin migrira prema površini. Ostvareni tlakovi tijekom ugušivanja mogu biti znatno veći ukoliko je vrijeme čekanja na početak ugušivanja veliko. Tako ostvareni tlakovi inženjerskom metodom nerijetko mogu biti veći od tlakova ostvarenih provedbom bušaće metode. To je posebno opasno ukoliko je ostvareni tlak na dno bušotine veći od tlaka frakturiranja stijena.

Moguća su odstupanja od konstantnog tlaka na dno bušotine, pošto se tlak na dno u nekim dijelovima postupaka ugušivanja održava konstantnim rukovanjem sapnicom. Ukoliko bi zbog nepravilnog rukovanja sapnicom tlak cirkulacije previše narastao može doći do loma formacije. Ukoliko tlak cirkulacije padne ispod određene vrijednosti doći će do ponovnog ulaska slojnih fluida u kanal bušotine. Kad se manipulira sapnicom potrebno je znati da mora proći izvjesno vrijeme dok se prenese impuls od sapnice do dna bušotine, pa zatim do manometra na površini (približno 300 m/s) (Crosco 2014).

## 5.6 Specifičnosti ugušivanja zakrivljenih bušotina

### Veći volumeni dotoka

Zbog konfiguracije usmjerenih bušotina, posebice onih s velikim kutom otklona koje zahvaćaju veći dio proizvodnog sloja od vertikalnih bušotina, već i mali podtlak ili tlak klipovanja mogu prouzročiti brze i velike dotoke. Posljedica je veliki volumen dotoka koji se treba iscirkulirati, što može prouzročiti velike tlakove koji mogu oštetiti zaštitne cijevi ili izazvati podzemnu erupciju.

### Razvoj tlakova na šipkama

Razvoj tlaka na šipkama pokazuje potreban tlak na šipkama za uravnoteženje tlaka na dnu bušotine. Sekcije povećanja kuta neće imati linearno smanjenje tlaka kao kod vertikalne bušotine. Ukoliko bi se razvoj tlaka na šipkama pratio koristeći tehniku za vertikalnu bušotinu, pojavila bi se situacija gdje bi se ostvarivao nadtlak na dno bušotine. Zbog toga može doći do gubitka cirkulacije.

### Postupak računanja „Radnog lista za ugušivanje kosih bušotina“

Uz podatke koje je potrebno znati prilikom ispunjavanja „Radnog lista za ugušivanje vertikalnih bušotina“, za kose bušotine još je potrebno znati vertikalne i mjerene dubine točke skretanja (*engl. kick off point, KOP*), te prestanak povećanja kuta otklona (*engl. end of build-up, EOB*).

Proračun slijedi po koracima:

- Gustoća isplake za ugušivanje

$$\rho_{kmw} = \rho_i + \frac{p_{TB\dot{S}Z}}{TVD \times g \times 10^{-2}} \text{ [kg/dm}^3\text{]} \quad (5.5)$$

- Početni tlak cirkulacije (TCP)

$$p_{TCP} = p_{TCS} + p_{TB\dot{S}Z} \text{ [bar]}$$

- Cirkulacijski tlak u točki skretanja (KOP)

- otpori protjecanja

$$(a) = p_{TCS} + \left[ (p_{TCK} - p_{TCS}) \times \frac{KOP_{MD}}{MD_{bu\dot{s}}}] \quad (5.6)$$

- preostali (neuravnoteženi)  $p_{TB\dot{S}Z}$

$$(b) = p_{TB\dot{S}Z} - [(\rho_{kmw} - \rho_i) \times KOP_{VD} \times g] \quad (5.7)$$

- cirkulacijski tlak u točki skretanja (KOP)

$$KOPTC = (a) + (b) \text{ [bar]} \quad (5.8)$$

- Konačni tlak cirkulacije ( $p_{TCK}$ )

$$p_{TCK} = p_{TCS} \times \frac{\rho_{kmw}}{\rho_i} \text{ [bar]} \quad (5.9)$$

gdje su:

