

# Mjerenje konvergencije i numeričko modeliranje stijenske mase

Marta Doležalova, Vlasta Zemanova, Jaroslav Danko, Laszlo Kovacs

## Ključne riječi

stijenska masa,  
terenska istraživanja,  
konvergencija,  
mjerenje,  
interpretacija rezultata,  
numeričko modeliranje

## Key words

rock mass,  
field investigations,  
convergence,  
measurement,  
interpretation of results,  
numerical modeling

## Mots clés

massif rocheux,  
études sur le terrain,  
convergence,  
mesure,  
interprétation des résultats,  
modélisation numérique

## Schlüsselworte:

Felsmasse,  
Geländeuntersuchungen,  
Konvergenz,  
Messung,  
Interpretation der  
Ergebnisse,  
numerische Modellierung

M. Doležalova, V. Zemanova, J. Danko, L. Kovacs

Izvorni znanstveni rad

## Mjerenje konvergencije i numeričko modeliranje stijenske mase

Opsežna terenska istraživanja u istražnim galerijama i njihovo ocjenjivanje numeričkim modelima smatraju se korisnim sredstvom za karakterizaciju stijenske mase. Opisuju se mjerenja konvergencije obavljena u istražnom tunelu te njihovo modeliranje i interpretacija numeričkim metodama. U prvom se dijelu prikazuju mjerenja konvergencije, metodologija toga mjerenja i postignuti rezultati, a u drugom dijelu se obrađuje modeliranje i interpretacija rezultata numeričkim metodama.

M. Doležalova, V. Zemanova, J. Danko, L. Kovacs

Ouvrage scientifique paper

## Convergence measurement and numerical modeling of the rock mass

Extensive field investigations in exploratory tunnels and their evaluation by numerical models, are considered to be an useful tool for rock mass characterization. Convergence measurements performed in exploratory tunnel, and their modeling and interpretation by numerical methods, are described. Convergence measurements, measurement methodology and the corresponding results are given in the first part of the paper. The second part focuses on the modeling and interpretation of results by numerical methods

M. Doležalova, V. Zemanova, J. Danko, L. Kovacs

Ouvrage scientifique original

## Mesure de la convergence et modélisation numérique du massif rocheux

Les études étendues sur le terrain dans des galeries de reconnaissance et leur évaluation par des modèles sont considérées comme un moyen utile de caractérisation du massif rocheux. L'on décrit les mesures de la convergence effectuées en galerie de reconnaissance ainsi que leur modélisation et l'interprétation par des méthodes numériques. La première partie présente les mesures de la convergence, la méthodologie de ces mesures et les résultats obtenus, tandis que la deuxième partie traite de la modélisation et de l'interprétation des résultats obtenus par des méthodes numériques.

M. Doležalova, V. Zemanova, J. Danko, L. Kovacs

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Konvergenzmessung und numerische Modellierung der Felsmasse

Umfangreiche Geländeuntersuchung in Untersuchungsgalerien und deren Bewertung durch numerische Modelle haltet man für nützliche Mittel für die Kennzeichnung der Felsmasse. Beschrieben sind im Untersuchungstunnel durchgeführte Konvergenzmessungen und deren Modellierung und Interpretation der Ergebnisse durch numerische Methoden. Im ersten Teil sind Konvergenzmessungen dargestellt, die Messungsmethodologie und die erreichten Ergebnisse, und im zweiten Teil sind Modellierung und Interpretation der Ergebnisse durch numerische Methoden bearbeitet.

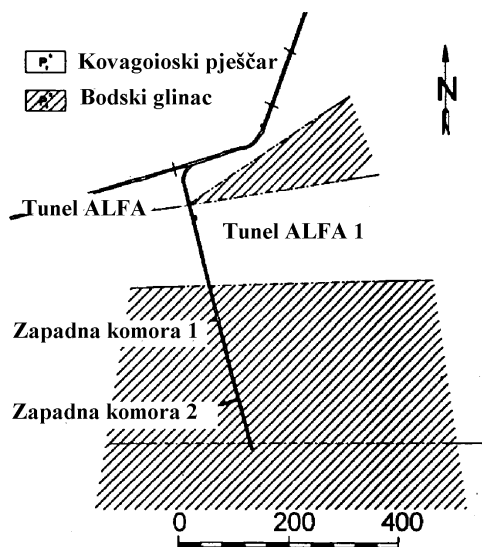
Autori: Dr. sc. **Marta Doležalova, Vlasta Zemanova, Jaroslav Danko**, Dolexpert-Geotechnika, Prag, Republika Češka; **Laszlo Kovacs**, Rudarsko poduzeće Mecsek, Mađarska

## 1 Uvod

Kada se razmatra odlaganje visokoradioaktivnog otpada (HLW) iz nuklearne elektrane Paks, koja daje otprilike 40% od ukupne električne energije koja se proizvede u Mađarskoj, svi se stručnjaci slažu da bi se dio HLW-a trebao odlagati u nekoj dubokoj geološkoj formaciji.

Čini se da bi za rješenje tog problema mogla biti pogodna stijenska formacija poznata pod nazivom "naslage bodskoga glinca" (BCF), koja se nalazi u zapadnom planinskom području Mecsek. BCF je sedimentarna stijenska formacija koja je nastala u srednjem permiju, a poznato je da se prostire na području većem od 150 km<sup>2</sup>. U tom području stratigrafska debljina ovih naslaga varira od 700 do 900 m. Na temelju njegova mineraloško-petrografskog sastava i izolacijskih svojstava, BCF možemo svrstati u grupu glinastih matičnih stijena [9].

U ovoj je regiji program istraživanja za konačno odlaganje HLW-a pokrenut potkraj 1993. godine a provodio se neuobičajenom brzinom zbog izuzetno povoljnih uvjeta. Istraživanjem su, zbog postojećega tunelskog sustava, obuhvaćene dubine veće od 1000 m, a pritom je iskorištena postojeća infrastruktura rudnika koji je i sada u funkciji (geometrija istražnih tunela prikazana je na slici 1.).



