



YU ISSN 1451-0162

UDC 622

mining engineering

# RUDARSKI RADOVI

2/2014

komitet za podzemnu eksploataciju mineralnih sirovina

Rudarski radovi je asopis baziran na bogatoj tradiciji stru nog i nau nog rada u oblasti rudarstva, podzemne i površinske eksploatacije, zaštite životne sredine pripreme mineralnih sirovina, geologije, mineralogije, petrologije, geomehanike i povezanih srodnih oblasti. Izlazi dva puta godišnje od 2001.godine, a od 2011. godine etiri puta godišnje.

**Glavni i odgovorni urednik**

Prof.dr Mirko Ivkovi ,viši nau ni saradnik, Komitet za podzemnu eksploataciju mineralnih sirovina Resavica  
E-mail:mirko.ivkovic@jppeu.rs  
Tel:035/627-566

**Zamenik glavnog i odgovornog urednika**

Doc.dr Jovo Miljanovi  
Rudarski fakultet Prijedor,Republika Srpska

**Urednici**

Vlado Todorovi  
Danijel Jankovi

**Prevodilac:**

NenadRada a  
Dražana Toši

**Štamparija:Grafpromet doo,Kragujevac**

Tiraž:100 primerka

**Internet adresa**

[www.jppeu.rs](http://www.jppeu.rs)

Izdavanje asopisa finansijski podržavaju  
Komitet za podzemnu eksploataciju mineralnih sirovina Resavica  
ISSN 1451-0162

**Indeksiranje asopisa u SCIndeksu i u ISI**

Sva prava zadržana

Izdava

Komitet za podzemnu eksploataciju mineralnih sirovina Resavica

E-mail:mirko.ivkovic@jppeu.rs

Tel:035/627-566

Nau no-tehni ka saradnja sa

Inženjerskom Akademijom Srbije

KOMITET ZA PODZEMNU EKSPLOATACIJU MINERALNIH SIROVINA
---

**Ure iva ki odbor**

**Akademik Prof.dr Mladen Stjepanovi**

Inženjerska akademija Srbije

**Prof dr Vladimir Bodarenko**

Nacionalni rudarski univerzitet,

Odeljenje za podzemno rudarstvo, Ukrajina

**Prof.dr Milivoj Vuli**

Univerzitet u Ljubljani, Slovenija

**Akademik Prof.dr Jerzy Kicki**

Državni institut za mineralne sirovine i energiju,

Krakov, Poljska

**Prof.dr Vencislav Ivanov**

Rudarski fakultet Univerziteta za rudarstvo i geologiju

„St. Ivan Rilski“Sofija Bugarska

**Prof. Dr Tajduš Antoni**

Stanislavov univerzitet za rudarstvo i metalurgiju,

Krakov, Poljska

**Dr Dragan Komljenovi**

Nuklearna generatorska stanica G2, Hidro –Quebec,

Kanada

**Doc.dr Zlatko Dragosavljevi**

Fakultet za primenjenu ekologiju

Futura Univerzitet Singidunum-

Beograd

**Prof.dr Dušan Gagi**

Rudarsko-geološki fakultet Beograd

**Prof.dr Nebojša Vidanovi**

Rudarsko-geološki fakultet Beograd

**Prof.dr Ne o uri**

Tehni ki institut, Bijeljina, Republika Srpska

**Prof.dr Vitomir Mili**

Tehni ki fakultet Bor

**Prof. Dr Rodoljub Stanojlovi**

Tehni ki fakultet Bor

**Dr Miroslav R. Ignjatovi , viši nau ni saradnik**

Privredna komora Srbije

**Doc.dr Slobodan Majstorovi**

Rudarski fakultet, Prijedor

**Prof.dr Vladimir Malbaši**

Rudarski fakultet, Prijedor

**Doc. dr Lazar Stojanovi**

Rudarski fakultet, Prijedor

**Prof.dr Radoje Pantovi**

Tehni ki fakultet, Bor

**Doc dr Duško ukanovi**

JP PEU Resavica

---

COMMITTE OF UNDERGROUND EXPLOITATUONOF THE MINERAL DEPOSITS

---

# SADRŽAJ

**Svetlana Simi**

ISTRAŽIVANJE UGLJA U DESPOTOVA KOM BASENU

**Zvonimir Boškovi , Vladimir ebašek, Sanel Nuhanovi , Jovana Crnogorac**

ODREĐIVANJE MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA CEMENTNOG KAMENA ZA TRAJNU  
NE PROPUSNOST CEMENTIRANOG MEĐUPROSTORA

**Zvonimir Boškovi , Vladimir ebašek, Sanel Nuhanovi , Jovana Crnogorac**

DEFORMACIJE I PROPUSNOST KAMENA RAZLIČITOG SASTAVA U TVRDIM FORMACIJAMA

**Zvonimir Boškovi , Vladimir ebašek, Sanel Nuhanovi , Jovana Crnogorac**

DEFORMACIJE I PROPUSNOST CEMENTNOG KAMENA RAZLIČITOG SASTAVA U MEKIM DO  
SREDNJE TVRDIM FORMACIJAMA

## EXPLORATION OF COAL IN THE DESPOTOVAC BASIN

12, [svetlana.simic@gzs.gov.rs](mailto:svetlana.simic@gzs.gov.rs)

19.

2011. 2013.

( )

(<sup>1</sup>) (<sup>2</sup>)

( , 1975) .

700 (1977),  
- „ - „ „ 250  
- - „ „ 200  
- - „ „ 250

14 (1977),

( „ )

( „ )

” “.

” “.

2/1,0 m – 6,0 m; ( : / 0,6 m- 5,8 m; 2/0,7 m – 6,1 m – :  
1/1,0 m – 6,8 m; 2/1,0 m – 6,5 m).

( ),

” “ , , , , , 26%, 30 %  
45 %. , , 1,3 %. 19 % 21  
%. 14.800 kJ/kg. 10.000 kJ/kg,  
1,21 t/m<sup>3</sup>.

2011. 2012. ( , 2011, 2012).

20 km<sup>2</sup>.

m.

500 - 600

150,0 m 200,0

2011.

( -4, -4 -5) ( -2 -3) 6 ,  
0,3 m), ( -2) 4 ( -1). ( 0,2 m

( 80 100 -  
I 2) ,

( “ “ ” “); 100 250  
( 3); 250 550  
( 4).



UDK:622.33:622.272:622.814(0.45)=861

## ODERE IVANJE MEHANI KIH KARAKTERISTIKA CEMENTNOG KAMENA ZA TRAJNU NEPROPUSNOST CEMENTIRANOG ME UPROSTORA

Zvonimir Boškovi<sup>1</sup>, Vladimir Čebašek<sup>2</sup>, Sanel Nuhanovi<sup>3</sup>, Jovana Crnogorac<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Rudarski fakultet Prijedor

<sup>2</sup> Rudarsko -geološki fakultet Beograd

<sup>3</sup> Rudarsko –geološko-građevinski fakultet Tuzla

### Abstract

Različiti tipovi aditiva za širenje cementnog kamena postoje već nekoliko godina. Neki aditivi su na bazi kalcijumsulfata, kalcijumsulfata poluhidrata ili natrijumsulfata za stvaranje etringita. Ovi ekspaniraju i cementi pokazuju više od deset puta veću širenje nego što ih imaju portland cementne kaše sa dodatkom soli. Poznati su i ekspaniraju i cementi koji sadrže kalcijum ili magnezijumoksid. Širenje cementa je u vezi sa hemijskim i mineraloškim promenama, koje proizilaze iz hidratacije i kristalizacije inilaca. Velikina širenja zavisi od koncentracije aditiva za širenje, količina cementa, dizajna cementnog rastvora a njihova primena od bušotinskih uslova (pritisak, temperatura), kao i vrste stena u kojima se primenjuju.

### UVOD

Osnovni cilj u određivanju sastava cementnih mešavina za naftne i gasne bušotine je obezbeđenje cementnih rastvora koji su pogodni za primenu na terenu. To znači da one mogu biti lako pripremljene i upumpane konvencionalnom površinskom opremom i potisnute na zahtevano dubinu sa odgovarajućim vremenom vezivanja. Rastvor mora zadržati stabilnost tokom celog procesa.

Da obezbedi dug vek eksploatacije bušotine cementni kamen mora biti mehanički i hemijski otporan. Cementni kamen nastao od API bušotinskog cementa je otporan na agresivne bušotinske fluide i mora biti otporan na naprezanja tokom proizvodnje ili operacija u bušotini, tj. ispitivanje nepropustljivosti zaštitnih cevi, operacije stimulacije, temperaturne promene tokom proizvodnih ciklusa u celom veku bušotine. Neophodno je analiziranje mehaničkog ponašanja cementnog kamena različitih tipova cementnih mešavina pod bušotinskim uslovima da bi se došlo do optimalnog sastava cementne mešavine. Umesto dosadašnje analize vrste cementnog kamena kao glavne osobine, treba posmatrati kompletan mehanički sistem kojine zaštitne cevi, cementirani mešavina i formacija. Povećanje pritiska ili temperature u bušotini prvo se prenosi na zaštitne cevi usled čega se naprezanja prenose i na cementni kamen.

### SASTAV ISPITIVANIH CEMENTNIH MEŠAVINA

Procedura mešanja i testiranja rastvora vršena je u skladu sa API Spec 10. Sastav cementnih mešavina uključuje aditivi za širenje i standardni aditivi kao što su aditivi za smanjenje trenja mešavine u esticama, za sprečavanje stvaranja pene u cementnom rastvoru, aditivi za kontrolu vremena vezivanja i aditivi za regulaciju filtracije.

Lista sastava cementnih mešavina data je u Tabeli 1.

Ispitivane su tri različite grupe specifičnih gustina cementnih rastvora:

- Prvu grupu čine cementne mešavine smanjenih specifičnih gustina 1.45 – 1.55 kg/dm<sup>3</sup> za čijom upotrebom se ukazuje sve veća potreba za primenom na poljima gde je uočena pojava gubitaka cirkulacije u toku cementacije, snižavanje nivoa cementnog rastvora u fazi očvršćavanja posle cementacije a samim tim i gubitka nepropusnosti međuprostora.



- Drugu grupu čine cementne mešavine specifične gustine 1.70-1.90 kg/dm<sup>3</sup> i spadaju u grupu srednje teških cementnih mešavina. Koriste se u širokom rasponu specifične gustine srednje teških cementnih mešavina za cementaciju mekog prostora daleko iznad proizvodnih formacija.
- Treću grupu čine teške cementne mešavine sa specifičnom gustinom > 1.90 kg/dm<sup>3</sup> čija je upotreba usmerena na međuprostor bušotine u zoni proizvodnih formacija u širokom rasponu specifičnih gustina.

## KARAKTERISTIKE CEMENTNIH RASTVORA

Određivanje reoloških karakteristika cementnih rastvora je vršeno na 77<sup>0</sup>C (API Standard). Konvencionalne cementne mešavine su korišćene u svrhu porećenja. U svim cementnim mešavinama koristio se bušotinski cement Dyckerhoff Class G cement. Mešavine su pripremane običnom vodom. Aditiv za širenje (koji se dodaje u ove sisteme) bio je u osnovi kalcijumoksid (CaO). Reologija rastvora je merena reometrom Fann 35 posle pripreme na sobnoj temperaturi i posle kondicioniranja od 20 minuta. Vreme vezivanja ovih cementnih mešavina je moguće kontrolisati i nije bilo izdvajanja slobodne vode.