$KOP_{MD}$  – mjerena dubina točke skretanja [m]

$MD_{bu\dot{s}}$  – mjerena dubina bušotine [m]

$KOP_{VD}$  – vertikalna dubina točke skretanja [m]

$KOPTC$  – cirkulacijski tlak u točki skretanja [bar]

## 6 ZAKLJUČAK

Razumijevanje kontrole tlaka u bušotini od najveće je važnosti za sigurnu izradu bušotina. Osnove kontrole tlaka, uključujući opremu i postupke, definirani su preporukama API standarda, API RP 16 E, API RP 53 i API RP 59. Rano prepoznavanje dotoka je izuzetno važno kako bi se spriječio veći dotok fluida koji može uzrokovati erupciju i povećane tlakove tijekom ugušivanja. Ukoliko se primijeti neki od izravnih ili neizravnih pokazatelja dotoka, potrebno je zaustaviti bušenje i izvršiti kontrolu dotoka kako bi se potvrdilo je li stvarno došlo do dotoka. Neki priručnici predlažu da se kontrola dotoka provodi ako se sumnja na dotok, bez konkretnih pokazatelja.

Odabir metode za ugušivanje ovisi o više faktora, o raspoloživoj opremi, položaju alata u bušotini, do internih uputa samih kompanija. Najčešće korištene metode ugušivanja su bušaća i inženjerska metode. Glavna razlika među njima jest broj potrebnih cirkulacija za provedbu. Bušaća metoda se provodi kroz dvije potpune cirkulacije, u prvoj se iscirkulirava dotok iz bušotine, dok se u drugoj cirkulaciji utiskuje isplaka za ugušivanje. Inženjerskom metodom se u jednoj punoj cirkulaciji, iscirkulirava dotok i ugušuje bušotina.

Tijekom provedbe spomenutih metoda ugušivanja razvijaju se različiti tlakovi u bušotini. Uz nekoliko pretpostavki, načinom koji je opisan u ovom radu izračunati su karakteristični tlakovi koji se razvijaju tijekom obje metode, uz iste početne uvjete. Do trenutka kada otežana isplaka stigne do dlijeta, obje metode razvijaju identične tlakove na ušću bušotine. Međutim, kada otežana isplaka počne ispunjavati volumen prstenastog prostora, inženjerska metoda razvija manje tlakove na ušću bušotine od bušaće metode, iz razloga što otežana isplaka ostvaruje veći tlak na dno bušotine.

## 7 LITERATURA

1. Aberdeen Drilling School and Well Control Training Center., 2002. "Well Control: For the Man on the Rig“, Aberdeen.
2. Amak Petroleum, 2013. Well Control Manual
3. API RP 16 E 1990 Edition, October 1990, Recommended Practice for Design of Control Systems for Drilling Well Control Equipment
4. API RP 53 3rd Edition, March 1997, Recommended Practices for Blowout Prevention Equipment Systems for Drilling Wells.
5. API RP 59 2nd Edition, May 1, 2006, Recommended Practice for Well Control Operations.
6. CROSCO, d.o.o. Centar za kontrolu tlaka u bušotini, 2014. Kontrola tlaka u bušotini, predavanja uz praktične vježbe na simulatoru., Zagreb.
7. Krištafor, Z., Paravić, O. 2001. Specifičnosti kontrole tlaka u horizontalnim bušotinama. Zagreb.
8. Maersk training centre A/S., 2004. Well control manual, Svendborg.
9. International Well Control Forum. Useful downloads.  
URL: <http://www.iwcf.org/training-qualifications/useful-downloads#faqnoanchor>  
(12.12.2015.)

## **PRILOG**

U prilogu se nalazi ispunjen „Radni list za ugušivanje bušotine“ (*engl. kill sheet*) s podacima koji su korišteni za proračun tlakova u ovom radu.