Slika 1. Tunelski sustav URL u W. Mecseku, Mađarska

Već su se u prvoj godini počele provoditi značajne serije ispitivanja *in situ* radi geološke karakterizacije promatranih naslaga, i to površinskim istražnim radovima, dubinskim bušenjem i laboratorijskim ispitivanjima. Program istraživanja uključuje mineraloško-petrografske, geokemijske, hidrogeološke i hidrogeokemijske studije, studije iz područja mehanike stijena, geofizičke studije, analizu izotropnog transporta i mikrobiološke studije, a također i izradu geološke dokumentacije, kartiranje i uzorkovanje. U ovaj je rad uključen jedan element - program mjerenja konvergencije - u opsežne

istražne radove koji se sastoje od preko stotinu različitih vrsta ispitivanja te od modeliranja i tumačenja rezultata dobivenih numeričkim metodama. Osnovni problem koji je trebalo riješiti sastojao se u uočenoj varijabilnosti pravaca maksimalne konvergencije što nije moglo biti uzrokovano varijabilnošću naponskog polja *in situ*. Problem je riješen kako slijedi.

Da bi se uskladili rezultati mjerenja, obavljena je analiza geoloških uvjeta u konvergencijskim dionicama, te su definirani pukotinski sustavi karakteristični za BCF. Utjecaj pukotinskih sustava na mjerenje konvergencije eksplicitno je modeliran s pomoću UDEC-a (univerzalnog kodeksa izraženih elemenata) te je na temelju rezultata mjerenja obavljena povratna analiza svojstava pukotina. Modelom diskontinuuuma otkrivena je anizotropnost stijenske mase pa je stoga u analizama kontinuuma s pomoću FEM-a uporabljen poprečno izotropni materijal. Parametri za ovaj materijal izvedeni su iz svojstava raspucane stijenske mase, ali su i dodatno definirani tro-dimenzionalnom parametarskom analizom u kojoj se u obzir uzimalo napredovanje u iskopu tunela. Pokazalo se da su konstitutivni modeli određeni za BCF univerzalni te da omogućuju usklađivanje različitih rezultata mjerenja konvergencije koji su varirali od profila do profila zbog različitih geoloških uvjeta.

## 2 Mjerenja konvergencije

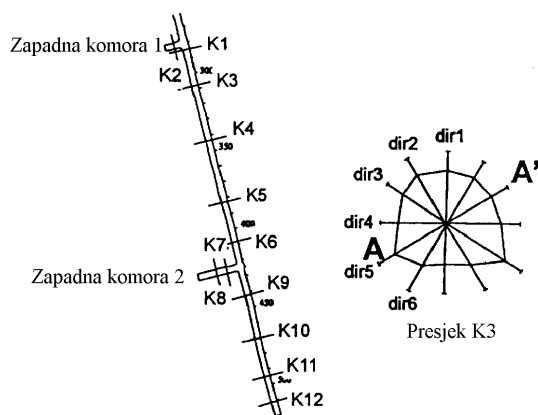
Bez obzira na relativnu jednostavnost postupka, mjerenje konvergencije smatra se vrlo pouzdanom i informativnom metodom mjerenja koja se vrlo često primjenjuje u rudarstvu i tunelogradnji. Metoda se zasniva na činjenici da se elastična deformacija površine stijene može, zbog otpuštanja napona za iskopa, izmjeriti u smjerovima određenima konvergencijskim klinovima koji su instalirani u neposrednoj blizini čela tunela. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem konvergencije u tijeku karakterizacije terena nije samo značajna za procjenu naponskog stanja *in situ* nego i zbog sljedećih razloga:

- to mjerenje pridonosi karakterizaciji znatno promijenjenih izolacijskih svojstava u iskopom poremećenoj zoni (EDZ)
- na osnovi tog mjerenja dobivaju se podaci o ponašanju stijenske mase u koju će biti smješteno tehničko postrojenje u dužem vremenskom razdoblju.

Metoda je na temelju prijedloga kanadskog AECL-a po prvi put primijenjena 1994. godine. Kako se prije toga u Mađarskoj nisu obavljala mjerenja te vrste, u prvom je koraku trebalo razviti odgovarajući mjerni uređaj isto kao i kompletnu tehnologiju instaliranja i mjerenja. Obavljena je serija kalibracijskih ispitivanja u laboratoriju, uključujući i kontrolu točnosti mjerenja pomaka i određivanje korekcije temperature. Zbog primjene posebnih

tehničkih rješenja, postignuti su vrlo dobri rezultati pri testiranju instrumenta: njegova točnost pri ponovnom instaliranju i mjerenju iznosila je  $\pm 0,02$  mm.

Mjerenja konvergencije obavljena su na ukupno 12 dionica u tunelu Alfa-1 koji je bušen u smjeru pada terena, pa su tako naslage BCF-a ispitane u raznim geološkim uvjetima. Vrijednosti konvergencije dobivene su s pomoću 12 konvergencijskih klinova po dionici (u 6 smjerova) te nakon najmanje 5 miniranja. Položaj mjernih dionica i njihove geometrije prikazane su na slici 2. U svim su slučajevima na temelju podataka dobivenih mjerenjem dokumentirani parametri koji utječu na ocjenjivanje (geološki uvjeti, geometrija, vremenski slijed, tehnologija itd.).



