

*Originalan naučni rad
Original scientific paper
UDC: 627.747:626*

ANALIZA UTJECAJA PRIMARNIH NAPREZANJA NA RJEŠENJE INŽENJERSKE ZADAĆE U STIJENSKOJ MASI

Zlatan Talić¹, Predrag Mišević²

¹ Divel d.o.o. Sarajevo, E-mail. zlatan.talic@divel.ba

² Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu

REZIME

Dok je kod ostalih građevinskih objekata opterećenje poznato, kod objekata izgrađenih na ili u stijenskoj masi, u većini slučajeva, opterećenje nije poznato jer ono ovisi o nizu čimbenika koji potječu od ponašanja sredine u kojoj se nalazi objekt, zatim o međusobnom međudjelovanju te sredine i obloge, kao i o tehnologiji izvođenja radova.

Poznavanje „in situ“ naprezanja nužno je za projektiranje i izradu podzemnih objekata, posebno kod odabira pogodnih lokacija i orijentacije tunela i drugih podzemnih otvora, optimalnih oblika i veličina podzemnih otvora i odabira pogodnog sustava podgrade, učinkovitih i sigurnih izrada kampada kod zasjeka i prirodnih kosina, kao i temeljenja građevinskih objekata.

Problematika primarnih naprezanja naročito je složena ako su u pitanju anizotropne, heterogene i diskontinuirane sredine, te u tim slučajevima ove probleme možemo rješavati putem eksperimentalnih ispitivanja i istraživanja «in situ», ili analizom na numeričkim modelima. Postojanje pukotinskih sustava, te njihova orijentacija, znatno utječu na raspodjelu i intenzitet naprezanja.

Ključne riječi: *objekti, primarna naprezanja, stijenska masa, modeliranje*

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PRIMARY STRESS ON THE SOLUTION OF THE ENGINEERING TASK REGARDING ROCK MASS

ABSTRACT

While the load of other civil structures is known, the load of structures built on or in the rock mass is in most cases unknown, because it depends on a variety of factors that arise from the environment in which the structure is located, as well as, on mutual interaction of that environment and the lining and on the construction technology.

When designing and constructing underground structures it is necessary to be familiar with “in situ” stress, especially when choosing suitable locations, tunnel orientation, and other underground openings, also optimal shapes and sizes of underground openings and when choosing a suitable support system, efficient and safe construction of concrete lifts in terms of side cuts and natural slopes, as well as when laying the basis of civil structures.

The problematic of primary stress is especially complex when it comes to anisotropic, heterogeneous and discontinuous environments, and in such cases we can solve these problems through experimental testing and “in situ” research, or through a numeric model analysis. The presence of a fissure system and its orientation has a significant affect on stress distribution and intensity.

Key words: *facilities, the primary stresses, rock mass, modeling*

UVOD

Objekti izgrađeni na ili u stijenskoj masi, nesumnjivo, spadaju u red najsloženijih građevinskih objekata, kako u pogledu istraživanja i projektiranja, tako i u pogledu izvođenja.

Dok je kod ostalih građevinskih objekata opterećenje poznato, kod objekata izgrađenih na ili u stijenskoj masi, u većini slučajeva, opterećenje nije poznato jer ono ovisi o nizu čimbenika koji potječu od ponašanja sredine u kojoj se nalazi objekt, zatim o međusobnom međudjelovanju te sredine i obloge, kao i o tehnologiji izvođenja radova.

Poznavanje „in situ“ naprezanja nužno je za projektiranje i izradu podzemnih objekata, posebno kod odabira pogodnih lokacija i orijentacije tunela i drugih podzemnih otvora, optimalnih oblika i veličina podzemnih otvora i odabira pogodnog sustava podgrade, učinkovitih i sigurnih izrada kampada kod zasjeka i prirodnih kosina, kao i temeljenja građevinskih objekata.

Kod projektiranja iskopa za podzemne objekte, inženjer treba razumjeti utjecaj naprezanja na projektirane objekte, kao i veličinu i smjer naprezanja, odnosno orijentaciju naprezanja, te izabrati najpogodniju metodu istraživanja koja će dati najpotpunije podatke za projektiranje.

Ovdje treba razlikovati riječi “određivanje” i „procjena“. Riječ *određivanje* veže se na “točan iznos“, dok riječ *procjena* uključuje komponentu „prosudbe ili mišljenje“. U skladu s tim značenjem, prikladniji je izraz „procjena naprezanja u stijeni“, nego „određivanje naprezanja u stijeni“ ili „mjerenje naprezanja u stijeni“ i odražavaju činjenicu da nije uvijek lako utvrditi precizne veličine „in situ“ stanja naprezanja u stijeni [5].