Reološke karakteristike cementnih rastvora nisu interesantne za ova ispitivanja i nisu prikazane u tabeli 1. Prikazane su samo mehaničke karakteristike da bi se istakao značaj Young-ovog modula elastičnosti na stabilnost cementnog kamena različitih cementnih mešavina.

Tabela 1. Sastav cementnih mešavina sa mehaničkim karakteristikama

<i>Cementna mešavina</i>	<i>Aditiv za širenje (% na težinu cementa)</i>	<i>Specifična gustina (kg/dm<sup>3</sup>)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>Young-ov modulo elastičnosti (MPa)</i>	<i>Poissonov koeficijent ε</i>	<i>vrsto a na pritisak (MPa)</i>
X1	0	1.90	77	9200		36.6
X2	0	1.45	77	449	0.142	.7
X3	2	1.45	77	2650	0.163	12.1
X5	0	1.70	77	5200	0.17	21.6
X6	3.5	1.70	77	3700	0.19	21.0
X7	0	1.90	77	9242	0.24	33.5
X8	2	1.90	77	4100	0.22	21.2

## PRIPREMA UZORAKA

Cementni rastvori su nekoliko dana ovršavali u komori pod temperaturom i pritiskom koji odgovaraju bušotinskim uslovima. Pri tome su merena fizička i mehanička svojstva ovog cementnog kamena: vrsto a na istezanje, vrsto a na pritisak, elastična svojstva (Young-ov modul elastičnosti, Poisson-ov koeficijent), propusnost i promena zapremine tokom hidratacije (širenje/skupljanje). Sva ovršavanja su sprovedena pri pritisku od 20,7 MPa kako je definisano preporukama API 10b na temperaturama 77<sup>0</sup> C. Uzorci su ovršavani tokom perioda od najmanje tri dana sve dok (gotovo) stalna vrsto a na pritisak nije dostignuta. Na kraju tog perioda uzorci su ohlađeni i čuvani pod vodom.

Cementne kaše su bez sedimentacije materijala sa 0% slobodne vode. Izrada cementnih rastvora je sledila proceduru ISO 10426-2, Petroleum and natural gas industries - Cements and materials for well cementing – Part 2: Testing of well cements, July 2005. Uzorci cementnog kamena su izlagani dovoljno dugom vremenu zagrevanja da dostignu statičku temperaturu bušotine. Merenja Ultrasoničnim uređajima su rađena da pokažu kada je statička temperatura dostignuta.

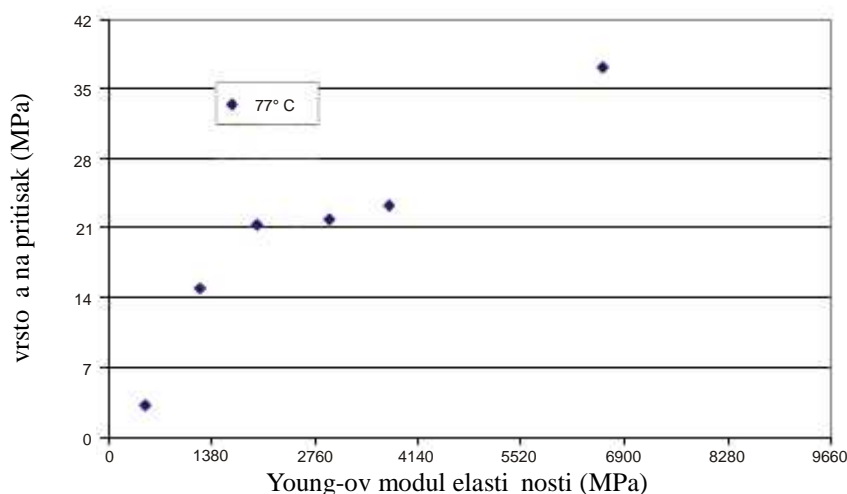
Uzorci cementnog kamena su ovršavani u kalupima i onda se oni odgovarajuće dimenzije sa odnosom dužine i prenika 2:1 prate i proceduru ISO 10426-2, Petroleum and natural gas industries - Cements and materials for well cementing – Part 2: Testing of well cements, July 2005 i ASTM method C469-02, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.

U svim primerima uzorci cilindričnog oblika su imali dimenzije 50.8mm dužine i prenika 25.4mm. Krajevi uzoraka su morali biti normalni na osu (dozvoljeno odstupanje < 0.5°) i poravnati. Pre testa merena je dužina uzoraka (dozvoljeno odstupanje do 0.1mm) pre prenika (dozvoljeno odstupanje 0.05mm). Za svaki cementni sistem izrađena su tri cilindrična uzorka. Test određivanja vrsto a na pritisak je rađen na jednom uzorku a na preostala dva testovi za određivanje

Jungovih modula elastičnosti i Poissonovih koeficijenata. Svi uzorci su korišćeni za merenje vrstoće na pritisak. To znači da je vrstoća na pritisak prikazana kao srednja vrednost na 3 uzorka a Youngov moduo elastičnosti i Poissonov koeficijent na dva uzorka.

## PRIKAZ REZULTATA I ANALIZA ISPITIVANJA

Tipovi cementnih mešavina sa aditivima za širenje dovode do smanjenja Young-ovog modula u poretnju sa standardnim cementnim mešavinama i stoga do povećanja elastičnosti. Širok opseg Young-ovih modula može biti dobijen za datu specifičnu gustinu. Tabela 1 pokazuje vrednosti Young-ovog modula od 9242 MPa do 4100 MPa (cementne mešavine X7 i X8), što je postignuto promenom aditiva za širenje. Koncentracija aditiva za širenje kontroliše u prvom redu elastična svojstva ovislog cementa (većina koncentracija većina elastičnost). Međutim, povećanje elastičnosti je povezano sa smanjenjem vrstoće na pritisak (slika 1), i mora se uvek proveriti da li je vrstoća na pritisak cementnog kamena dovoljna da osigura stabilnost zaštitnih cevi. Posle cementacije tehničke kolone zaštitnih cevi neophodna vrstoća cementnog kamena za nastavak bušenja mora biti 3.5 MPa a posle cementacije eksploatacione kolone zaštitnih cevi cementni kamen u međuprostoru mora imati vrstoću u na pritisak od min. 21 MPa. Ova vrednost omogućuje izvođenje perforacionih radova i privođenju proizvodnji.



Slika 1. vrstoća na pritisak cementnog kamena u odnosu na Young-ov moduo elastičnosti na 77°C

Smanjenje Young-ovog modula može biti postignuto smanjenjem specifične gustine cementne mešavine kao što je prikazano u tabeli 1. Cementna mešavina specifične gustine  $1.70 \text{ kg/dm}^3$  sa aditivima za elastičnost (X6) ima manju vrednost Young-ovog modula elastičnosti nego standardna cementna mešavina gustine  $1.70 \text{ kg/dm}^3$  (cementna mešavina X5). Cementna mešavina X2 ( $1.45 \text{ kg/dm}^3$  bez aditiva za širenje) pokazuje veoma malu vrednost Young-ovog modula ali i neprihvatljivo nisku vrednost vrstoće na pritisak. Elastični sistem (cementna mešavina F sa specifičnom gustinom  $1.45 \text{ kg/dm}^3$ ) ima isto tako malu vrednost Young-ovog modula ali sa mnogo većom vrednošću u vrstoći na pritisak. U stvari, u poretnju sa svim različitim sistemima, elastični sistem uvek pokazuje najveću vrednost vrstoće na pritisak za datu vrednost Young-ovog modula.

Vrednost Poissonovog koeficijenta ovislog cementnog kamena ukazuje na integritet ostvarene cementne veze sa zaštitnim cevima i formacijom. Iz tog razloga se čine naponi da se dostigne većina vrednost Poissonovog koeficijenta.

## ZAKLJUČAK

Cementni kamen sa aditivima za elastičnost u srednje tvrdim i tvrdim formacijama ima većina naprezanja, dok u srednje tvrdim ima većina deformacije u odnosu na cementni kamen Class G. To ukazuje da cementni kamen sa aditivima za elastičnost u ovakvim bušotinskim uslovima ima povoljnija mehanička i elastična svojstva (nižu vrednost Young-ovog modula elastičnosti i Poissonov-koeficijent od cementnog kamena Class G) koja utiču na osiguranje stabilnosti sistema zaštitne cevi – cementni kamen – formacija, kao i na osiguranje nepropusnosti ovog sistema. Debljina zida cevi ima bitnu ulogu u prenosu tangencijalnih naprezanja, pa samim tim i deformacija na cementni kamen. To znači da se u bušotinama u kojima su ugrađene zaštitne cevi sa velikom debljinom zida može koristiti cementna mešavina čiji cementni kamen ima manje vrednost vrstoće na istezanje, odnosno vrstoće na pritisak.

## LITERATURA

1. Goodwin, K.J. and Crook, R.J.: "Cement Sheath Stress Failure", SPEDE (Dec. 1992) .
2. Jackson, P.B. and Murphey, C.E.: "Effect of Casing Pressure on Gas Flow Through a Sheath of Set Cement", paper, SPE 25698, presented at the 1993 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam.
3. Thiercelin M.J., Dargaud B, Baret J.F. and Rodriguez W.J.: "Cement design based on cement Mechanical response," SPE , (Dec. 1998).
4. Bosma M. , Ravi K., Van Driel W. and Schreppers G. J.: "Design Approach to Sealant Selection for the Life of the Well", presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition in Houston, Oct. 3-6, 1999.
5. and Exhibition in Houston, Oct. 3-6, 1999.
6. Justnes, H., Reynier, B., van Loo, D. and Sellevold, E.J.: "An Evaluation Of Methods for Measuring Chemical Shrinkage of Cementitious Pastes", Nordic Concrete Research, 1994.
7. Baumgarte, C., Thiercelin, M. and Klaus, D.: "Case Studies of Expanding Cement To Prevent Microannular Formation", presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition in Houston, Oct. 3-6, 1999.
8. API SPECIFICATION PRACTICE 10B: Recommended Practice for Testing Well Cements, 22nd Edition, December, 1997 .

UDK:622.02:622.344/349(0.45)=861

## DEFORMACIJE I PROPUSNOST CEMENTNOG KAMENA RAZLIČITOG SASTAVA U TVRDIM FORMACIJAMA

Zvonimir Bošković<sup>1</sup>, Vladimir Čebašek<sup>2</sup>, Sanel Nuhanović<sup>3</sup>, Jovana Crnogorac<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Rudarski fakultet Prijedor

<sup>2</sup> Rudarsko-geološki fakultet Beograd

<sup>3</sup> Rudarsko-geološko-građevinski fakultet Tuzla

### *Abstract*

Nije uvek opravdana upotreba cementnih mešavina sa dodatkom aditiva za širenje i fleksibilnost. U bušotinama koje ne mogu biti podvrgnute cikličnim naprezanjima ili promeni bušotinskih uslova mora se modelom analizirati da li je vrsta i na pritisak cementnog kamena dovoljna da izdrži radijalna, tangencijalna naprezanja i deformacije. Ukoliko jeste, standardni tipovi cementnih mešavina, sa odgovarajućom vrstom omotača na pritisak cementnog kamena, daju sigurnost za otkrivanje i uvođenje stabilnosti cementiranog međuprostora u radnom veku bušotine.