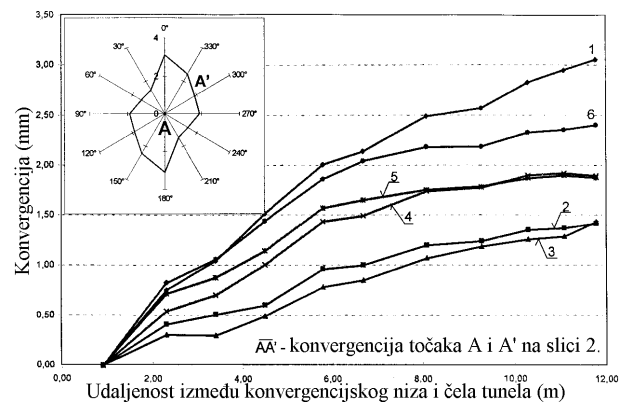
Slika 2. Zone mjerenja konvergencije (K1-K12) u istražnom tunelu Alfa-1

Početna udaljenost čela od mjerne dionice uglavnom je varirala od 0,7 do 1,0 m. Dužina konvergencijskih klinova iznosila je 1,2 m u kruni i 1,8 m u podnom dijelu tunela. Pri takvim se dubinama moglo pretpostaviti linearno elastično ponašanje stijenske mase što je neophodno za određivanje osnovnih napona *in situ* na temelju prvih mjernih rezultata i Kirschove formule [6]. Ovim su pristupom dobiveni vertikalni naponi koji odgovaraju težini nadsloja i koeficijent bočnog pritiska pri mirovanju  $K_0 = 1$ .

Pri analizi mjernih dionica poseban je naglasak stavljen na dionicu K8 koja se nalazi u zapadnoj komori br. 2 (slika 2.) jer se u toj dionici mogla provjeriti točnost i pouzdanost metode s pomoću druge, neovisne serije mjerenja. U toj je dionici obavljen takozvani *kompletan niz ispitivanja* radi analize širokog raspona fizičkih (mehaničkih, hidrauličkih i termičkih) procesa do kojih dolazi zbog pomaka. U istu je dionicu AECL postavio konvergencijske klinove i radijalne ekstenzometre. Nakon usporedbe s rezultatima dobivenima ekstenzometrima, utvrđeno je da se instrument i tehnologija za mjerenje konvergencije mogu smatrati pouzdanima.

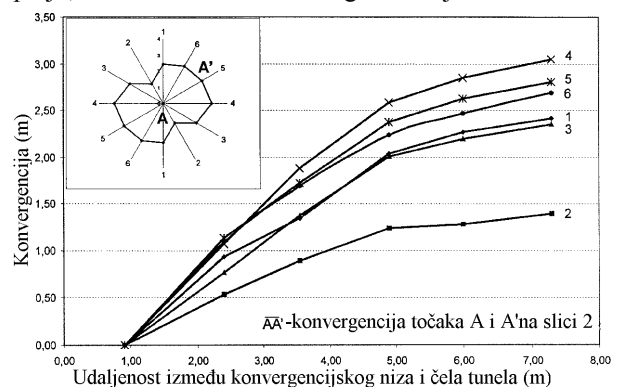
Odnos između mjerenja konvergencije i napredovanja na čelu tunela prikazan je na slici 3. za dionicu K8, te na

slici 4. za dionicu K3. Zbroj radijalnih pomaka točaka A i A' koje su prikazane na slici 2. predstavljen je segmentima AA' na slikama 3. i 4.



Slika 3. Rezultati mjerenja konvergencije na dionici K8

Maksimalna vrijednost konvergencije izmjerena nakon dovršetka osnovne serije mjerenja, tj. nakon pet miniranja, obično je varirala od 2,5 do 5,0 mm. Od toga se izuzimaju dionice instalirane u tektonskim zonama. U tim su područjima, neobičajeno visoke ili niske vrijednosti u nekim smjerovima uvjetovane lokalnim sedimentološkim ili mikrotektonskim pojavama. Što se tiče učestalosti, možemo razlikovati dvije osnovne skupine. Prema prikazu konvergencije iz slike 3., koji je svrstan u prvu grupu, maksimalni pomaci nalaze se u blizini vertikalne ravnine (to je češći slučaj i može se smatrati tipičnim imajući na umu rezultate ostalih ispitivanja). U drugoj skupini (slika 4.), maksimalna vrijednost konvergencije javlja se kod malog kuta u odnosu prema horizontalnoj ravnini. Analiza koja se prikazuje u nastavku pokazuje da uzrok te pojave nisu velike razlike u naponskom polju, već strukturalna nehomogenost stijenske mase.



Slika 4. Rezultati mjerenja konvergencije na dionici K3

Kako je nakon završetka iskopa registrirana značajna konvergencija, donesena je odluka da se program mjerenja dopuni dodatnim mjerenjima. Ta su mjerenja pokazala da naknadna konvergencija, koja se može pripisati reološkim uvjetima, nastupa u razdoblju od pola godine

nakon iskopa, a njezina je veličina u skladu s vrijednostima konvergencije koje su dobivene u osnovnoj seriji mjerenja.

Iskustva su pokazala da se u procjeni mjernih rezultata s pomoću zatvorenih matematičkih formula javljaju brojne nesigurnosti: oblik niza nije idealan: primijenjeni potporni sustav - klinovi na krovu - uvelike utječe na rezultirajuće radijalne pomake, s obzirom na to da može doći do bitnih razlika između pomaka dvaju klinova koji su smješteni jedan nasuprot drugom i koji određuju vrijednost mjerenja u danom smjeru. Baš se zbog tog razloga pokazala potreba za primjenom numeričkih metoda. U prvom je koraku obavljeno modeliranje mjerenja konvergencije na dionici K3 (slika 4.), nakon čega su uvršteni podaci očitani na instrumentima koji su uporabljeni u okviru *kompletnog niza ispitivanja*. Postupkom modeliranja i ocjenjivanja koji se opisuje u nastavku izvedeni su brojni zaključci, a njihova je točnost za jedan red veličine viša u odnosu prema prvobitnim očekivanjima.