Preporučuje se pažljiv pristup odabiru parametara koji će se mjeriti, odnosno promatrati, kako bi se postigao što bolji rezultat mjerenja [1].

Problematika primarnih naprezanja naročito je složena ako su u pitanju anizotropne, heterogene i diskontinuirane sredine, te u tim slučajevima ove probleme možemo rješavati putem eksperimentalnih ispitivanja i istraživanja «in situ», ili analizom na numeričkim modelima. Postojanje pukotinskih sustava, te njihova orijentacija, znatno utječu na raspodjelu i intenzitet naprezanja. Kao potvrda ove konstatacije mogu poslužiti ispitivanja na modelima [8].

Usporedno s općim napretkom inženjerstva u stijenskoj masi, došlo je i do bitnih izmjena u poimanju pojave i prirode primarnih naprezanja. U vrijeme korištenja klasičnih metoda iskopa u stijenskoj masi razmatrala su se samo primarna naprezanja koja se javljaju uslijed rastresanja stijenske mase. Tada još nisu bili dovoljno poznati i jasno uočeni utjecaji primarnih naprezanja koja potječu kao posljedica preraspodjele stanja naprezanja na površini iskopa, odnosno sekundarna naprezanja, a koja često imaju znatno veći učinak nego pojava rastresanja [9].

Treba istaknuti da se pojavila tendencija uvođenja numeričkih metoda i kod rješavanja inženjerske zadaće u stijenskoj masi. Veoma je bitno da se pored laboratorijskih ispitivanja obave i terenska ispitivanja „in situ“, jer se samo na taj način mogu realno pretpostaviti karakteristike stijenske mase.

I pored svih teškoća, ostaje izvan sumnje da će ove metode, koje su u stalnome razvoju, omogućiti preciznije analize stanja naprezanja i deformacija stijenske mase i naprezanja na površini iskopa, ali

ipak one same, bez eksperimentalne potvrde, ne mogu se sa sigurnošću prihvatiti kod razmatranja ove problematike.

Ovdje treba napomenuti da je u ovom radu razmatrana problematika homogene stijenske mase. Svrha obrade je dobivanje slike sekundarnoga stanja naprezanja i deformacija u ovisnosti od primarnih naprezanja, kao i obliku podzemnoga otvora. Osim toga, razmarala se i slika sekundarnih naprezanja za mjerna mjesta na tunelima malih dimenzija (promjera 2,0 m) u kojima se i najčešće vrše „in situ“ mjerenja, a u ovisnosti od odnosa horizontalnoga i vertikalnoga primarnog naprezanja. Izvršena je usporedba rezultata numeričkih ispitivanja s rezultatima terenskih mjerenja podzemnih naprezanja.

TEORIJSKE POSTAVKE

S gledišta nastajanja, stanja naprezanja u stijenskim masivima mogu se podijeliti na: primarna, sekundarna, tercijarna i kvartarna stanja naprezanja [6].

Stijenska masa, nedirnuta od strane čovjeka, onakva kakva je u prirodi nalazi se u primarnom stanju naprezanja. Ova naprezanja, koja postoje u djevičanskoj stijenskoj masi, prije djelovanja čovjeka, odnosno prije iskopa, nazivaju se primarna naprezanja. Prema tome, stijenska masa mora se promatrati kao prethodno napregnuta, odnosno prednapregnuta sredina [7].

Primarna naprezanja u stijenskim masama u nekim slučajevima relativno su velika i daleko su od toga da budu zanemarljiva. Ona bitno utječu na mehanička svojstva, karakteristike i ponašanje stijenskih masa.

Sekundarno stanje naprezanja nastaje u stijenskim masivima nakon poremećaja prirodnoga stanja izradom manjih ili većih šupljih prostora u podzemlju ili usjeka u stijeni, što dovodi do preraspodjele naprezanja u zoni oko umjetno stvorenog prostora. Ovakva naprezanja uglavnom su lokalnoga karaktera i javljaju se u blizini samoga podzemnog iskopa ili radova na površini terena [11].

Kada sekundarna naprezanja prekorače čvrstoće stijenske mase, tada dolazi do sloma. Uslijed ovoga dolazi, u ovome području, do formiranja zone oslobođenih naprezanja, a dublje od nje stvara se zona nosivog prstena, koji prima povećana sekundarna naprezanja. Dalje u dubinu stijenskoga masiva ostaje intaktno područje [11].