## UVOD

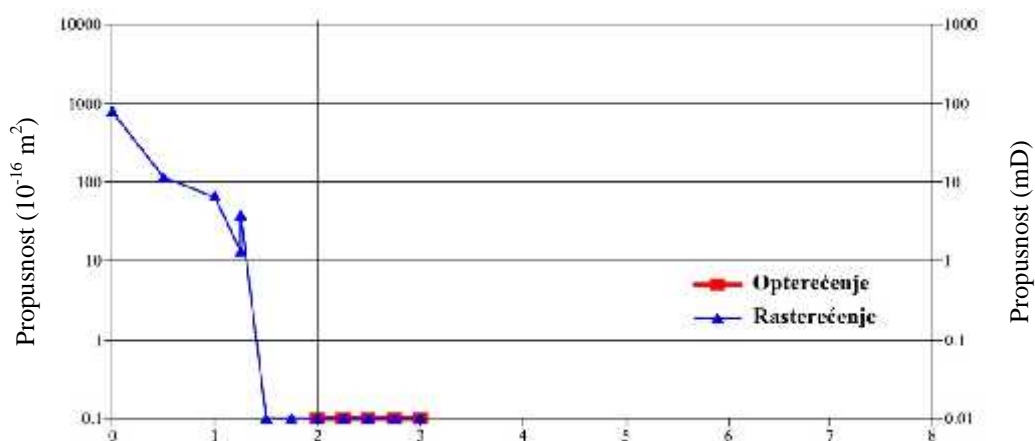
Pregledom rezultata modelima određeni uticaji promena bušotinskih uslova na naprezanja cementnog kamena uoava se poveanje tangencijalnih naprezanja i deformacija cementnog kamena. Analizom su obuhvaćeni rezultati tangencijalnih naprezanja i deformacija na kontaktu zaštitne cevi – cementni kamen, zato što obe veličine svoje maksimalne vrednosti postižu u ovoj tački, dok radijalna naprezanja ne prelaze vrednost vrstove na pritisak cementnog kamena. Analiza je vršena za cementni kamen Class G i Class G + aditiv za širenje, tako da je izvršen proračun najčešće korišćenih konstrukcija bušotine. Ovakvi modeli su lako prilagodljivi konstrukcijama bušotina, bilo za analizu cementiranih međuprostora tehničkih kolona zaštitnih cevi ili eksploatacionih kolona u različitim geometrijama bušotina. Laboratorijska testiranja su slična kao i za cementne mešavine u mekim do srednje tvrdim formacijama, što prsten debljine 7mm simulira Young-ov modul elastičnosti od 10000 MPa. Ova veličina je tipična za konsolidovane pešare.

## PROPUSNOST CEMENTNOG KAMENA MEŠAVINE TIP Class G

Provera stabilnosti cementnog kamena u uslovima anularne geometrije je izvršena laboratorijskim ispitivanjima. Izmene u bušotinskim uslovima rezultiraju bilo u skupljanju, bilo u širenju zaštitnih cevi i mogu biti simulirane. Takva ispitivanja daju procenu mehaničkih svojstava cementnog kamena u uslovima koji vladaju u bušotini. Priroda naprezanja koja se stvara u međuprostoru (istezanje ili pritisak) je slična onima koje cementni kamen mora izdržati u realnoj bušotini. Mehanička svojstva (modul elastičnosti i vrstovana na pritisak) određena su na cilindričnim probnim telima cementnog kamena (prečnika 25,4mm i visine 50,8mm). Rastvori su pripremani, očišćavani i ispitivani u sobnim uslovima. Cementni rastvor je nasut u anularni prostor između simulirane zaštitne cevi i formacije. Formaciju simulira metalni prsten. Nakon očišćavanja cementnog kamena, postavljen je sistem sa gumenom komorom za potrebe izvođenja merenja propusnosti. To uključuje metalni prsten smešten na vrh cementnog kamena i gumenu komoru postavljenu oko zaštitne cevi. Propusnost na vazduh merena je pri diferencijalnom pritisku od jednog bara i definisana je kao provodljivost celog sistema. Stoga, to uključuje relativnu propusnost na vazduh cementnog kamena, propusnost fraktura i protok vazduha u mikroanulusu. Propusnost cementnog kamena za ispitivane sisteme je mala i u toku ispitivanja najmanja izmerena propusnost iznosila je 0.01 mD.

Mehaničke oštećenje cementnog kamena uzrokovano je poveanjem pritiska u bušotini (ispitivanje hermetičnosti zaštitnih cevi, poveanje specifične gustine isplake, perforacijom zaštitnih cevi, stimulacijom, proizvodnjom gasa), velikim poveanjem temperature u bušotini (geotermalna proizvodnja, injektiranje pare i bušotine sa ekstremnim termobarskim uslovima) ili opterećenjem formacija (klizanje, sabijanje, rasedanje...). Nepovoljnije stanje je kod nekonsolidovanih formacija pošto one nisu sposobne da mehanički prate deformaciju cementnog kamena. U slučaju poveanja temperature, kod geotermalnih bušotina, termalne osobine elika, cementa i stene kao i prirast temperature moraju biti razmatrani.

Sile stvorene u cementnom kamenu imaju mali uticaj na propusnost u tvrdim formacijama zato što je cementnom kamenu sprečeno širenje i pukotine su shodno tome uže. Sistem bez aditiva (Class G) može izdržati deformacije od 45  $\mu\text{m}$ .



Slika 1. Propusnost cementne mešavine tip Class G u zavisnosti od opterećenja u tvrdim formacijama

## MODEL KONA NIH ELEMENATA

Radialna naprezanja, tangencijalna naprezanja i deformacije su razmatrane uvek za dva materijala. U savremenom projektovanju analiza naprezanja i stabilnosti u bušotinskom me uprostoru se naj češće vrši naponsko-deformacijskim metodama. Od naponsko-deformacijskih metoda najveću primenu ima metoda kona nih elemenata. Ovom metodom se vrši analiza promena naponskog stanja u sistemu zaštitne cevi-cementni kamen-formacija, gde se izvode radovi na bušenju i na osnovu toga definišu zone u kojima je došlo do promene naprezanja i eventualno, narušavanja stabilnosti. Ovakvim pristupom je moguće odrediti zonu u kojoj dolazi do povećanja naprezanja ili čak loma i na taj način sagledati uticaj predloženog rešenja konstrukcije sistema zaštitne cevi – cementni kamen – formacija na koncentraciju napona prvenstveno u cementnom kamenu. Na taj način se mogu sagledati sve prednosti i mane predloženih rešenja, kao i predvideti njihov uticaj na dalji nastavak bušenja ili vršenja određenih operacija pri eksploataciji.

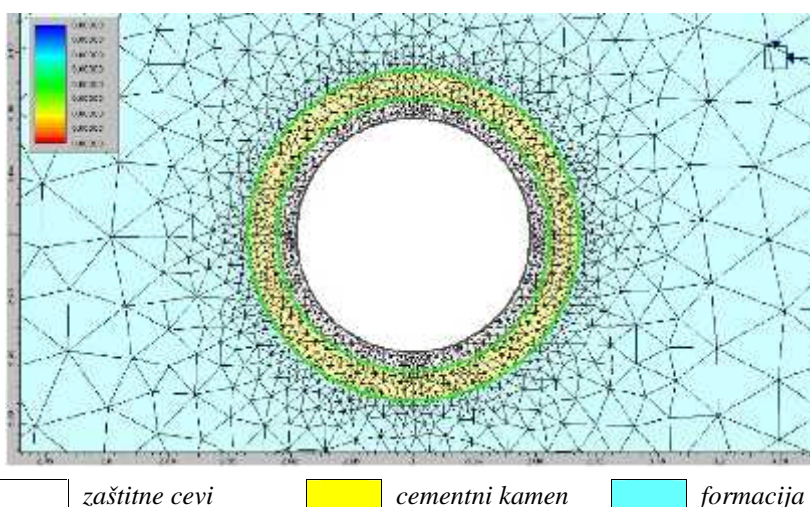
Modelom su određena naprezanja u bušotini sledeće geometrije:

### Geometrija modela

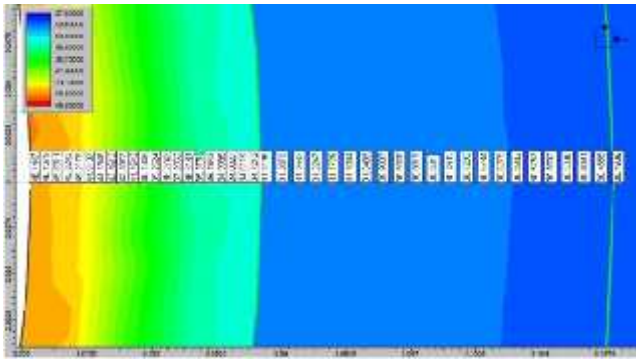
Bušotina: prečnik	<b>215,90 mm</b>	Cementni kamen: <b>Class G</b>
dubina	<b>2800,00 m</b>	
Zaštitne cevi: P – 110 (51,8 kg/m <sup>3</sup> )		Formacija: <b>tvrda</b>
spoljašnji prečnik	<b>177,80 mm</b>	
unutrašnji prečnik	<b>152,90 mm</b>	

Tabela 1. Fizičko-mehanička svojstva materijala za Mohr-Coulomb-ov kriterijum loma

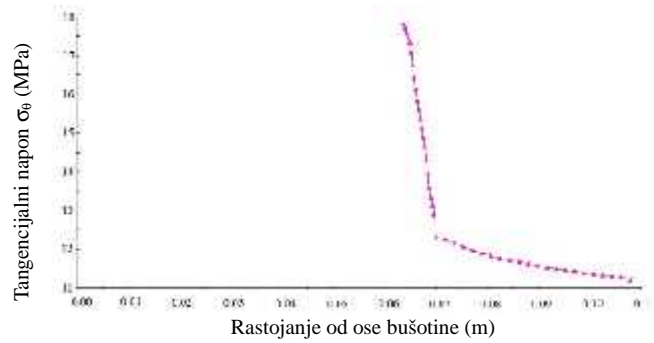
Materijal	Young-ov modul elastičnosti $E_e$ (MPa)	Poisson-ov koeficijent $\nu$	vrsta $\sigma$ na istezanje $\sigma_t$ (MPa)	Ugao unutrašnjeg trenja $\phi$ (°)	Kohezija $c$ (MPa)
eliks	200000	0,27	760,00	53,50	138,77
Cementni kamen <b>Class G</b>	9200	0,20	2,07	42,95	6,05
Formacija <b>tvrda</b>	8960	0,29	3,00	30,00	10,50

Slika 2. Izgled modela kona nih elemenata bušotine sa zaštitnim cevima 177,80 mm P-110 (51,8 kg/m<sup>3</sup>) ugrađenim do 2800 m (tvrda formacija – cementni kamen Class G)