### 3 Numeričko modeliranje konvergencije

Kao što se vidi iz navedenog, mjerenjem konvergencije u raznim geološkim uvjetima dobivaju se složeni podaci ne samo o popuštanju napona *in situ*, nego i o strukturi stijenske mase. Stoga se ta mjerenja mogu iskoristiti ne samo za određivanje naponskog stanja *in situ*, nego i za identifikaciju konstitutivnih modela i parametara kojima se opisuju mehanička svojstva stijenske mase.

Odgovarajuća analiza obavljena je u nekoliko koraka [8] koji se prikazuju u nastavku.

Prvo je analiziran utjecaj geoloških uvjeta na rezultate mjerenja. Pokazalo se da smjer maksimalne konvergencije ovisi o usmjerenju najslabijega pukotinskog sustava.

Nakon toga su zadane karakteristike pukotinskog sustava tektonski neporemećenih (plohe oslanjanja) i poremećenih dijelova BCF-a (plohe oslanjanja i gotovo vertikalne pukotine). Ustanovljeno je da se konvergencijske dionice iz prve skupine (pravilni pomaci s maksimalnim vertikalnim usmjerenjem) nalaze u tektonski neporemećenim dijelovima BCF-a gdje plohe oslanjanja čine najslabiji pukotinski sustav. Suprotno vrijedi za drugu skupinu gdje se pokazalo da je gotovo vertikalni pukotinski sustav zapravo najslabiji.

U trećem je koraku obavljena dvodimenzionalna parametarska studija jasno izraženih elemenata (UDEEC), radi eksplicitnog modeliranja pukotina, pa su u tom smislu određena svojstva pukotina u skladu s rezultatima mjerenja.

U četvrtom je koraku uveden poprečno izotropni konstitutivni model za BCF s modulima koji su izvedeni iz svojstava raspucane stijene. Taj je model primijenjen u analizama kontinuuma metodom konačnih elemenata.

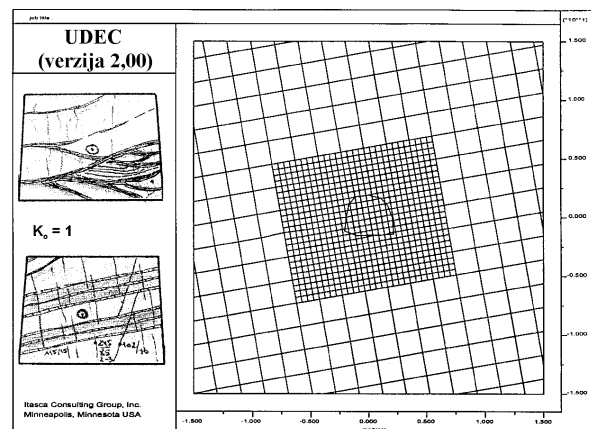
Peti je korak zapravo postupak preciznijeg definiranja vrijednosti neovisnoga posmičnog modula, a za to je primijenjena trodimenzionalna parametarska studija FEM. Na temelju tih rezultata analiziran je utjecaj napredovanja radova na čelu tunela za mjerenje konvergencije, a to je obavljeno s pomoću velikoga trodimenzionalnog modela FEM.

Kao što smo već spomenuli, prvi su modeli razvijeni za dionicu K3 koja se nalazi u tektonski poremećenom dijelu BCF-a. Ovdje je do maksimalne konvergencije došlo u gotovo horizontalnom smjeru (slika 4.) što je djelomično uzrokovano iskopom  $v$  (~50%) a djelomično puzanjem  $v_c$  (~50%). Odgovarajuće vrijednosti  $v/v_c$  izmjerene u pomenutih šest smjerova iznose:  $0^\circ$  - 2,42 mm/2,33 mm;  $30^\circ$  - 1,40/1,67;  $60^\circ$  - 2,35/3,85;  $90^\circ$  - 3,05/3,37;  $120^\circ$  - 2,81/3,58;  $150^\circ$  - 2,69/2,14. Može se uočiti da je utjecaj puzanja veći u horizontalnom nego u vertikalnom smjeru.

#### 3.1 Dvodimenzionalni model UDEC

Ako se mjerenje konvergencije simulira dvodimenzionalnim modelom, tada se trebaju pretpostaviti pomaci koji nastaju prije instaliranja mjernih uređaja. Ta se početna konvergencija (polje pomaka  $v_0$ ) ne može izmjeriti *in situ*, ali bi se zato mogla izračunati s pomoću trodimenzionalnog modela. U ovoj je studiji za dvodimenzionalne modele pretpostavljen odnos  $v_0 \approx v_c$ , s tim da se težilo prema aproksimaciji izmjenjenog iznosa  $v_c + v \approx v_0$ .

Za model jasno izraženih elemenata odabrano je područje od 30 x 30 m oko poprečnog presjeka istražnog tunela (širine 4,0 m, visine 3,5 m), a u mrežu su uključeni karakteristični pukotinski sustavi, pojačanje tunela injektiranim sidrima i lokacija konvergencijskih klinova (slika 5.). Usvojene su sljedeće pretpostavke: naponsko stanje *in situ* koje je predstavljeno težinom nadsloja (29,3 MPa), zatim vrijednost  $K_0 = 1$ . Osim toga pretpostavljeno je da duž granica analiziranog područja nema normalnih pomaka.