UTJECAJ PRIMARNOG NAPREZANJA U ANALIZI PODZEMNOGA OTVORA

Najveći doprinos u istraživanju primarnih naprezanja dali su Hoel i Brown, prikupljajući mjerenja sa brojnih lokaliteta širom svijeta [4]. Uspoređivanjem većeg broja podataka s mjerenja primarnih naprezanja uočili su određene zakonitosti promjene vertikalne komponente naprezanja u funkciji dubine koja je opisana jednadžbom:

$$\sigma_v = 0,027 \cdot H \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Mjerenja naprezanja u Kanadi [9] pokazuju, općenito, da je vertikalna komponenta glavnoga naprezanja približno jednaka računskoj težini prosječnoga nadsloja stijene, i da su horizontalna glavna naprezanja veća od vertikalnih. Herget (1973) i Herget i ostali (1975) predlažu empirijsku jednadžbu koja dovodi u svezu prosječno horizontalno naprezanje i debljinu nadsloja stijene:

$$\sigma_h = 8,16 + 0,04 \cdot H \text{ (MPa)} \quad (2)$$

gdje je:

H dubina u metrima.

Općenito, nađene su samo male razlike u veličinama između dviju komponenata glavnih horizontalnih naprezanja. U području u kojemu su izvršena mjerenja, pravci većih glavnih naprezanja su konstantni [2].

Kada su mjerenja izvršena u pojedinačnim bušotinama u stijenama različitoga tipa, veća horizontalna naprezanja izmjerena su u mekšim stijenama. Ovo može biti posljedica primijenjenoga načina mjerenja, posebice načina određivanja vrijednosti Youngovog modula za meke stijene kao što su škriljci i škriljasti krečnjaci. Općenito, može se zaključiti da se visoka horizontalna naprezanja, razmatrana gore, pronalaze u svim geološkim formacijama i u različitim vrstama stijena kao što su škriljci, kvarc i gabra [2].

Bilo je mnogo primjera građevinskih i rudarskih radova gdje su greške predviđenog postojanja velikih horizontalnih podzemnih naprezanja dovele do oštećenja objekata i skupih sanacijskih radova. Klasične metode projektiranja tunelske podgrade pretpostavljaju da je vertikalno opterećenje dio težine nadsloja, a da je horizontalno naprezanje na podgradu, općenito, manje od vertikalnog naprezanja. Slično, projektiranje podgrada rudnika je, tradicionalno, zasnovano na samom opterećenju nadsloja, zanemarujući moguće postojanje visokih horizontalnih naprezanja. Postojanje velikog horizontalnog naprezanja sada je općenito prihvaćeno, i građevinski i rudarski inženjeri su naučili da se prepoznavanjem njihova postojanja i preduzimanjem određenog broja jednostavnih koraka, kao mjera predostrožnosti, mnogi potencijalni problemi mogu izbjeći. Horizontalna naprezanja u nekim slučajevima mogu preći u prednost: ona mogu dozvoliti, na primjer, korištenje većih nepodgrađenih raspona pri podzemnim iskopima [2].

Mjerenja pomaka u dubini, koristeći magnetni ekstenzometar [2], pokazalo je da se pomaci stijene, iako malih vrijednosti, protežu do velikih dubina u stijenskoj masi i da se mogu predvidjeti korištenjem teorije elastičnosti.

Praktične implikacije ovih opažanja su ta da što postoje veća „normalna“ podzemna naprezanja, to su njihovi učinci na izgradnju podzemnih objekata obično manji [2]. Tendencija je da se raspucavanje i višak iskopa u kaloti uspješno kontrolira uobičajenom podgradom.

Dugo vremena su Hanafy i ostali [3] izučavali utjecaj visokih horizontalnih naprezanja na tunelsku oblogu. Kada se tunel nalazi u stijenama male čvrstoće, kao npr. u škriljcima, analize zasnovane na teoriji elastičnosti moraju biti pod znakom pitanja i potrebno je voditi računa o viskoznosti i čvrstoći stijene pri procesu puzanja i o samoj podgradbi. Uvrštavanjem parametara viskoziteta u analizu putem konačnih elemenata, moguće je ispitati naprezanje obloge u funkciji vremena i istražiti ponašanja konstrukcije kako bi se spriječila prevelika naprezanja.

Ove činjenice mogu se potvrditi i na konkretnim primjerima iz ovog rada. Na lokaciji hidrotehničkog tunela HE Bekhme određen je odnos horizontalnoga i vertikalnoga naprezanja koji iznosi 0,89. Na lokaciji hidrotehničkog tunela HE Fatnica određen je odnos horizontalnoga i vertikalnoga naprezanja koji iznosi 1,54. Nakon izgradnje tunela, vršenjem monitoringa više godina, nije ustanovljeno nikakvo oštećenje.