### Podaci o čvrstoći sloja:

Površinski tlak primanja (LOT) iz ispitivanja čvrstoće sloja (A) 90,0 bar

Gustoća isplake tijekom testa (LOT-a) (B) 1,30 kg/l

Najveća dozvoljena gustoća isplake (B) + (A) / (Vert.dubina pete kolone x 0,0981) = (C) 1,89 kg/l

Početni MDTUB = ((C) - gustoća isplake) x VD pete x 0,0981 = 59,38 bar

Kapacitet hoda pumpe br. 1 16,0 l/hod  
Kapacitet hoda pumpe br. 2 \_\_\_\_\_ l/hod

Podaci o smanjenom broju hodova	(TCS) Dinamički pad tlaka (bar)	
	Pumpa br. 1	Pumpa br. 2
30 hod/min	44,0	
_____ hod/min		

Podaci o volumenima:	Dužina (m)	Jedinični volumen (l/m)	Volumen (l)
Bušaće šipke (BŠ)	3590	8,10	29080
Teške bušaće šipke (TBŠ)			
Teške šipke	210	4,19	880

Unutrašnji volumen bušaćeg alata (D) 29960 l

TŠ u otvorenom kanalu 210 x 45,58 = 9572

BŠ/TBŠ u otvorenom kanalu 2040 x 63,34 = 129209

Volumen otvorenog kanala (F) 138781 l

Bušaće šipke u koloni 1550 x 77,26 = (G)119756

Ukupni volumen prstenastog prostora (H) = F+G 258537 l

Ukupni volumen u bušotini (I) = D+H 288497 l

Aktivni volumen na površini (J) \_\_\_\_\_ l

Ukupni volumen isplake (I+J) \_\_\_\_\_ l

### Podaci o bušotini:

#### Isplaka za bušenje:

Gustoća 1,50 kg/l

#### Podaci o peti kolone:

Promjer 13,375 in