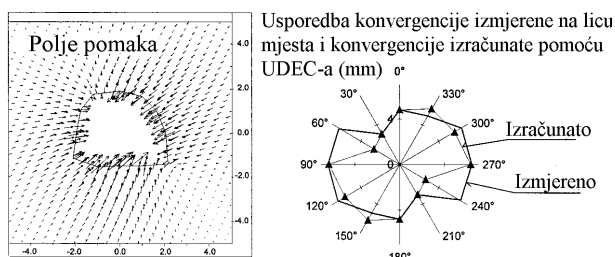
Slika 5. Karakteristični pukotinski sustavi u naslagama BCF i dvodimenzionalni model UDEC

Za blokove je primijenjen Mohr-Coulombov elastično-idealno plastični konstitutivni model dok je za pukotine primijenjena njegova verzija s nultom vrijednošću kohezije i vlačne čvrstoće nakon sloma. Sljedeći su koraci primijenjeni za određivanje svojstava materijala u skladu s rezultatima mjerenja konvergencije:

1. Primjena svojstava neporemećene stijene u skladu s laboratorijskim ispitivanjima za blokove te homogenizacija regije povećanjem krutosti pukotinskih sustava.
2. Određivanje modula deformacije i krutosti pukotina s minimalnom konvergencijom.
3. Zadržavanje krutosti pukotinskog sustava br. 1 (slika 5) te postupno smanjivanje krutosti pukotinskog sustava br. 2 radi modeliranja maksimalne konvergencije.
4. Smanjenje posmične čvrstoće pukotinskog sustava br. 1 u smislu razrade postupka prilagođavanja u vezi s maksimalnom konvergencijom.

Prema ovom postupku, BCF se može okarakterizirati sljedećim parametrima:  $E = 40000$  MPa,  $\nu = 0,20$ ,  $\varphi = 42^\circ$ ,  $c = 17,5$  MPa,  $\sigma_1 = 6,5$  MPa za blokove,  $k_0 = k_1 = 300.000$  MPa/m,  $\varphi = 42^\circ$ ,  $c = 8$  MPa,  $\sigma_1 = 3$  MPa za pukotinski sustav br. 1 i  $k_0 = k_1 = 30000$  MPa,  $\varphi = 42^\circ$ ,  $c = 17,5$  MPa i  $\sigma_1 = 1$  MPa za pukotinski sustav br. 2. Ovdje vrijednosti  $E$ ,  $\nu$ ,  $\varphi$ ,  $c$ ,  $\sigma_1$ ,  $k_0$ ,  $k_1$  označavaju deformacijski modul, Poissonov koeficijent, kut trenja, koheziju, vlačnu čvrstoću, normalnu krutost i krutost na posmik.

Osim u jednom smjeru, polje pomaka izračunano s pomoću tih parametara dobro je usklađeno konvergencijama koje su dobivene mjerenjem na Dionici K3 (slika 6.). Osim toga, pokazalo se da je dobiveni model diskontinuumu univerzalan. Primijenjen je i na dionicu K1 (koja je od dionice K3 udaljena samo 23 m) gdje je dominantna vertikalna konvergencija. Zadržavanjem istih parametara i mijenjanjem smjera pukotinskih sustava opet je postignuta dobra sukladnost između izmjerene i proračunate konvergencije ( $v_0 + v$ ).



Slika 6. Rezultati dobiveni primjenom modela UDEC i njihova usporedba s rezultatima mjerenja

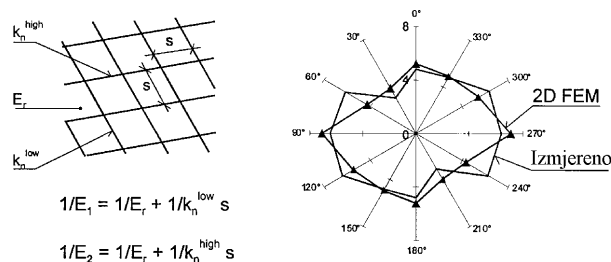
### 3.2 Dvodimenzionalni model FEM

Model diskontinuumu jasno je pokazao da se za opis deformacijskog odziva BCF-a treba uvesti visoka krutost u jednom smjeru i niska krutost u gotovo okomitom smjeru.

Kako se ova pojava može simulirati i poprečno izotropnim konstitutivnim modelom, taj je model primijenjen u analizama kontinuuma s pomoću FEM-a.

Osnovne pretpostavke modela 2D FEM iste su kao i kod modela UDEC. Za poprečni presjek trodimenzionalnog modela (slika 8.) primijenjena je naknadno usvojena mreža, a podloga stijenskog sidra modelirana je implikativnom metodom [1].

Poprečno izotropni materijal odlikuje se s pet neovisnih konstanti koje su određene na sljedeći način. Deformacijski moduli, a oni su najznačajniji parametri, izračunani su formulama prikazanim na slici 7. povratnom analizom svojstava pukotinske stijene (razmak pukotina  $s = 0,5$  m). Čak i te okvirne formule izvedene za samo jedan niz pukotina omogućile su postizavanje primjenjivih rezultata: izračunani moduli blizu su maksimalnih (oko 30.000 MPa) i minimalnih vrijednosti (oko 10.000 MPa) određenih za BCF s pomoću drugih vrsta terenskih pokusa. Preostali parametri ocijenjeni su empirijskim formulama prikazanim u [2] te pomoću neovisnoga posmičnog modula razrađenog putem trodimenzionalne parametarskom studijom.



Slika 7. Dvodimenzionalni model FEM s poprečno izotropnim materijalom: a) izvođenje modula iz svojstva pukotina, b) usporedba izračunanih i izmjerenih vrijednosti konvergencije

S pomoću niza parametara ( $E_1 \approx E_{hor} = 10.900$  MPa,  $E_2 \approx E_{vert} = 31.500$  MPa,  $G_2 = 6400$  MPa,  $\nu_1 = 0,20$ ,  $\nu_2 = 0,17$ ) i anvelope anizotropnog sloma ( $c = 17,5$  MPa,  $\varphi = 42^\circ$ ,  $\sigma_1 = 6,5$  MPa,  $\varphi^i = 42^\circ$ ,  $c^i = 8$  MPa,  $\sigma_1^i = 3$  MPa; pri čemu  $i$  označava svojstva duž plohe oslabljenja), postignuta je zadovoljavajuća usklađenost između izmjerenih i izračunanih konvergencija, i to bez ikakva postupka usuglašavanja (slika 7.).