MODELIRANJE UTJECAJA NAPREZANJA NA PODZEMNE OBJEKTE

Izučavanje geomehničkih problema u mehanici stijena sve se više mijenja iz kvalitativnih analiza u kvantitativne proračune i predviđanja, s razvojem numerike u inženjerskoj geologiji i mehanici stijene. Usprkos ovomu, može doći do nestabilnosti u stijenskoj masi, posebno na kosinama, tijekom izgradnje i s promjenom rubnih uvjeta, strukture i osobina stijenske mase, temperaturnoga polja i polja procjeđivanja, kao i još nekih čimbenika koji utječu na stabilnost. Za modeliranje svakoga od ovih procesa, koji su pod utjecajem velikoga broja čimbenika, posebno viskoelastično-plastičnih oštećenja i velikih deformacija, nisu postojali dostatno zadovoljavajući računalski programi koji se mogu koristiti za modeliranje geomehničkih složenih procesa. Kao što je poznato, numeričko modeliranje može uključivati veliki broj čimbenika i algoritama [12].

Numerički model treba ostvariti sljedeća tri cilja [10]:

1. povratnu analizu izmjerenih podataka radi određivanja ispravnih geotehničkih i neporemećenih stanja naprezanja u stijenskoj masi,
2. analizu pomaka koji se očekuju tijekom iskopavanja, kako bi se razumjelo zašto dolazi do njih,
3. prognozu ponašanja postojećih kaverni tijekom izvođenja budućih iskopavanja i način na koji će se vršiti iskopavanje.

Metoda proračuna korištena u numeričkom modelu u ovom radu je metoda konačnih elemenata (FEM – Finite Element Method). Za izradu numeričkog modela korišten je program EXAMINE 2D firme Rocscience Inc, Toronto, Kanada.

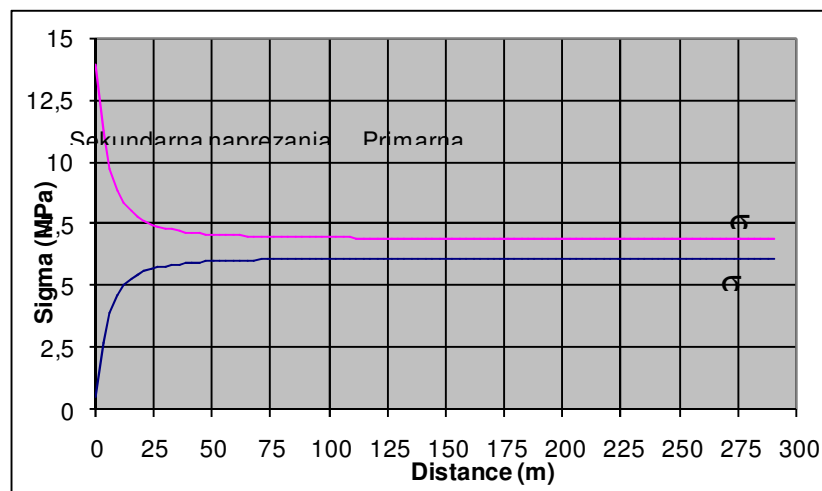
Analiza elastičnih graničnih elemenata korištena u Examine2D nalaže da se, za materijal koji se modelira, pretpostavi da je homogen, izotropan ili poprečno izotropan i linearno elastičan.

Poznato je, da većina stijenskih masa koje se modeliraju nema ove osobine. Ipak, naprezanja izračunata i prikazana programom Examine2D mogu poslužiti uspješno, na primjer, kod optimizacije geometrije iskopa.

Vrijednosti pomaka izračunatih programom Examine2D uključuju samo elastične pomake u toku iskopa. Razlike između realnih i proračunatih vrijednosti ovise prije svega od karakteristika stijenske mase. Ukoliko je stijenska masa boljih karakteristika i manje ispucala, može se reći da su razlike između realnih i proračunatih vrijednosti male, i obrnuto, ako je stijenska masa lošijih karakteristika i jako ispucala, tada su razlike između realnih i proračunatih vrijednosti velike. Uz to, proračun pomaka ovisi direktno od vrijednosti modula deformacija (Young-ovog modula) stijenske mase, vrijednosti koju je teško odrediti.

PRIMJER PRORAČUNA PRIMARNIH NAPREZANJA NA LOKACIJI BRANE „BEKHME“ POMOĆU NUMERIČKOGA MODELA

Stijenska masa modelirana je kao kontinuum koji se ponaša kao elastični medij. Za kriterij sloma usvojen je Hoek-Brownov kriterij. Proračunate deformacije i raspodjele naprezanja, okolo tunelskoga otvora, uspoređene su s „in situ“ mjerenjima, slika 1.