Mjerena dubina (MD) 1550 m

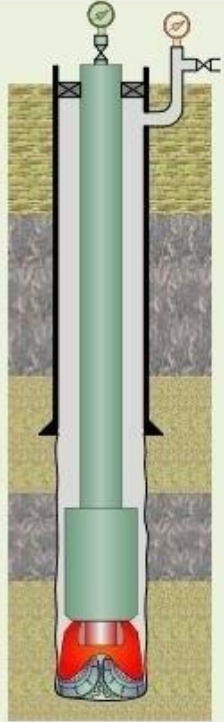
Vertikalna dubina (VD) 1550 m

#### Podaci o bušotini:

Promjer 12,25 in

Mjerena dubina (MD) 3800 m

Vertikalna dubina (VD) 3800 m



Podaci o dotoku: TBŠZ 30 bar TUBZ 45 bar Povećanje volumena u bazenu 3000 l

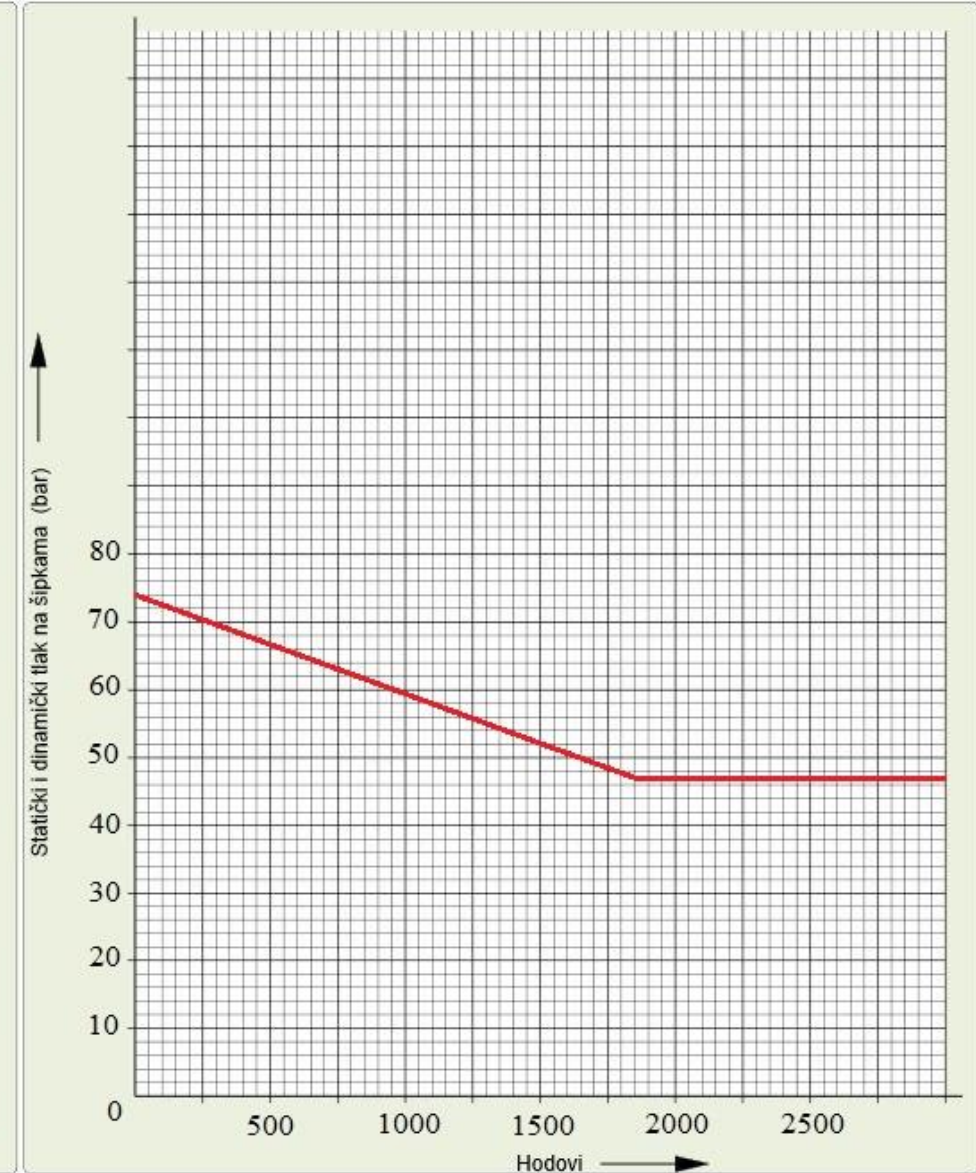
Gustoća isplake za ugušivanje KMW:  $Gustoća\ isplake + \frac{TBŠZ}{VD\ bušotine \times 0,0981} = 1,50 + \frac{30}{3800 \times 0,0981} = 1,58\ kg/l$

Početni cirkulacijski tlak TCP: Dinamički pad tlaka + TBŠZ = 44 + 30 = 74 bar

Konačni cirkulacijski tlak TCK:  $\frac{Gustoća\ isplake\ za\ ugušivanje}{Gustoća\ isplake} \times TCS = \frac{1,58}{1,50} \times 44 = 46,36\ bar$

(K) = TCP - TCK = 74 - 46,36 = 27,65 bar  $\frac{(K) \times 100}{(E)} = \frac{27,65 \times 100}{1873} = 1,48\ bar/100\ hodova$

Hodovi	Tlak (bar)
0	74
250	70,3
500	66,6
750	62,9
1000	59,2
1250	55,5
1500	51,8
1750	48,1
1868	46,36



Hodovi pumpe (hod)	Vrijeme (min)
Volumen Kapacitet hoda pumpe	Hodovi pumpe Smanjeni broj hodova
(E) 1868 hod	62,4 min
8674 hod	min
7485 hod	min
16159 hod	min
18302 hod	min
_____ hod	_____ min
_____ hod	_____ min



## **IZJAVA**

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

---