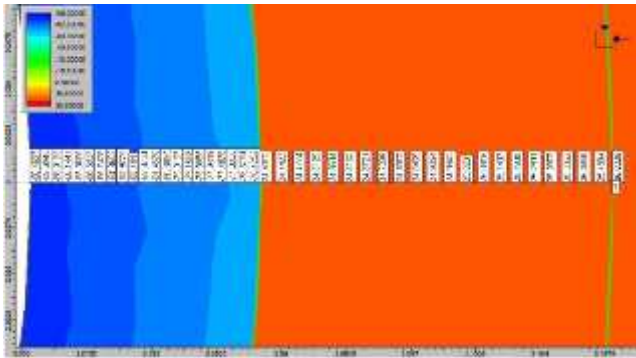
**Pritisak u bušotini  $P = 20 \text{ MPa}$**



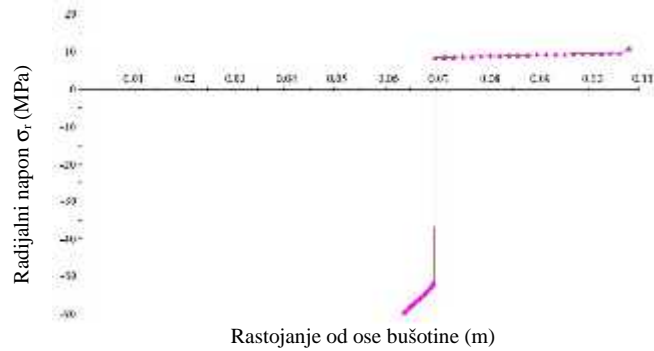
Slika 3. Raspodela tangencijalnog napona  $\tau$ , u cementnom kamenu



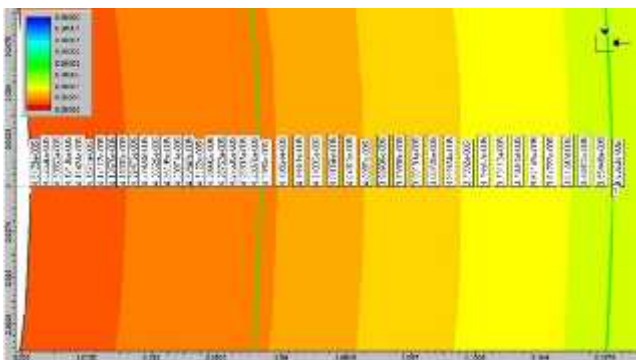
Slika 4. Dijagram raspodele tangencijalnog napona  $\tau$ , u cementnom kamenu



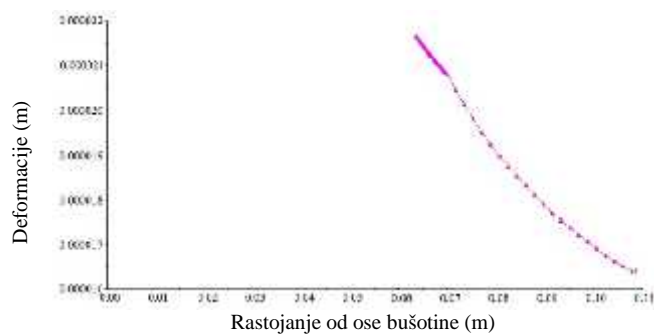
Slika 5. Raspodela radijalnog napona  $\tau_r$ , u cementnom kamenu



Slika 6. Dijagram raspodele radijalnog napona  $\tau_r$ , u cementnom kamenu



Slika 7. Raspodela deformacije u cementnom kamenu



Slika 8. Dijagram raspodele deformacija u cementnom kamenu

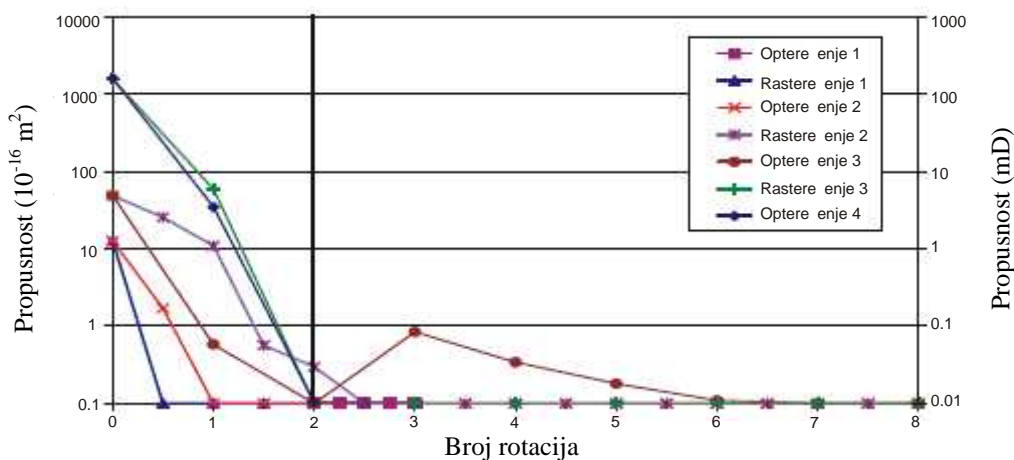
**CIKLI NA OPTERE ENJA CEMENTNE MEŠAVINE TIP X2**

Na slici 9 pokazani su ciklusi optere enja i rastere enja za cementnu mešavinu tip X2. U prvom ciklusu pri rastere enju, propusnost je porasla, ukazuju i na stvaranje mikroanulusa. Cementna mešavina tip X2 može zatvoriti mikroanulus od  $45\mu\text{m}$  u ovako stešnjenim uslovima. Po o ekivanju, nije prime eno ošte enje u ovim uslovima optere enja, sa minimalnom propusnoš u. U ovako stešnjenim uslovima, sistem X2 je manje efikasan

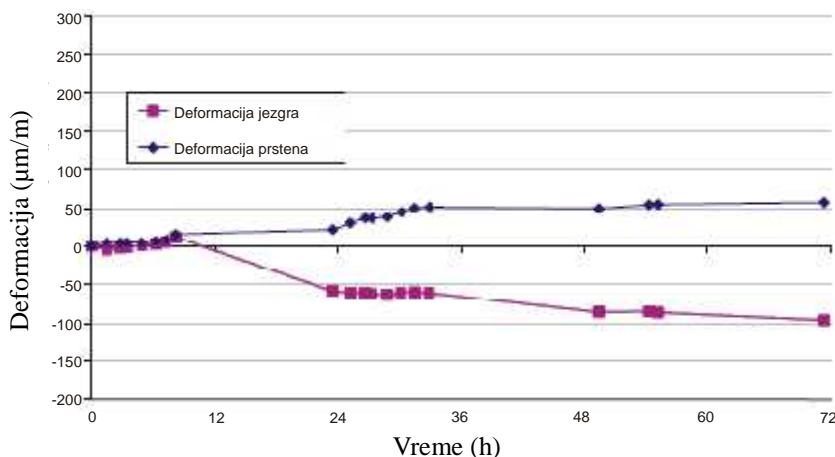


u zatvaranju mikroanulusa ukazuju i da grani ni uslovi (osobine formacije) mogu zna ajno uticati na mogu nost ostvarivanja nepropusnosti datog sistema.

Mikroanulus je bio zatvoren pri rastere enju sistema tj. smanjenjem naprezanja. Na kraju ispitivanja nije uo ena nijedna pukotina na površini cementnog kamena.



Slika 9. Propusnost cementne mešavine tip X2 merena u zavisnosti od optere enja u tvrdim formacijama



Slika 10. Deformacija cementne mešavine tip X2 pri o vrš avanju

Modelom su odre ena naprezanja u bušotini slede e geometrije:

### Geometrija modela

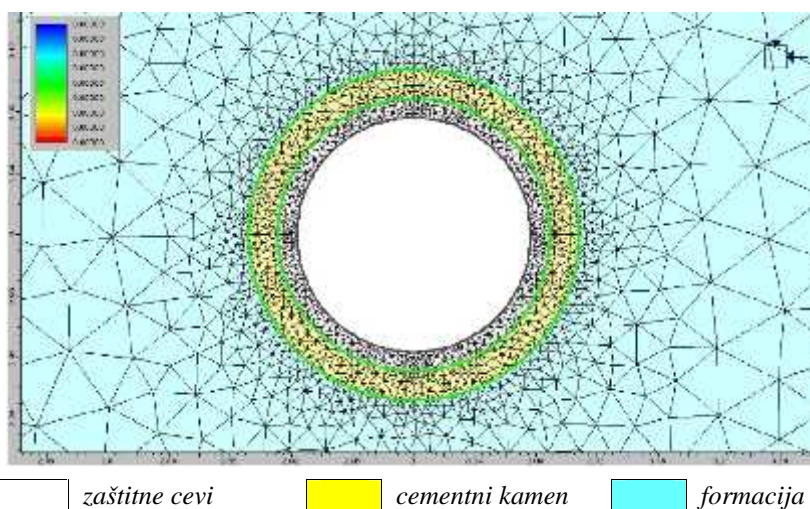
Bušotina: pre nik **215,90 mm** Cementni kamen: **Flexstone<sup>ü</sup>**  
 dubina **2800,00 m**  
 Zaštitne cevi: P – 110 (51,8 kg/m<sup>3</sup>) Formacija: **tvrda**  
 spoljašnji pre nik **177,80 mm**  
 unutrašnji pre nik **152,90 mm**

Tabela 2. Fizi ko-mehani ka svojstva materijala za Mohr-Coulomb-ov kriterijum loma

Materijal	Young-ov modul elasti nosti $E_e$ (MPa)	Poisson-ov koeficijent $\nu$	vrsto a na istezanje $\tau_t$ (MPa)	Ugao unutrašnjeg trenja $\phi$ (°)	Kohezija $c$ (MPa)
elik	200000	0,27	760,00	53,50	138,77

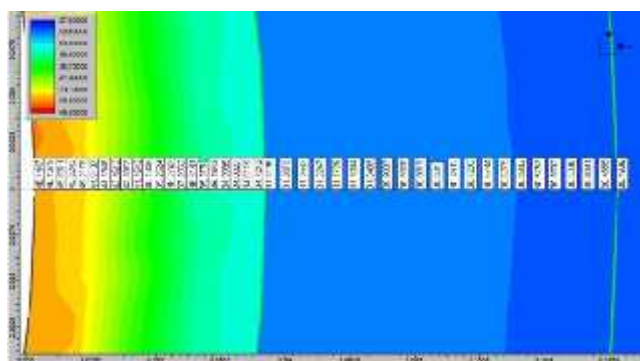


Cementni kamen <b>X2</b>	4100	0,20	2,07	42,95	6,05
Formacija <b>Tvrda</b>	8960	0,29	3,00	30,00	10,50

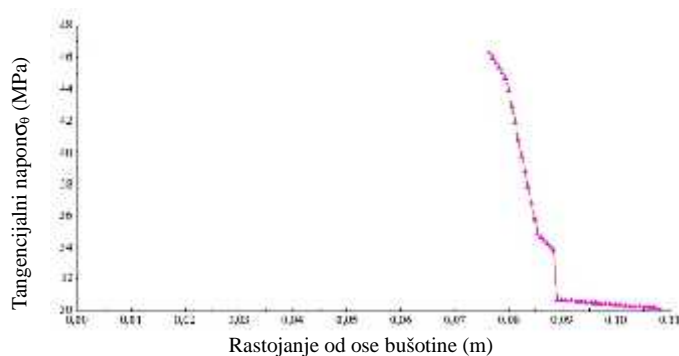


Slika 11. Izgled modela kona nih elemenata bušotine sa zaštitnim cevima 177,80 mm P-110 (51,8 kg/m<sup>3</sup>) ugra enim do 2800 m (tvrda formacija – cementni kamen X2)