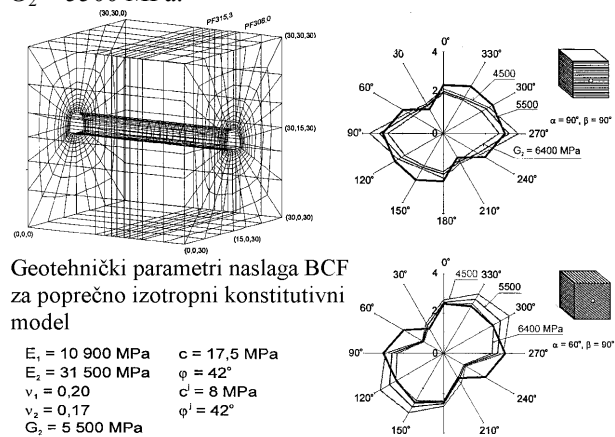
### 3.3 Trodimenzionalni modeli FEM

Veliki trodimenzionalni model FEM s ukupnim stupnjem slobode  $DOF = 42.95$  izrađen je da bi se modelirao utjecaj napredovanja tunelskih radova na konvergenciju na dionici K3. Ravnine simetrije nisu primijenjene zbog asimetričnosti poprečnog presjeka tunela i anizotropnosti stijenske mase, te je modeliran blok  $30 \times 30 \times 30$  m izoparametarskom ciglom s  $DOF = 60$ . Model je obuhvatio dio tunela ispred mjerne dionice K3, srednji dio koji je predstavljao sekvencu iskopa (iskop u punom profilu) i

završni dio na kojem je iskop obavljen naknadno. Što se tiče naponskog stanja *in situ*, rubnih uvjeta, injektiranih sidara itd., usvojene su pretpostavke koje su već prije definirane za dvodimenzionalni model FEM.

Trodimenzionalnim modelom zasebno su izračunane osnovne komponente ukupne konvergencije: konvergencija prije instaliranja mjernih uređaja  $v_0$ , konvergencija zbog napredovanja na čelu tunela  $v$ , i komponenta puzanja  $v_c$ . U praksi je izuzetno važno točno izračunati vrijednost  $v$  kao razliku u poljima pomaka u dvije faze iskopa (početna faza u kojoj je udaljenost čela od dionice K3 0,90 m i nove faze s većim udaljenostima od čela, tj. 2,4; 3,55; 4,90; 6,00 i 7,30 m).

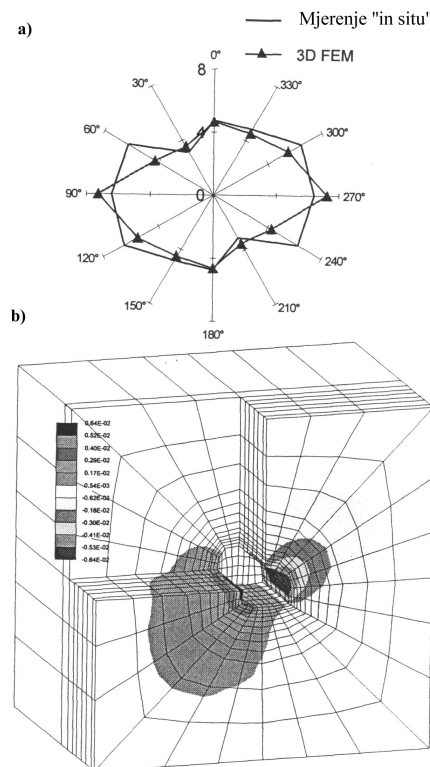
Iako su izmjereni trendovi vrijednosti  $v$  i  $v + v_c$  slični, oni ipak nisu potpuno proporcionalni (usp. slike 4. i 7.). Stoga se za trodimenzionalni model FEM mogu primijeniti parametri dobiveni za elastoplastični poprečno izotropni materijal dvodimenzionalnom analizom FEM, ali uz neke manje izmjene. Trodimenzionalna studija obavljena je radi analize utjecaja nagiba ravnine izotropnosti te određivanja neovisnog modula smicanja  $G_2$ . Na temelju dobivenih rezultata, za konačni niz parametara prikazan na slici 8. odabrana je prosječna vrijednost  $G_2 = 5500$  MPa.



Slika 8. Trodimenzionalni model FEM za modeliranje napredovanja na čelu tunela dionice K3 i rezultati trodimenzionalne parametarske studije

Za potrebe ove studije aproksimacija komponente puzanja  $v_c$  obavljena je na relativno jednostavan način. Nakon iskopa prvog dijela tunela (udaljenost od čela: 0,9 m) moduli  $E_1$ ,  $E_2$  i  $G_2$  umanjani su faktorom 0,5 te je nakon toga iskopan preostali dio tunela (dužina: 21,1 m). Iako je na takav način postignuta zadovoljavajuća aproksimacija (slika 9.), u terenski program karakterizacije BCF-a u budućnosti bi se trebao uključiti i segment razvoja reološkog modela BCF-a i trodimenzionalna visokoplastična analiza o vremenu ovisnih elemenata konvergencijskih mjerenja obavljenih u raznim dijelovima tunela ALFA-1.