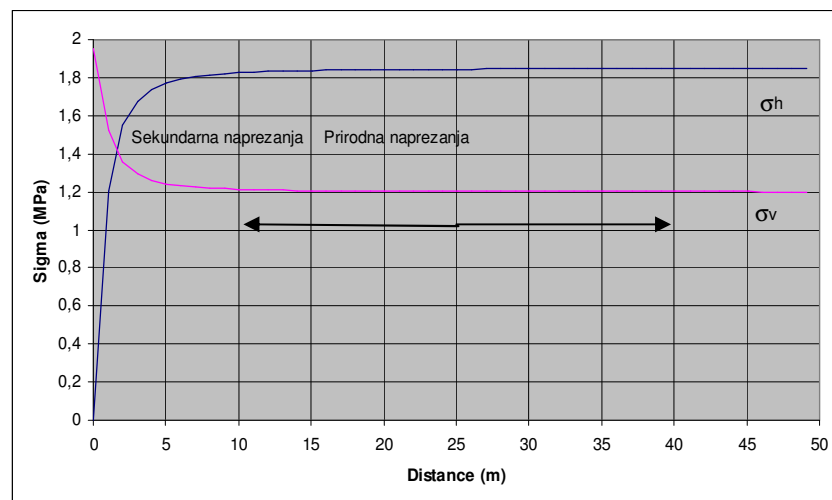
Slika 1. Rezultati numeričke analize stanja naprezanja – sumarni dijagram naprezanja u presjeku 1-1
Figure 1 Numerical stress analysis result – summary plot of stress in section 1-1

Mehaničke karakteristike stijenske mase su: nadsloj stijenske mase je 300 m; zapreminska težina stijenske mase je $0,023 \text{ MN/m}^3$; izmjereni odnos primarnih napreznja je 0,89; Youngov modul je 10000 MPa; jednoosna tlačna čvrstoća stijene je 75 MPa; GSI je 70; m_i je 9; koeficijent poremećaja $D=0$.

Veličina vertikalnoga primarnog napreznja jednaka je težini nadsloja stijenske mase i iznosi $6,90 \text{ MN/m}^2$. Odnos primarnih vertikalnih i horizontalnih napreznja (horizontalno/vertikalno) izmjeren kombiniranom metodom je 0,89.

PRIMJER PRORAČUNA PRIMARNIH NAPREZNJA NA LOKACIJI TUNELA „FATNICA“ POMOĆU NUMERIČKOGA MODELA

Stijenska masa modelirana je kao kontinuum koja se ponaša kao elastični medij. Za kriterij loma usvojen je Hoek-Brownov kriterij. Proračunate deformacije i raspodjele napreznja, oko tunelskoga otvora, uspoređuju se s „in situ“ mjerenjima, slika 2.



Slika 2. Rezultati numeričke analize stanja napreznja – sumarni dijagram napreznja u presjeku 1-1
Figure 2 Numerical stress analysis result – summary plot of stress in section 1-1

Mehaničke karakteristike stijenske mase su: nadsloj stijenske mase je 50 m; zapreminska težina stijenske mase je $0,024 \text{ MN/m}^3$; izmjereni odnos primarnih napreznja je 1,54; Youngov modul je 10000 MPa; jednoosna tlačna čvrstoća stijene je 75 MPa; GSI je 60; m_i je 9; koeficijent poremećaja $D=0$.

Veličina vertikalnoga primarnog napreznja jednaka je težini nadsloja stijenske mase i iznosi $1,20 \text{ MN/m}^2$. Odnos primarnih vertikalnih i horizontalnih napreznja (horizontalno/vertikalno) izmjeren kombiniranom metodom je 1,54.