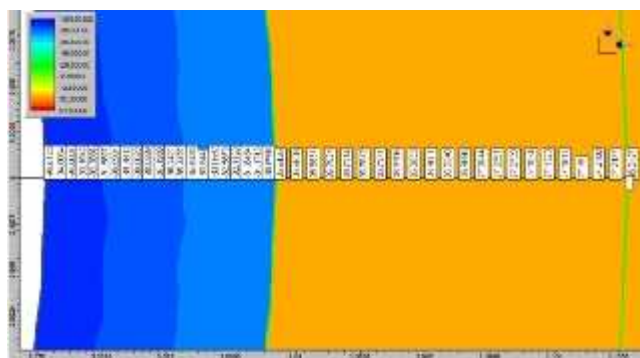
### Pritisak u bušotini $P = 20$ MPa



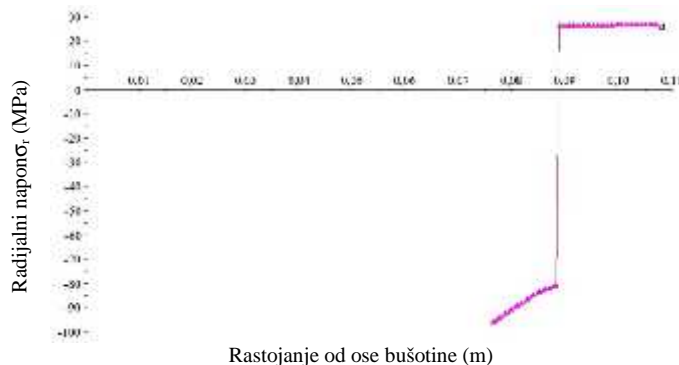
Slika 12. Raspodela tangencijalnog napona  $\tau$ , u cementnom kamenu



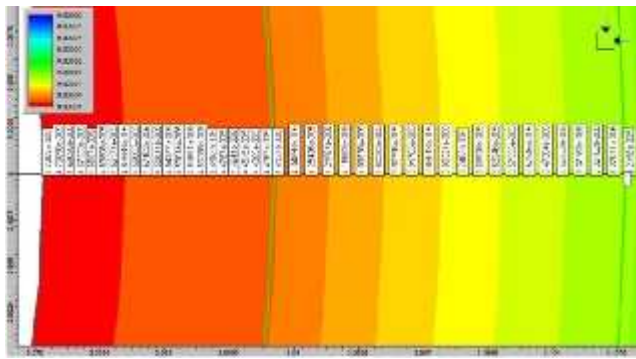
Slika 13. Dijagram raspodele tangencijalnog napona  $\tau$ , u cementnom kamenu



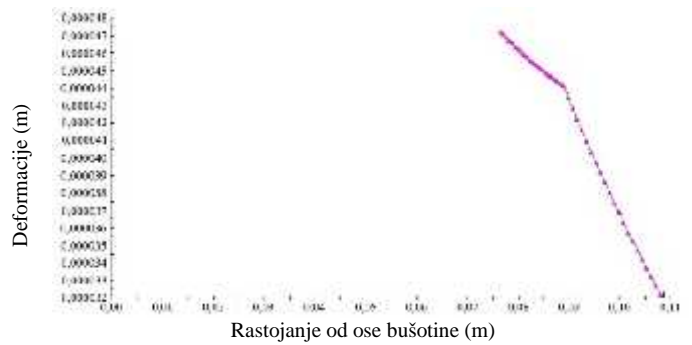
Slika 14. Raspodela radijalnog napona  $\tau_r$ , u cementnom kamenu



Slika 15. Dijagram raspodele radijalnog napona  $\tau_r$ , u cementnom kamenu



Slika 16. Raspodela deformacije u cementnom kamenu

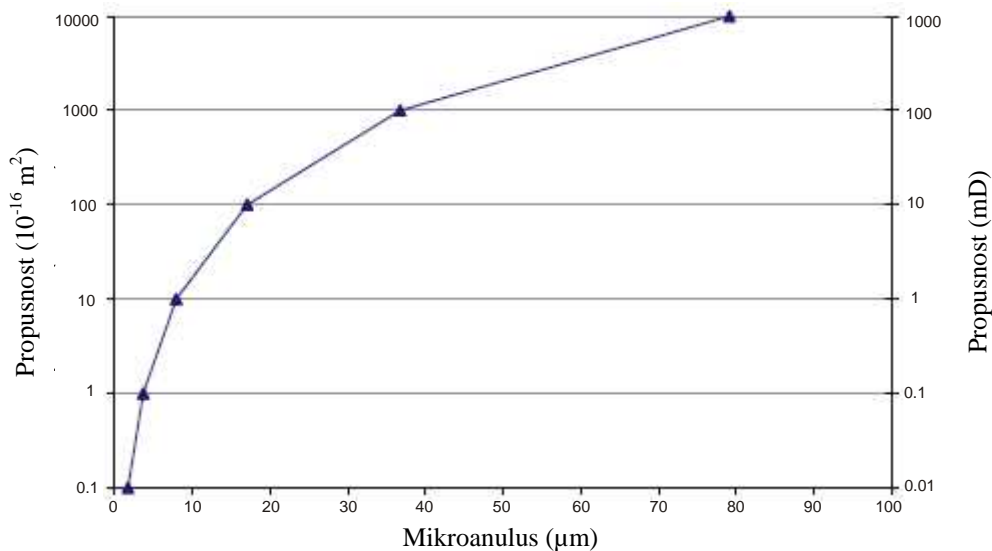


Slika 17. Dijagram raspodele deformacija u cementnom kamenu

Opšte zapažanje na osnovu rezultata ispitivanja je da propusnost znatno varira od jednog do drugog ciklusa optere enje-rastere enje usled stvaranja mikroanulusa. Suprotno, propusnost tokom širenja centralnog jezgra iz njegove po etne pozicije se ponavlja od jednog ciklusa do drugog.

U slu aju mikroanulusa, na merenu propusnost znatno uti e na in na koji se stvara deformacija ostvarene veze cementni kamen - centralno jezgro tj. cementni kamen – zaštitne cevi. Na slici 18 su prikazane izra unate vrednosti propusnosti idealnog mikroanulusa u funkciji njegove širine. U najgorem slu aju (nema zatvaranja mikroanulusa) mikroanulus od 60  $\mu\text{m}$  treba da ima propusnost od 500 mD.

U ve ini slu ajeva izmerene vrednosti propusnosti su bile mnogo manje, verovatno uzrokovane nepravilnim oblikom mikroanulusa zbog zaostalog sloja cementa na centralnom jezgru (zaštitnim cevima). Tako e smatram za gotovo sva ispitivanja da sa višestrukim ciklusima optere enja i rastere enja postoji trend smanjenja ovog efekta (uklanjanje hrapavosti) vode i ka pove anju propusnosti.



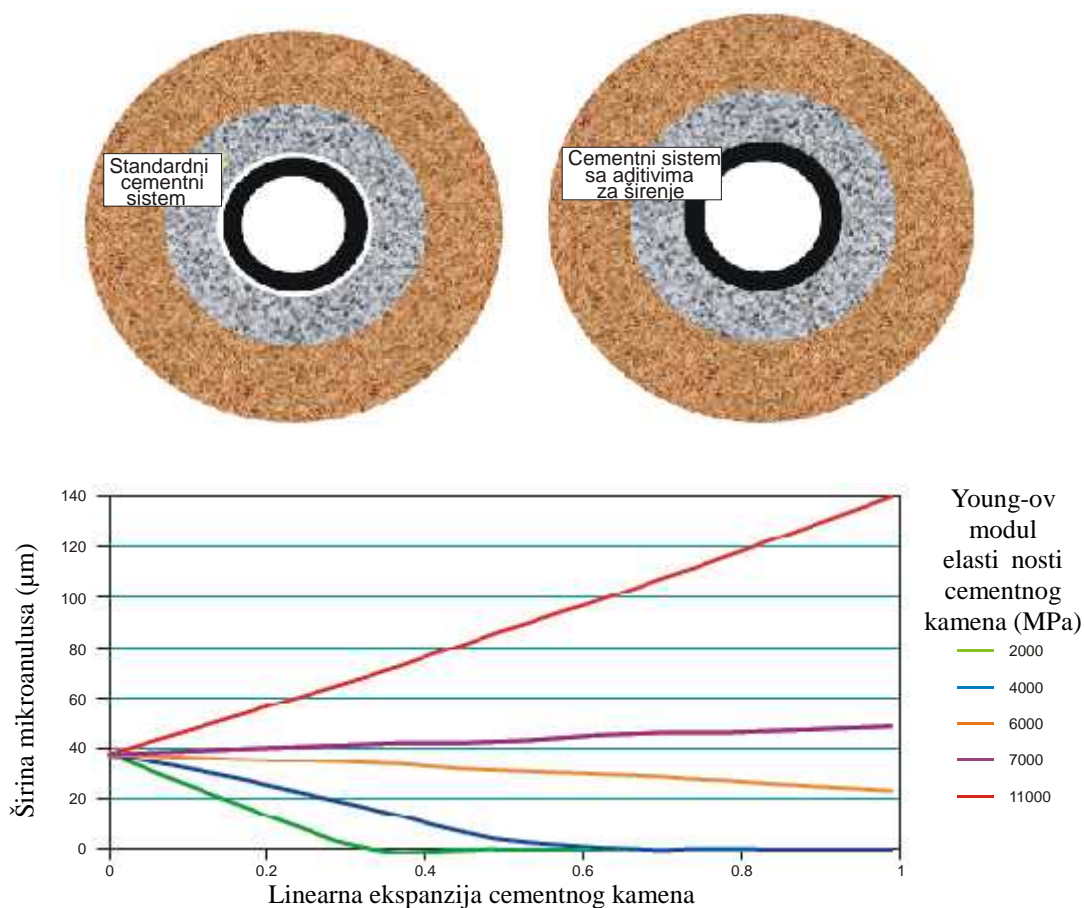
Slika 18. Promena propusnosti sa širinom mikroanulusa

Testovi nepropusnosti cementiranog me uprostora širokog opsega demonstrirali su da su mehani ke osobine cementnog kamena (elasti nost, vrsto a i širenje) i osobine formacije klju ni prametari u održavanju celovitosti cementnog kamena tokom radnog veka bušotine.

## EFEKTI ŠIRENJA CEMENTNOG KAMENA

Sadejstvo izme u aditiva za širenje i elasti nost postoji i ostvarena nepropusnost me uprostora ostaje nerazrušena samo ako je cementni kamen elasti niji od formacije. To se postiže dodavanjem aditiva za

elastičnost u cementu mešavinu time se smanjuje Jungov modul elastičnosti cementnog kamena.



Slika 19. Šema i dijagram širenja cementnog kamena različitih vrednosti Young-ovih modula elastičnosti

Na slici 19 su prikazani rezultati simulacija stvarenog mikroanulusa između zaštitnih cevi i cementnog kamena veličine 40 microns i neophodne ekspanzije cementnog kamena različitih Young-ovih modula elastičnosti za njegovo zatvaranje..

