

Modeliranje kontinuuma i diskontinuuma u tunelogradnji

Giovanni Barla, Marco Barla

Ključne riječi

tunelogradnja,
modeliranje,
kontinuum,
diskontinuum,
izvedba, iskop,
numeričke metode

G. Barla, M. Barla

Pregledni rad

Modeliranje kontinuuma i diskontinuuma u tunelogradnji

U radu se razmatra modeliranje kontinuuma i diskontinuuma u tunelogradnji. Daje se kratak pregled primjena rješenja u zatvorenom obliku i numeričkih metoda. Izvodi se i nekoliko zaključaka o izboru između metoda kontinuuma i diskontinuuma pri modeliranju ponašanja stijenske mase u fazi izrade projekta. Razmatra se opravdanost modeliranja diskontinuuma u odnosu na metode za klasifikaciju stijenske mase i očekivani odziv tunela na iskop. Prikazan je i primjer izvedenog tunela.

Key words

tunneling,
modeling,
continuum,
discontinuum,
construction,
excavation,
numerical methods

G. Barla, M. Barla

Subject review

Continuum and discontinuum modelling in tunnelling

The modeling of continuum and discontinuum in tunneling is discussed in the paper. A brief overview of closed-form solutions and numerical methods is presented. Several conclusions are given to facilitate the choice between continuum and discontinuum methods while modelling rock mass behavior at the design stage. The adequacy of discontinuum modeling, as related to rock mass classification methods and expected tunnel response to excavation, is discussed. An example of a completed tunnel is also presented.

Mots clés

construction des tunnels,
modélisation,
continuité,
discontinuité,
exécution,
excavation,
méthodes numériques

G. Barla, M. Barla

Ouvrage de synthèse

Modélisation de la continuité et de la discontinuité dans la construction des tunnels

L'article étudie la modélisation de la continuité et de la discontinuité dans la construction des tunnels. On donne un bref aperçu des conceptions sous forme fermée et des méthodes numériques. On déduit aussi quelques conclusions sur le choix entre les méthodes de la continuité et de la discontinuité lors de la modélisation du comportement du massif rocheux au stade de l'établissement de l'étude. On étudie le bien-fondé de la modélisation de la discontinuité par rapport aux méthodes de la classification du massif rocheux et à la réponse escomptée du tunnel à l'excavation. On donne enfin l'exemple d'un tunnel réalisé.

Schlüsselworte:

Tunnelbau,
Modellierung,
Kontinuum,
Diskontinuum,
Ausführung,
Aushub,
numerische Methoden

G. Barla, M. Barla

Übersichtsarbeit

Modellierung der Kontinuum und Diskontinuum im Tunnelbau

Im Artikel betrachtet man das Modellieren der Kontinuum und Diskontinuum im Tunnelbau. Vorgelegt ist ein kurzer Überblick der Anwendung von Lösungen in geschlossener Form und von numerischen Methoden. Abgefasst sind einige Schlüsse über die Wahl zwischen den Methoden des Kontinuums und des Diskontinuums beim Modellieren des Verhaltens des Felsmassivs in der Phase der Arbeit am Entwurf. Man erwägt die Berechtigung des Modellierens des Diskontinuums im Verhältnis zu den Methoden für die Klassifizierung des Felsmassivs und die erwartete Reaktion des Tunnels auf den Aushub. Dargestellt ist auch das Beispiel eines ausgeführten Tunnels.

Autori: Prof. dr. **Giovanni Barla**, dipl. ing.; dr. **Marco Barla**, dipl. ing. geot., Katedra za konstrukcije i geotehniku, Politecnico di Torino, Italija

1 Uvod

Predviđanje odziva stijenske mase na iskopavanje tunela smatra se složenim inženjerskim problemom. U stadiju projektiranja geotehnički inženjeri ocjenjuju uvjete stabilnosti pri iskopu u "intrinzičnom stanju", to jest bez uvođenja mjera za podgrađivanje i stabilizaciju tunela, te nakon usvajanja odgovarajućih metoda za probijanje i podgrađivanje tunela. Ključ za uspjeh takvog postupka jest u razumijevanju uvjeta stijenske mase, tj. u poznavanju geoloških, geotehničkih i hidrogeoloških parametara i napona *in situ*, te u mogućnosti predviđanja osnovnih komponenata ponašanja stijenske mase i to primjenom odgovarajućih metoda za analizu napona i pomaka u stijenskoj masi oko tunela i u samim konstruktivnim elementima (mjere prethodnog podupiranja i stabiliziranja, primarna i konačna podgrada itd.).