Što se tiče određivanja zastupljenosti pojedinih komponenta u ukupnoj konvergenciji, trodimenzionalnom je analizom usklađivanjem mjernih rezultata dobiven slje



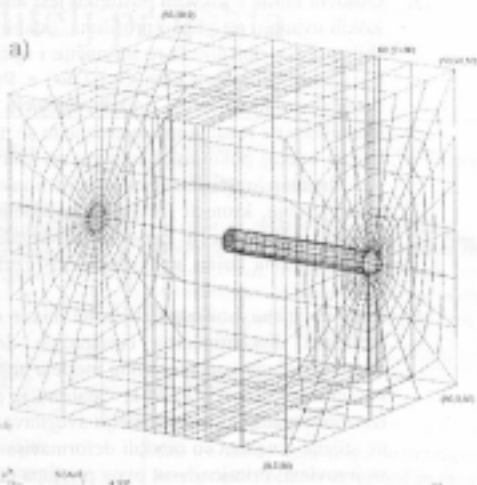
Slika 9. Rezultati dobiveni trodimenzionalnim modelom FEM na dionici K3 s poprečno izotropnim materijalom: a) usporedba izračunate i izmjerene konvergencije, uključujući i puzanje, b) konture horizontalnog pomaka koje odgovaraju rezultatima mjerenja konvergencije

deći postotak:  $v_0 + v + v_c = (0,4 + 0,3 + 0,3) v_t$ , gdje je  $v_t$  ukupna konvergencija. Ako se u obzir uzmu samo  $v_0$  i  $v$ , možemo uočiti da je  $v_0$  čak 60 posto od zbroja  $v_0 + v$ .

Takav zaključak, isto kao i univerzalni karakter poprečno izotropnog modela razvijenog za BCF, potvrđen je još jednim velikim trodimenzionalnim modelom FEM (DOF = 72 260) koji je izrađen radi modeliranja i interpretacije kompleksnih rezultata mjerenja na dionici K8 (*kompletan niz ispitivanja*). Iako je u tom profilu izmjereno bitno drugačiji konvergencijski trend s maksimalnom vrijednošću u vertikalnom smjeru (slika 3.), dobra je usklađenost postignuta (slika 10.) nizom parametara ( $E_1 = 31.500$  MPa,  $E_2 = 12.500$  MPa,  $G_2 = 5.500$  MPa,  $\nu_1 = 0,17$ ,  $\nu_2 = 0,20$ ,  $c = 17,5$  MPa,  $\varphi = 42^\circ$ ,  $\sigma_t = 6,5$  MPa,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\psi$  - kut širenja) koji praktički odgovaraju parametrima dobivenima na dionici K3 (slika 8.). Sljedeći pravac maksimalne konvergencije, zamijenjeni su parametri viših i nižih krutosti (krući modul sada je u gotovo horizontalnoj ravnini uslojenosti) dok je niži modul malo povećan sa 10.900 na 12.500 MPa.

M. Doležalova i drugi

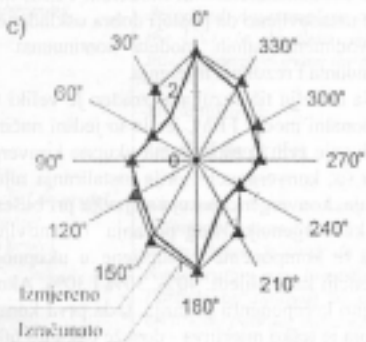
Istraživanje stijenske mase



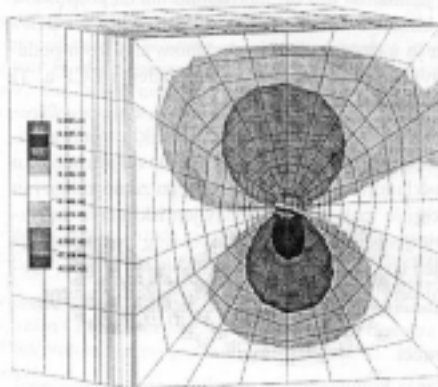
b)

PARAMETRI:

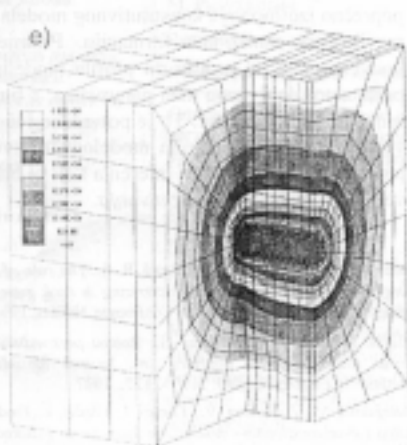
- $E_1 = 31\ 500\ \text{MPa}$        $c = 17.5\ \text{MPa}$
- $E_2 = 12\ 500\ \text{MPa}$        $\varphi = 42^\circ$
- $\nu_1 = 0.17$                $c' = 8\ \text{MPa}$
- $\nu_2 = 0.20$                $\varphi' = 42^\circ$
- $G_2 = 5\ 500\ \text{MPa}$



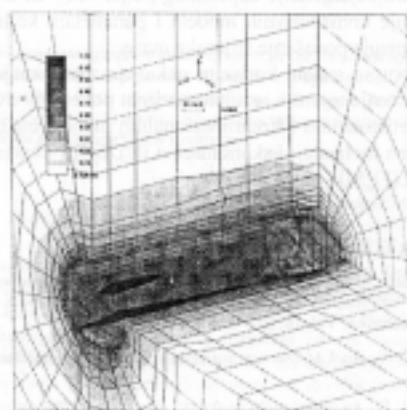
d)



e)



f)



Slika 10. Trodimenzionalni model FEM za kompletan niz ispitivanja (a), parametri korišteni za dionicu K8 (b), usporedba izmjerenih i izračunanih vrijednosti konvergencije za dionicu K8 (c), vertikalni pomaci (d), konture pornog pritiska (e) i aktiviranje posnične čvrstoće (f) prema rezultatima mjerenja

Uz konvergenzijske klinove instalirano je i šest ekstenzometara, šest triaksijskih deformacijskih ćelija i višepaketski sustavi za mjerenje tlaka u bušotinama, da bi se tako dobio *kompletan niz ispitivanja*. Sve su mjerne točke uvrštene u mrežu FE (slika 10.) i upotrijebljene za uspoređivanje.