## ZAKLJUČAK

Testovi nepropusnosti cementiranog me uprostora širokog opsega demonstrirali su da su mehaničke osobine cementnog kamena (elastičnost, vrsta i širenje) i osobine formacije ključni parametri u održavanju celovitosti cementnog kamena tokom radnog veka bušotine.

Cementni kamen sa nižim vrednostima Young-ovog modula elastičnosti zahteva i manje linearno širenje da spreći pojavu mikroanulusa od 40 microns. Cementni sistem koji sadrži aditive za širenje je najbolji sistem za održavanje nepropusnosti cementiranog me uprostora. Za slučaj kada je vrednost Young-ovog modula elastičnosti cementnog kamena jednaka ili veća od vrednosti Young-ovog modula elastičnosti formacije ekspanziraju i cementni kamen će formirati još veći mikroanulus.

## LITERATURA

1. Thiercelin, M.J., Dargaud, B., Baret, J.F. and Rodriguez, W.J.: "Cement design based on cement mechanical response", SPE 52890
2. Bosma, M., Ravi, K. Van Driel W. and Schreppers G.J.: "Design approach to sealant selection for the life of the well", SPE 56536

3. Parcevaux, P.A. and Sault, P.H.: Cement shrinkage and elasticity: a new approach for a good zonal isolation”, SPE 13176
4. Moran, L.K., Murray, T.R. and Moyer, W.R.: “Cement expansion: A laboratory investigation”, SPE 21685
5. Baumgarte, C. Thiercelin, M and Klaus, D.: “ Case studies of expanding cement to prevent microannular formation”, SPE 56535
6. Boškovi , Z.: Model preseca cementacije zaštitnih cevi u gasnim bušotinama sa ekstremnim termobarskim uslovima, magistarski rad, Beograd 2000
7. Boškovi , Z.: Optimizacija procesa cementacije eksploatacionih kolona zaštitnih cevi dubokih bušotina u jugoisto nom delu panonskog basena, doktorska teza, Beograd 2006
8. Goodwin, K.J. and Crook, R.J.: Cement sheath stress failure SPEDE, Dec. 1992, 291-296.

**UDK:622.272:550.813(0.45)=861**

## **DEFORMACIJE I PROPUSNOST CEMENTNOG KAMENA RAZLIČITOG SASTAVA U MEKIM DO SREDNJE TVRDIM FORMACIJAMA**

Zvonimir Boškovi<sup>1</sup>, Vladimir Čebašek<sup>2</sup>, Sanel Nuhanović<sup>3</sup>, Jovana Crnogorac<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Rudarski fakultet Prijedor

<sup>2</sup> Rudarsko-geološki fakultet Beograd

<sup>3</sup> Rudarsko-geološko-građevinski fakultet Tuzla

### ***Abstract***

Hemijsko skupljanje cementa ili hemijska kontrakcija cementa je osnovni mehanizam tokom hidratacije portland cementa. Zapremina hidrirajućih komponenti kao što su voda i estice cementa je veća od zapremine proizvoda hidratacije. Ova kontrakcija zapremine se odnosi na unutrašnje ili hemijsko skupljanje cementa. Ukupno hemijsko skupljanje može biti mereno stavljanjem cementnog rastvora u rezervoar potopljen u vodu. Količina absorbovane vode tokom hidratacije cementa odgovara ukupnom hemijskom skupljanju. Ovakvi eksperimenti esto vode ka pogrešnoj proceni ukupnog hemijskog skupljanja zbog stalnog smanjenja propusnosti cementnog kamena tokom hidratacije, koja sprečava potpuni prolaz vode stvaranjem mreže hidrata. Ukupno hemijsko skupljanje se procenjuje na približno 6.25 ml/100 g cementa pretpostavljaju i 100% hidrataciju. Dodatkom aditiva za sirenje u cementnu mesavinu propusnost cementnog kamena je smanjena.

### **UVOD**

Cementni kamen nastao od bušotinskih cementa mora biti otporan na agresivne fluide i mora biti otporan na naprezanja tokom proizvodnje ili operacija u bušotini, tj. ispitivanje nepropustljivosti zaštitnih cevi, operacije stimulacije, temperaturne promene tokom proizvodnih ciklusa u itavom veku bušotine. Neophodno je analiziranje mehani kog ponašanja cementnog kamena razli itih tipova cementnih mešavina pod bušotinskim uslovima da bi se došlo do optimalnog sastava cementne mešavine. Razli iti tipovi aditiva za širenje postoje ve nekoliko godina. Neki aditivi su na bazi kalcijumsulfata, kalcijumsulfata poluhidrata ili natrijumsulfata za stvaranje etringita. Ovi ekspandiraju i cementi pokazuju više od deset puta ve e širenje nego što ih imaju portland cementne kaše sa dodatkom soli. Poznati su i ekspandiraju i cementi koji sadrže kalcijum ili magnezijumoksid. Širenje cemenata je u vezi sa hemijskim i mineraloškim promenama, koje proizilaze iz hidratacije i kristalizacije inilaca. Veli ina širenja zavisi od koncentracije aditiva za širenje, estica cementa, dizajna cementnog rastvora i uslova ispitivanja (pritisak, temperatura). Linearno širenje cementnih rastvora mereno je kalupima za širenje. Dodavanje aditiva za širenje spre ava stvaranje unutrašnjih mikroanulusa. Širenje može kasniti nekoliko dana, ak nekoliko nedelja. Kvalitet veze izme u cementnog kamena - formacije i cementnog kamena - zaštitne cevi e, stoga, rasti sa vremenom.

## 1. PROPUSNOST CEMENTNOG KAMENA

Propusnost o vrslog cementnog kamena je merena vodom standardnom procedurom. Disk cementnog kamena je smešten u Hasslerov drža gde je stavljen pod pritisak. Voda je injektirana pumpom konstantnim kapacitetom. Kada je dostignuto konstantno stanje zabeležen je odgovaraju i diferencijalni pritisak. Izmerena propusnost je prikazana u tabeli 1.

Tabela 1. Propusnost cementnog kamena

<i>Cementna mešavina</i>	<i>Aditivi za širenje</i>	<i>Spec. gustina (kg/dm<sup>3</sup>)</i>	<i>Propusnost (mD)</i>
Class G	Ne	1.89	0.0271
X2	Da	1.89	0.001

## 2. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Veliki broj laboratorijskih ispitivanja cementnog kamena je izveden za razli ite bušotinske uslove sa ciljem istraživanja ponašanja odre enog cementnog kamena pod simuliranim naprezanjima u bušotinskim uslovima. Modeli ošte enja cementnog kamena su odre eni u funkciji mehani kih svojstava cementnog kamena, parametara optere enja i uslova na dodirnim površinama. Gubitak izolacije sloja može biti uzrokovan bilo mehani kim ošte enjem cementnog kamena bilo stvaranjem mikroanulusa na dodirnim površinama zaštitne cevi - cementni kamen i cementni kamen - formacija. Svakako, ponašanje cementnog kamena zavisi od specifi nih uslova na dodirnim površinama.

Da obezbedi dug vek eksploatacije bušotine cementni kamen mora biti mehani ki i hemijski otporan. Cementni kamen nastao od API bušotinskog cementa je otporan na agresivne bušotinske fluide i mora biti otporan na naprezanja tokom proizvodnje ili operacija u bušotini, tj. ispitivanje nepropustljivosti zaštitnih cevi, operacije stimulacije, temperaturne promene tokom proizvodnih ciklusa u itavom veku bušotine. Neophodno je analiziranje mehani kog ponašanja cementnog kamena razli itih tipova cementnih mešavina pod bušotinskim uslovima da bi se došlo do optimalnog sastava cementne mešavine. Provera stabilnosti cementnog kamena u uslovima anularne geometrije je izvršena laboratorijskim ispitivanjima. Izmene u bušotinskim uslovima rezultira e bilo u skupljanju, bilo u širenju zaštitnih cevi i mogu biti simulirane. Takva ispitivanja daju procenu mehani kih svojstava cementnog kamena u uslovima koji vladaju u bušotini. Priroda naprezanja koja se stvara u me uprostoru (istezanje ili pritisak) je sli na onima koje cementni kamen mora izdržati u realnoj bušotini. Mehani ka svojstva (modul elasti nosti i vrsto a na pritisak) odre ena su na cilindri nim probnim telima cementnog kamena (pre nika 25,4mm i visine 50,8mm). Rastvori su pripremani, o vrš avani i ispitivani u sobnim uslovima. Cementni rastvor je nasut u anularni prostor izme u simulirane zaštitne cevi i formacije. Formaciju simulira metalni prsten. Nakon o vrš avanja cementnog kamena, postavljen je sistem sa gumenom komorom za potrebe izvo enja merenja propusnosti. To uklju uje metalni prsten smešten na vrh cementnog

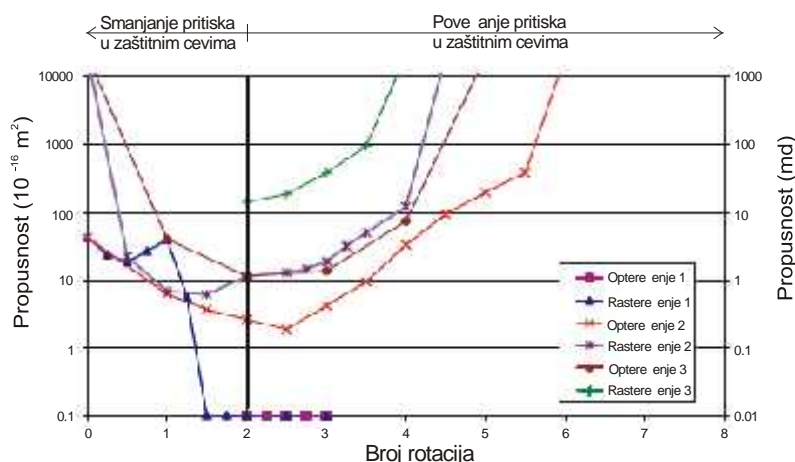
kamena i gumenu komoru postavljenu oko zaštitne cevi. Propusnost na vazduh merena je pri diferencijalnom pritisku od jednog bara i definisana je kao provodljivost celog sistema. Stoga, to uključuje relativnu propusnost na vazduh cementnog kamena, propusnost fraktura i protok vazduha u mikroanulusu. Propusnost cementnog kamena za ispitivane sisteme je mala i u toku ispitivanja najmanja izmerena propusnost iznosila je 0.01 mD.

### 3. OPTERE ENJA CEMENTNIH MEŠAVINA U MEKIM DO SREDNJE TVRDIM FORMACIJAMA

Debljina metalnog prstena od 2 mm (meka formacija) simulira Young-ov modul elastičnosti formacije od 2500 MPa. Takva vrednost može biti izmerena na nekonsolidovanim pešarima.

#### Optere enja cementne mešavine Class G

Deformacija jezgra (u praksi to predstavlja ostvarenje pritiska u zaštitnim cevima npr. kod ispitivanja hermetičnosti na unutrašnji pritisak zaštitnih cevi) izvršena je sa okretanjem osovine. Koeficijent propusnosti zadržao se stalnim i manjim od 0.01 mD.