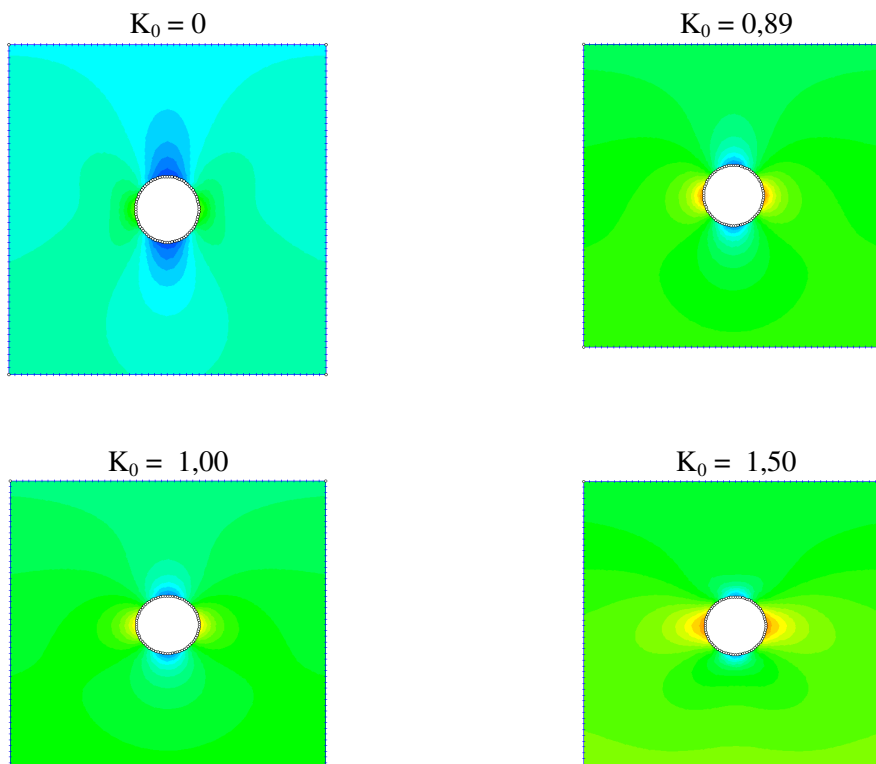
USPOREDBA MJERENIH VRIJEDNOSTI S VRIJEDNOSTIMA DOBIVENIM NUMERIČKIM PRORAČUNOM NA ELASTIČNOM MODELU

U ovome je poglavlju izvršena usporedba mjerenih vrijednosti napreznja u stijenskoj masi na lokacijama hidrotehničkog tunela brane „Bekhme“ u Iraku i hidrotehničkog Tunela «Fatnica» u BiH s vrijednostima dobivenim numeričkim proračunom na elastičnom modelu pomoću programa Examine 2D, tabela br. 1.

Tabela 1. Usporedba mjerenih vrijednosti s vrijednostima dobivenim numeričkim proračunom na elastičnom modelu
Table 1 Comparison measured values to numerical analysis values on elastic model

Lokacija	Hidrotehnički tunel brane „Bekhme“ u Iraku	Hidrotehnički Tunel „Fatnica“ u BiH
Visina nadsloja	300 m	50 m
Zapreminska težina stijenske mase	0,023 MN/m ³	0,024 MN/m ³
Težina nadsloja stijenske mase $\sigma_z = \gamma \cdot H$	6,90 MN/m ²	1,20 MN/m ²
Izmjerena vrijednost vertikalnog primarnog naprezanja kombiniranom statičko-geofizičkom metodom	6,67 MN/m ²	1,30 MN/m ²
Odnos primarnoga horizontalnog i vertikalnog naprezanja	0,89	1,54
Izmjerena vrijednost vertikalnoga sekundarnog naprezanja kombiniranom statičko-geofizičkom metodom	6,23 MN/m ²	1,14 MN/m ²
Veličina vertikalnoga sekundarnog naprezanja dobivena elastičnim modelom pomoću programa „Examine2D“ (na dubini 80 cm od ivice iskopa)	11,60 MN/m ²	1,80 MN/m ²

Također, izvršen je i kritički osvrt na to što bi značilo da se umjesto izmjenjenog odnosa primarnoga horizontalnog i vertikalnog naprezanja u proračun uvrsti pretpostavljeni odnos naprezanja. Pretpostavljeni odnosi primarnoga horizontalnog i vertikalnog naprezanja uvršteni u proračun su: 0; 1,00 i 1,50, slika 3, tabela br. 2.



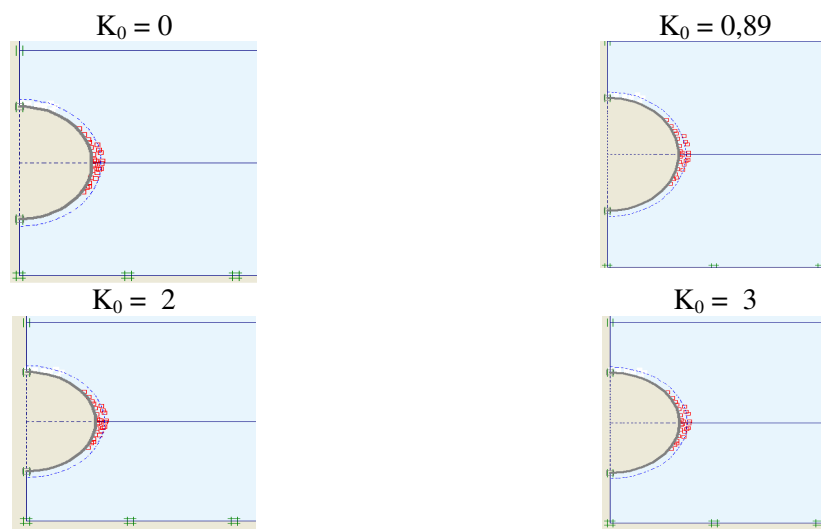
Slika 3. Usporedba proračunatoga primarnog vertikalnog naprezanja na konturi iskopa za različit pretpostavljeni odnos primarnoga horizontalnog i vertikalnog naprezanja K_0
Figure 3 Comparison calculated primary stress on contour of excavation for different assumed ratio primary horizontal and vertical stress K_0