Ekstenzometrima je potvrđena konvergencija koja je izmjerena i izračunana na dionici K8. To međutim vrijedi samo za prosječne vrijednosti radijalnih pomaka. U drugim je slučajevima uočena heterogenost tog profila, koji nije uključen u model. Što se tiče mjerenja na deformacijskoj ćeliji, postignuta je dobra kvantitativna usklađenost. Slično vrijedi i za trend izračunanih i izmjerenih promjena pornog pritiska zbog bušenja tunela.

Uz ovaj sjedinjeni trodimenzionalni model FEM, obavljene su i dvije opsežne parametarske studije s pomoću sjedinjenih dvodimenzionalnih modela UDEC. U prvoj je studiji analiziran utjecaj mikropukotina na propusnost stijene u blizini bušotine. Toplinska provodljivost BCF-a ispitana je u drugoj studiji povratnom analizom podataka dobivenih praćenjem postupka hlađenja BCF-a. Ti će rezultati uskoro biti objavljeni.

Valja istaknuti da je rješavanje tako velikih trodimenzionalnih modela, koji simuliraju napredovanje radova u tunelu i usklađuju rezultate mjerenja, izuzetno zahtjevan zadatak koji je ipak uspješno obavljen isključivo zahvaljujući primjeni novog i vrlo učinkovitog postupka koji je objavljen u radu [7] te koji je primijenjen u našoj modificiranoj verziji koda CRISP [5] što je izradio autor.

#### 4 Zaključci

1. Mjerenja konvergencije obavljaju se u raznim geološkim uvjetima a mogu se primijeniti ne samo za *in situ* ocjenjivanje naponskog polja, već i za definiranje konstitutivnih modela i parametara kojima se opisuje ponašanje stijenske mase.
2. U tom se smislu korisnim pokazalo modeliranje i tumačenje mjernih rezultata serijom povezanih dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih modela baziranih na mehanici diskontinuuuma (UDEC) i kontinuuuma (FEM).

#### LITERATURA

- [1] Indraratna, B.; Kaiser, P. K.: *Analytical design for grouted rock bolts*. Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 14: 227.-251. 1990.
- [2] Wittke, W.: *Rock Mechanics*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1990.
- [3] Hart, R. D.: *An introduction to distinct element modeling for rock engineering*. Proc. of the 7th Int. Congress on Rock Mechanics, Aachen, Germany, 1991. [4] *UDEC (Universal Distinct Element Code)*, Version 2.0. ITASCA Consulting Group, Inc. Minneapolis, Minnesota, USA, 1993.
- [5] Britto, A. R.: *CRISP-94 program*, Cambridge University, UK., 1994.

3. Osnovni korak u takvom postupku jest analiza geoloških uvjeta u mjerenim profilima, odabir pukotinskih sustava tipičnih za te formacije i njihovo eksplisno modeliranje s pomoću UDEC-a. Parametarskom se studijom mogu odrediti svojstva pukotina utemeljena na rezultatima mjerenja, te se može analizirati utjecaj pukotinskih sustava na konvergenciju. Određena je ovisnost maksimalne konvergencije o usmjerenju, krutosti i čvrstoći najslabijeg pukotinskog sustava, te je razvijen univerzalni model diskontinuuuma kojim su obuhvaćeni rezultati mjerenja.
4. Karakteristična obilježja stijenske mase određena modelom diskontinuuuma omogućuju definiranje odgovarajućega konstitutivnog modela za analizu s kontinuuuma pomoću FEM-a. Odabran je poprečno izotropni materijal, a na temelju svojstava raspucane stijene izvedeni su moduli deformacije u raznim smjerovima. Primjenjivost ovog pristupa provjerena je dvodimenzionalnim modelom FEM, nakon čega je ustanovljeno da postoji dobra usklađenost između dvodimenzionalnih modela kontinuuuma i diskontinuuuma i rezultata mjerenja.
5. Na temelju tih rezultata izrađen je veliki trodimenzionalni model FEM, jer je to jedini način za određivanje svih komponenata ukupne konvergencije, a to su: konvergencija prije instaliranja mjernih uređaja, konvergencija koja se javlja pri bušenju tunela i konvergencija zbog puzanja. Ustanovljeno je da su te komponente zastupljene u ukupnoj konvergenciji kako slijedi: 40%, 30% i 30%. Ako zanemarimo komponentu puzanja, tada prva komponenta - koja je teško mjerljiva - doseže čak i do 60%.
6. Dokazan je univerzalni karakter elastoplastičnoga i poprečno izotropnoga konstitutivnog modela koji je razvijen za analiziranu formaciju. Promjenjivost konvergencije od profila do profila modelirana je primjenom dobivenog niza parametara, s tim da se mijenjao njihov pravac. To je potvrđeno još jednim velikim trodimenzionalnim modelom u okviru kojeg su simulirani rezultati mjerenja koji bi bili dobiveni *kompletnim nizom ispitivanja*.

- [6] Martin, C. D.; Chandler, N. A.; Read, R. S.: *The role of the convergence measurements in characterizing a rock mass*. Proceedings 47th Canadian Geotechnical Conference, Halifax, 1994.
- [7] Hladik I.; Reed, M.; Swoboda, G.: *Robust preconditioners for linear elasticity FEM analyses*. Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, 40: 2109.-2127., 1997.
- [8] Doležalova, M.; Zemanova, V.; Danko, J.; Hladik, I.: *Trodimenzionalno i dvodimenzionalno modeliranje kontinuuuma i diskontinuuuma konvergencije u cilju karakterizacije formacija bodskog glinca*, Znanstveni izvještaji, 1. i 2. dio, Dolexpert-Geotechnika, Prag, 1998.
- [9] Ormai P.; Frigyesi, F.; Pavlik, O.; Balla, Z.; Kovacs, L.: *Double challenge for Hungary in radwaste management*. Paper presented at WM '98 conference at Tucson, USA, 1998.