Slika 1. Propusnost (vazduh) cementnog kamena bez aditiva cementne mešavine tip X1 merena u toku optere enja u mekim do srednje tvrdim formacijama

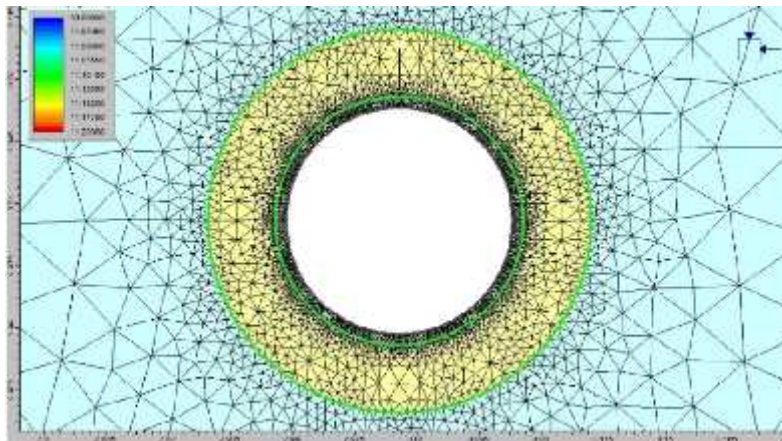
Pri rastere enju jezgra (u praksi je to rastere enje pritiska u zaštitnim cevima) stvoreni su unutrašnji mikroanulusi. Propusnost je po elada raste znajno što je posledica po etnog gubitka veze (debondiranja) između u cementnog kamena i centralnog jezgra (zaštitnih cevi). To je ueno tako što je na površini jezgra zaostalo nešto cementnog kamena. U drugom optere enju, propusnost je smanjena i predstavlja posledicu procesa zatvaranja mikroanulusa. Širenjem centralnog jezgra (zaštitnih cevi) došlo je do deformisanja cementnog kamena. Ovo je prouzrokovalo po etak stvaranja radijalnih pukotina onog trenutka kada su sile istezanja prevazišle vrsto u na istezanje cementnog kamena.

#### Model kona nih elemenata

Naprezanja u cementnom kamenu su analizirana preko modela konašnih elemenata pretpostavljaju i da su elik, cementni kamen i stene elasti ni materijali. Tako e, pretpostavljeno je da je veza cementni kamen - zaštitne cevi i cementni kamen - formacija ili dobra ili nije ostvorena Modelom su odre ena naprezanja u bušotini slede e geometrije:

- **Pre nik bušenja:** 215.9 mm
- **Ugra ene eksploatacione zaštitne cevi:**  
Grad: K- 55 (20.83 kg/m) do 1100 m
- **Unutrašnji pre nik cevi** 127.3 (mm)
- **Spoljašnji pre nik cevi** 139.7 (mm)
- **Kolektor stene:** meke i srednje tvrde





zaštitne cevi     
  cementni kamen     
  formacija

Slika 2. Izgled modela kona nih elemenata bušotine sa zaštitnim cevima 139.7 mm K-55 (20.83 kg/m<sup>3</sup>) ugra enim do 1100 m (meka do srednje tvrda formacija – cementni kamen Class G)

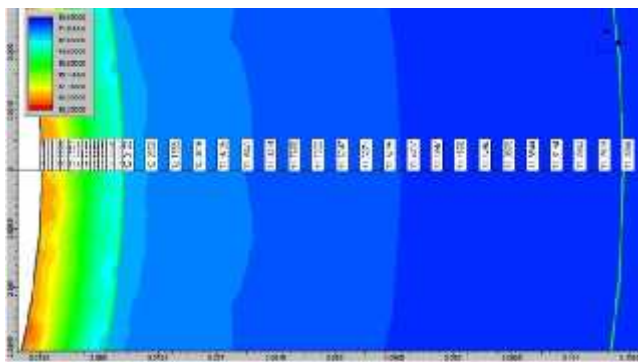
### Geometrija modela

Bušotina: pre nik **215,90 mm**      Cementni kamen: **Class G**  
                   dubina **1100,00 m**  
 Zaštitne cevi: K – 55 (20,83 kg/m<sup>3</sup>)      Formacija: **meka do srednje tvrda**  
                   spoljašnji pre nik **139,70 mm**  
                   unutrašnji pre nik **127,30 mm**

Tabela 2. Fizi ko-mehani ka svojstva materijala za Mohr-Coulomb-ov kriterijum loma

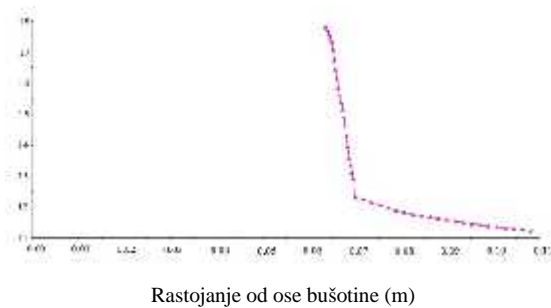
Materijal	Young-ov modul elasti nosti $E_e$ (MPa)	Poisson-ov koeficijent $\nu$	vrsto a na istezanje $\sigma_t$ (MPa)	Ugao unutrašnjeg trenja $\phi$ (°)	Kohezija $c$ (MPa)
elik	200000	0,27	760,00	53,50	138,77
Cementni kamen Class G	9200	0,20	2,07	42,95	6,05
Formacija meka do srednje tvrda	2500	0,13	3,00	30,00	10,50



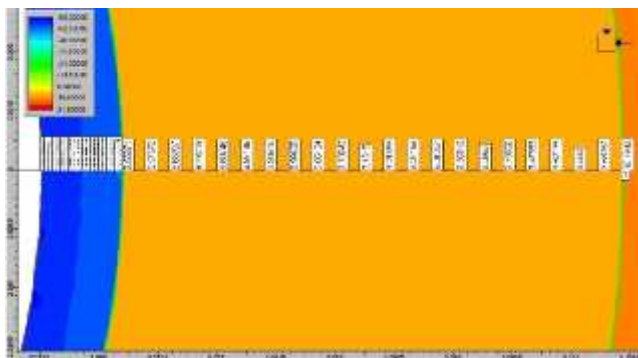


Slika 3. Raspodela tangencijalnog napona  $\tau_{,1}$  u cementnom kamenu

T  
a  
n  
g  
e  
n  
c  
i  
j  
a  
l  
n  
i  
n  
a  
p  
o  
n  
σ  
e  
  
(  
M  
P  
a  
)

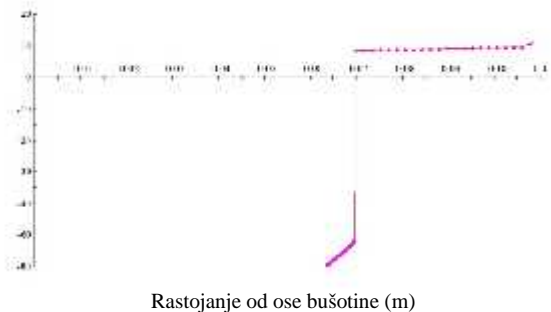


Slika 4. Dijagram raspodele tangencijalnog napona  $\tau_{,1}$  u cementnom kamenu

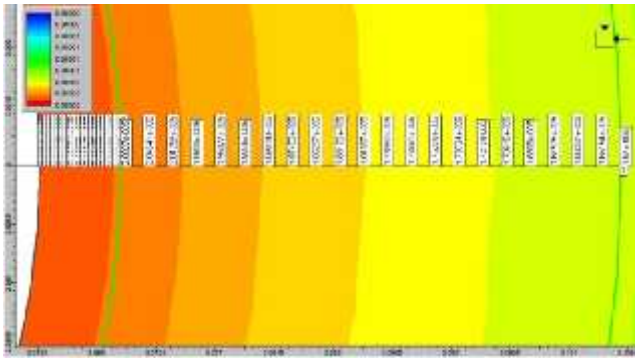


Slika 5. Raspodela radijalnog napona  $\tau_r$  u cementnom kamenu

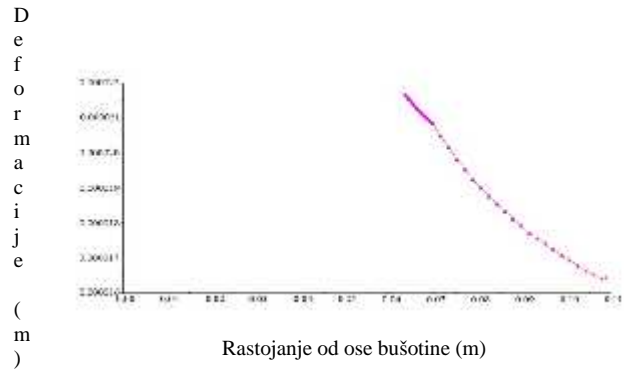
R  
a  
d  
i  
j  
a  
l  
n  
i  
n  
a  
p  
o  
n  
σ  
r  
  
(  
M  
P  
a  
)



Slika 6. Dijagram raspodele radijalnog napona  $\tau_r$  u cementnom kamenu



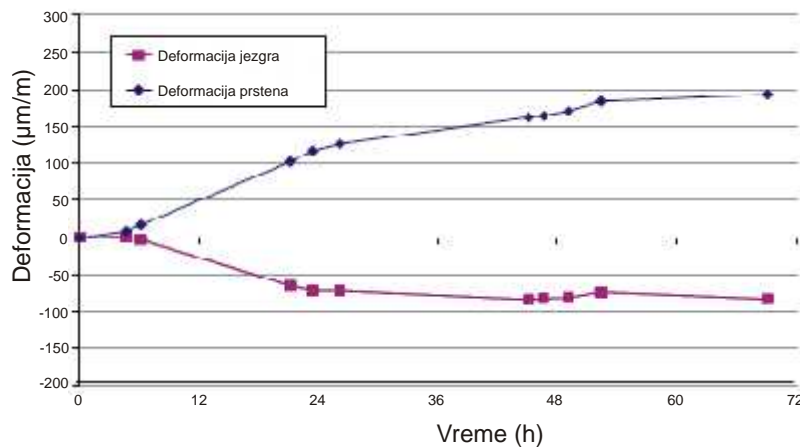
Slika 7. Raspodela deformacije u cementnom kamenu



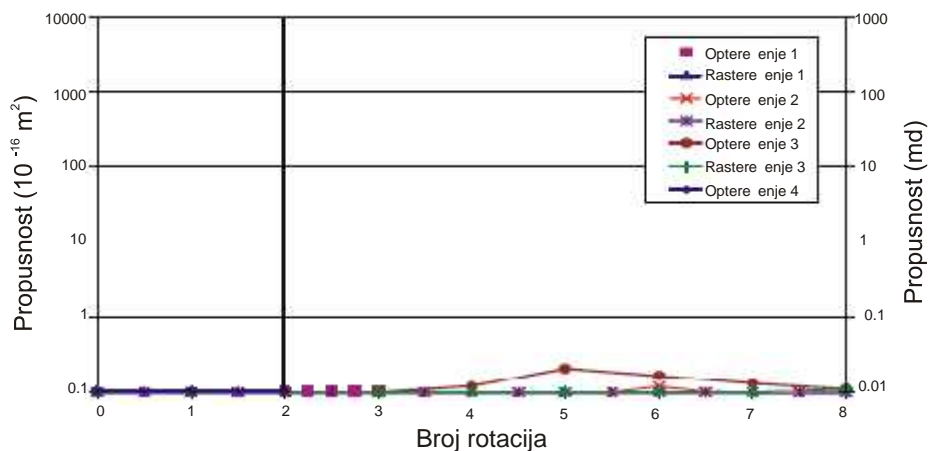
Slika 8. Dijagram raspodele deformacija u cementnom kamenu

## Optere enja cementne mešavine tip X2

Na slici 9 su prikazane deformacije centralnog jezgra i spoljnog prstena tokom trodnevnog perioda o vrš avanja cementnog kamena. U situaciji bez ograni enja (u ambijentu bušotine) širenje e biti usmereno ka spoljašnosti (ka formaciji). U slu aju ograni enog me uprostora širenje se kre e i ka spoljašnjosti i ka unutrašnjosti. Zbog širenja o vrsli cementni kamen je podvrgnut sabijanju tokom perioda o vrš avanja.