Tabela 2. Utjecaj krive procjene pravca glavnog napreznja
Table 2 Influence wrong estimation main stress direction

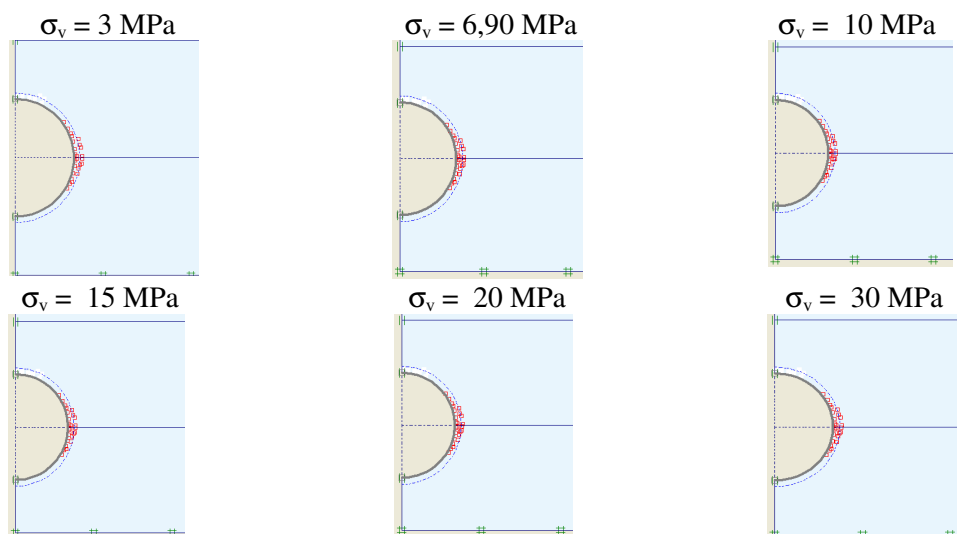
Pretpostavljeni odnos primarnoga horizontalnog i vertikalnog napreznja	0	0,89	1,00	1,50
Proračunato sekundarno vertikalno napreznje na konturi iskopa	17,70 MPa	13,95 MPa	13,49 MPa	11,39 MPa

MODELIRANJE UTJECAJA PRIMARNOGA NAPREZNJA NA TUNEL KRUŽNOGA OBLIKA

Pomoću programa Plaxis simuliran je problem iskopa tunela pretpostavljajući da je tunel iskopan metodom bušenja dugih bušotina i miniranjem. To se postiglo postiglo „odumiranjem“ elemenata koji na modelu predstavljaju tunelski otvor. Mehaničke karakteristike stijenske mase dane ranije u tekstu. Usvojeno je da se stijenska masa ponaša elastoplastično, slika 4 i slika 5.

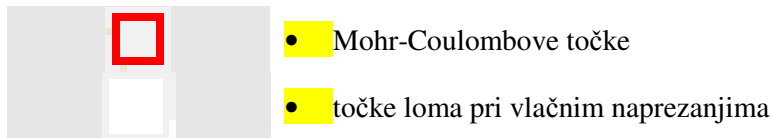


Slika 4. Usporedba plastične zone za različite vrijednosti koeficijenta K_0 ($\sigma_v = 6,90$ MPa)
Figure 4 Comparison plastic zone for different values of coefficient K_0 ($\sigma_v = 6,90$ MPa)



Slika 5. Usporedba plastične zone za različite vrijednosti napreznja σ_v ($K_0 = 0,89$ MPa)
Figure Comparison plastic zone for different values of stress σ_v ($K_0 = 0,89$ MPa)

gdje je:



Pomoću programa *Examine 2D* simuliran je problem iskopa tunela pretpostavljajući da je tunel iskopan metodom bušenja dugih bušotina i miniranjem. Mehaničke karakteristike stijenske mase dane ranije u tekstu. Usvojeno je da se stijenska masa ponaša elastično. Proračun je urađen za četiri različita pravca djelovanja primarnoga naprezanja i to za kutove od 0°, 15°, 30° i 45°, tabela br. 1.