Slika 9. Deformacije zaštine cevi i prstena tokom vremena o vrš avanja cementnog kamena mešavine tip X2 u mekim do srednje tvrdim formacijama



Slika 10. Promena koeficijenta propusnosti u cementnom kamenu mešavine tip X2 tokom ciklusa optere enja

Na slici 10 pokazana je promena koeficijenta propusnosti u cementnom kamenu mešavine tip X2 tokom ciklusa optere enja. Propusnost se nije menjala tokom mehani kog ispitivanja. Cementna mešavina tip X2 je imala ista

mehani ka svojstva kao i Class G. Po etno sabijeno stanje omogu ava sistemu X2 ve u otpornost na deformacije nego sistem Class G i time ve a naprezanja na istezanje koja dovode do formiranja radijalnih pukotina. Tokom ispitivanja na površini cementa nisu uo ene nikakve pukotine.

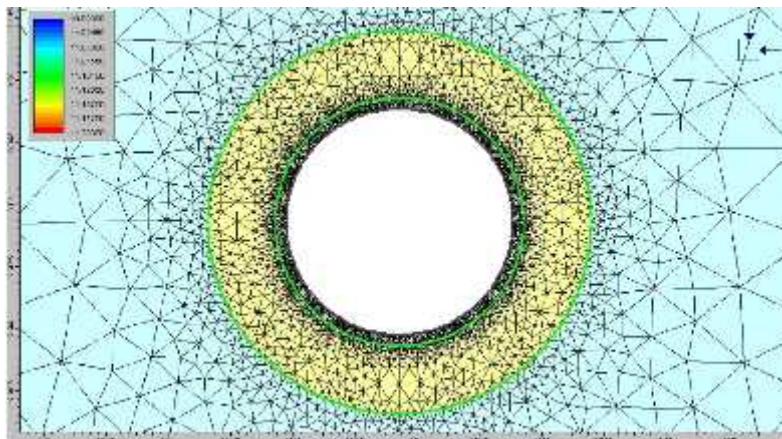
### Model kona nih elemenata

#### Geometrija modela

Bušotina: pre nik **215,90 mm** Cementni kamen: **X2**  
 dubina **1100,00 m**  
 Zaštitne cevi: K – 55 (20,83 kg/m') Formacija: **meka do srednje tvrda**  
 spoljašnji pre nik **139,70 mm**  
 unutrašnji pre nik **127,30 mm**

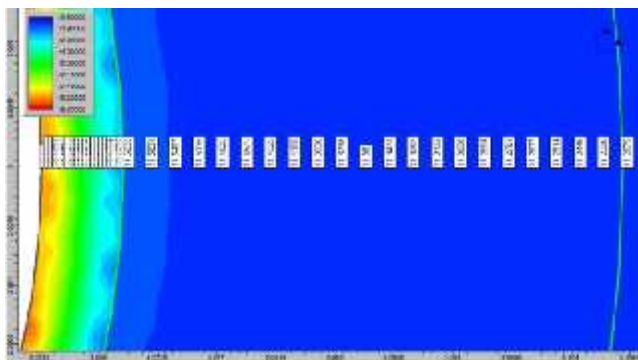
Tabela 3. Fizi ko-mehani ka svojstva materijala za Mohr-Coulomb-ov kriterijum loma

Materijal	Young-ov modul elasti nosti $E_e$ (MPa)	Poisson-ov koeficijent $\nu$	vrsto a na istezanje $\tau_t$ (MPa)	Ugao unutrašnjeg trenja $\phi$ (°)	Kohezija $c$ (MPa)
elik	200000	0,27	760,00	53,50	138,77
Cementni kamen <b>X2</b>	2600	0,20	2,07	42,95	6,05
Formacija <b>meka do srednje tvrda</b>	1580	0,13	3,00	30,00	10,50



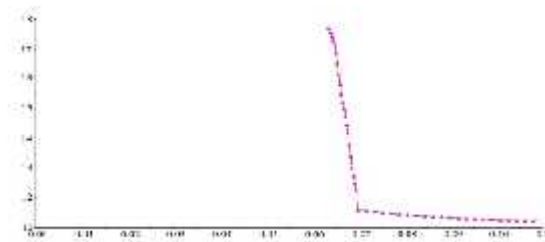
□ zaštitne cevi      □ cementni kamen      □ formacija

Slika 11. Izgled modela kona nih elemenata bušotine sa zaštitnim cevima 139.7 mm K-55 (20.83 kg/m<sup>3</sup>) ugra enim do 1100 m (meka do srednje tvrda formacija – cementni kamen X2)



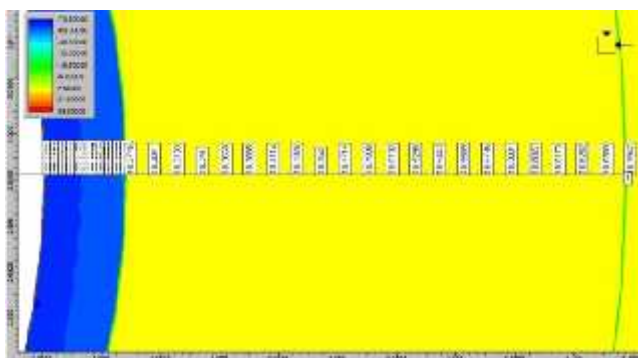
Slika 12. Raspedela tangencijalnog napona  $\tau_{t1}$  u cementnom kamenu

T  
a  
n  
g  
e  
n  
c  
i  
j  
a  
l  
n  
i  
  
n  
a  
p  
o  
n  
σ  
e  
  
(  
M  
P  
a  
)



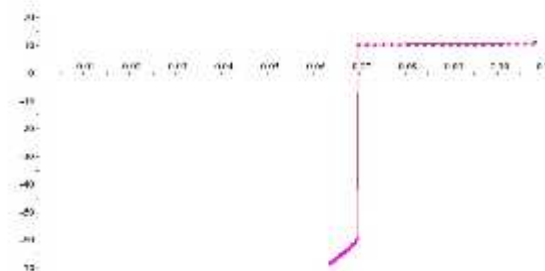
Rastojanje od ose bušotine (m)

Slika 13. Dijagram raspodele tangencijalnog napona  $\tau_{t1}$  u cementnom kamenu



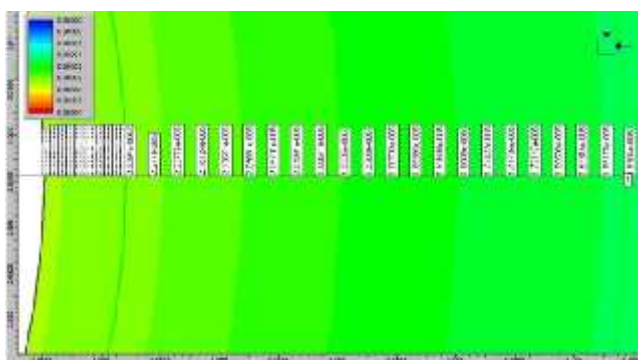
Slika 14. Raspedela radijalnog napona  $\tau_r$  u cementnom kamenu

R  
a  
d  
i  
j  
a  
l  
n  
i  
  
n  
a  
p  
o  
n  
σ  
r  
  
(  
M  
P  
a  
)



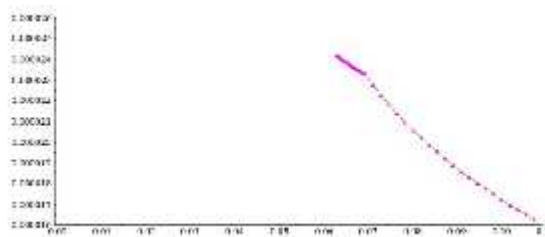
Rastojanje od ose bušotine (m)

Slika 15. Dijagram raspodele radijalnog napona  $\tau_r$  u cementnom kamenu



Slika 16. Raspedela deformacije u cementnom kamenu

D  
e  
f  
o  
r  
m  
a  
c  
i  
j  
e  
  
(  
m  
)



Rastojanje od ose bušotine (m)

Slika 17. Dijagram raspodele deformacija u cementnom kamenu

#### 4. ZAKLJUČAK

Veličine naprezanja su u linearnoj zavisnosti od bušotinskog pritiska, što znači, udvostručeno povećanje pritiska rezultuje dvostrukim povećanjem naprezanja u cementnom kamenu. Slike takođe prikazuju da je radijalno naprezanje na pritisak a tangencijalno je naprezanje na istežanje.

Najveća vrednost tangencijalnog naprezanja cementnog kamena je na kontaktu elik – cementni kamen gde obično dolazi do narušavanja ostvarene veze. Vrednost tangencijalnog naprezanja na kontaktu elik – cementni kamen predstavlja vrstu u na istežanje koju cementni kamen mora da poseduje da bi sprečio prekid veze pri povećanju pritiska u bušotini. Ova naprezanja rastu sa povećanjem pritiska u bušotini.

Radijalna naprezanja u cementnom kamenu povećavaju se od kontakta elik - cementni kamen do kontakte cementni kamen - formacija. Ova naprezanja sa promenom pritiska u bušotini se linearno smanjuju.

Cementne mešavine sa aditivima za širenje ostvaruju nepropusnost cementiranog međuprostora i u uslovima cikličnog naprezanja bušotine (povećanje i smanjenje pritiska u zaštitnim cevima).

#### LITERATURA

- Thiercelin, M.J., Dargaud, B, Baret, J.F. and Rodriguez, W.J.: “Cement design based on cement mechanical response SPE 52890
- Bosma, M., Ravi, K. Van Driel W. and Schreppers G.J.: “ Design approach to sealant selection for the life of the well” SPE 56536
- Parcevaux, P.A. and Sault, P.H.: : Cement shrinkage and elasticity: a new approach for a good zonal isolation” SPE 13176
- Moran, L.K., Murray, T.R. and Moyer, W.R.: “ Cement expansion: A laboratory investigation”. SPE 21685
- Baumgarte, C. Thiercelin, M and Klaus, D.: “ Case studies of expanding cement to prevent microannular formation”, SPE 56535
- Bošković, Z. : Model procesa cementacije zaštitnih cevi u gasnim bušotinama sa ekstremnim termobarskim uslovima, magistarski rad, Beograd 2000
- Bošković, Z.: Optimizacija procesa cementacije eksploatacionih kolona zaštitnih cevi dubokih bušotina u jugoistočnom delu panonskog basena, doktorska teza, Beograd 2006
- Goodwin, K.J. and Crook, R.J.: Cement sheath stress failure SPEDE, Dec. 1992, 291-296.