Tabela 4 - Utjecaj krive procjene pravca glavnoga naprezanja

Table 4 - Influence wrong estimation main stress direction

Kut u odnosu na vertikalu	0°	15°	30°	45°
Proračunato sekundarno naprezanje	1,05 MPa	1,10 MPa	1,17 MPa	1,28 MPa

ZAKLJUČAK

Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće.

Da su izmjerene vrijednosti sekundarnih naprezanja u blizini konture podzemnoga otvora uvijek znatno manje od veličina sekundarnih naprezanja dobivenih numeričkim proračunom s elastičnim modelom.

Osnovni razlog ovome leži u činjenici da se stijenska masa degradira oko podzemnoga otvora uslijed iskopa i preraspodjele sekundarnih naprezanja.

Ako se usporede vrijednosti proračunatih primarnih vertikalnih naprezanja za pretpostavljene odnose primarnoga horizontalnog i vertikalnog naprezanja dane u tabeli 3, vidi se da se one razlikuju i preko 30%, iz čega se može zaključiti da je od velikog značaja točno odrediti vrijednosti primarnih naprezanja.

Spoznaja da, ako bi se inženjerski proračuni temeljili samo na veličini naprezanja dobivenih numeričkim elastičnim modelom, tada bi se redovito dobivale veće dimenzije obloge, odnosno dolazilo bi do neekonomičnosti rješenja.

Iz tabele 4 i može se zaključiti da točno određivanje pravaca glavnih naprezanja u odnosu na vertikalu dovodi do poboljšanja pri proračunima jer se dobivene vrijednosti primarnih naprezanja u proračunima razlikuju 5-15 %.

Za datu stijensku masu i stanje naprezanja „in situ“, iskop izaziva lom ili oštećenje stijenske mase u ovisnosti od traga naprezanja, koji zauzvrat ovisi od upotrebljenog načina iskopa. Suština ove ovisnosti je mehanički odgovor elastično-plastičnih materijala.

Budući da je vlačna čvrstoća stijene niska u odnosu na njezinu tlačnu čvrstoću, stijene se mogu slomiti lakše kod pojave vlaka nego kod tlaka. Ovaj fenomen loma izraženiji je u blizini konture tunela gdje je dinamičko rasterećenje izazvano vlačnim naprezanjem visoko.

Na temelju gore provedene analize može se zaključiti da točno određivanje parametara čvrstoće stijenske mase, veličine primarnih naprezanja, kao i odnosa ovih naprezanja i pravaca njihova djelovanja, dovodi do značajnog poboljšanja pri proračunima podzemnih objekata.

LITERATURA

1. Fairhurst C.: Stress estimation in rock; a brief history and review. Special Issue on Rock Stress Estimation. *Internacional Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003.
2. Franklin J. A. & Hungr O.: Rock stress in Canada – Their relevance to engineering project. *Rock Mechanics*, Suppl. 6, pp. 25-46, 1978.
3. Hanafy E. A., Emery J. J. & Franklin J. A.: Tunnel lining strategies. Proc. 3rd Symp. Eng. Applications of Solid Mechanics, Univ. Toronto, Canada, 1976.
4. Hoek E., & Brown E. T.: *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.
5. Hudson J. A. & Cornet F. H.: Special Issue on Rock Stress Estimation. *Internacional Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, pp. 955, 2003.
6. Kujundžić B.: Osnovi mehanike stena II. Građevinski kalendar, SGITJ, «Slobodan Jović», Beograd, 1979.
7. Kujundžić B.: Opšta fizičko-strukturna svojstva stenskih masa. *Mehanika stijena, temeljenje, podzemni radovi*. Društvo građevinskih inženjera i tehničara Zagreb. Društvo za mehaniku stijena i podzemne radove SR Hrvatske. Knjiga 1, str. 183-209. Zagreb, 1983.
8. Langof Z.: Određivanje prirodnih napona u nekim slučajevima degradiranih sedimentnih stijena. IV jugoslovenski simpozijum o mehanici stijena i podzemnim radovima, Kosovska Mitrovica, 1977.
9. Langof Z.: Naponi i deformacije brdske mase i pritisci na tunelske obloge za neke slučajeve diskontinuum. Univerzitet u Sarajevu, Građevinski fakultet, Sarajevo, 1980.
10. Pelizza S., Oreste P. P., Peila D. & Oggeri C.: Stability analysis of a large cavern in Italy for quarrying exploitation of a pink marble. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 15, pp. 421-435, 2000.
11. Selimović M.: *Mehanika stijena – Teoretske osnove*. Univerzitet «Džemal Bijedić» u Mostaru, Građevinski fakultet, Mostar, 2003.
12. Zhiyin W., Yunpeng L., Sijing W. & Zhifa Y. Numerical simulation of the geomechanical processes in rock engineering. *Internacional Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 37, pp. 499-507, 2000.