Danas se za analizu napona u tunelima uporabljaju mnoge metode, počevši od najranijih rješenja zatvorenog oblika pa sve do najnovijih numeričkih metoda modeliranja. Snaga danas dostupnih računala omogućuje nam uspješno rješavanje sve složenijih problema. To se naročito odnosi na numeričke metode, čiji napredak nam je omogućio razvoj postupaka kojima se na realan način može modelirati ponašanje stijenske mase. Dakle, situacija se sada bitno razlikuje od one u početku razvoja mehanike stijena kada su se analitičke metode i rješenja uglavnom preuzimali iz drugih područja tehničkih znanosti. To je svakako bio slučaj i s rješenjem koje je Kirsch razvio 1898. godine za potrebe definiranja napona i pomaka oko kružnog otvora u dvosno opterećenoj, homogenoj, izotropnoj i linearno elastičnoj ploči.

Rješenja u zatvorenom obliku još uvijek su korisna za razumijevanje odziva tunela na iskop. U tom smislu možemo spomenuti rješenja koja se danas primjenjuju za analizu progresivnog razvoja sloma oko okruglog tunela u polju hidrostatičkog napona [7, 17], te za analizu međusobnih djelovanja između stijenske mase i podgrade. Međutim, značenje tih rješenja u području projektiranja ipak je ograničeno i zbog razvoja modernih tehnika za izvođenje tunela i zbog složenosti karakteristika i ponašanja stijenske mase, što se danas puno bolje opisuje zbog dostupnosti modernih sredstava za provedbu istražnih radova.

Geotehnički se inženjeri u fazi proračuna projektiranja trebaju odlučiti za jedan od sljedeća dva pristupa:

- *jednaki kontinuum*: stijenska masa tretira se kao kontinuum kojega su ulazni podaci o čvrstoći i deformabilnosti jednaki u svim smjerovima, a pomoću njih se definira tvorbeni odnos medija: elastičan, elasto-plastičan itd.
- *diskontinuum*: stijenska se masa predstavlja kao diskontinuum a pažnja se u stadiju projektiranja

najviše posvećuje karakterizaciji stijenskih elemenata, pukotinama u stijeni i diskontinuitetima. Pri modeliranju se koristi pristupom prema kojemu se u obzir uzima blokovska struktura analiziranog sustava. Veza između nekog bloka i susjednih blokova može se ostvariti s pomoću pukotina. Zanimljivost ovog pristupa jest u mogućnosti analiziranja osnovnih ponašanja stijenske mase, jer se u zoni kontakta mogu događati relativni pomaci proizvoljne veličine.

Ovdje se uspoređuju metode modeliranja - uključujući i modeliranje kontinuuma i diskontinuum - koje su primijenjene u rasjednoj zoni u tunelu koji se kopa tunelskom krticom (TBM). O tome je dobro konzultirati rad [1].

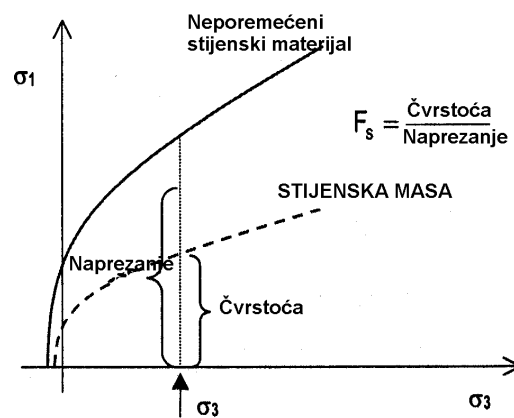
2 Osnovni podaci

2.1 Odnos između modeliranja kontinuuma i diskontinuum

2.1.1 Modeliranje kontinuuma

U tunelogradnji je za modeliranje kontinuuma nužno simulirati odziv stijenske mase na iskop, a to se obavlja uvođenjem jednakog kontinuuma. Najjednostavniji način za rješavanje tog problema, a on je danas uglavnom potpuno usvojen, sastoji se u reduciranju svojstava prirodne stijene na svojstva stijenske mase s pomoću empirijski definiranih odnosa poput onih koje predlažu Hoek i Brown [14].

Ako se za opisivanje ponašanja stijenske mase uporabljuje Hoek-Brownov kriterij, tada se na samom početku postupka reduciranja trebaju definirati parametri prirodnoga stijenskog materijala kao npr. σ_{ci} (jednoosna tlačna čvrstoća) i m_i (konstanta materijala ovisna o svojstvima stijene), i to na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem jednoosne i troosne čvrstoće u laboratoriju.



Slika 1 Hoek-Brownovi kriteriji sloma za prirodni stijenski materijal i stijensku masu. Ilustracija postupka reduciranja i definicija faktora sigurnosti.

Nakon toga se mogu procijeniti parametri stijenske mase kao što su m_b i s_b (konstante stijenske mase prema Hoek-Brownovu kriteriju) ili c i ϕ (kohezija i kut trenja stijenske mase), i to uspostavljanjem dobro poznatih korelacija (prema stupnju poremećenosti stijene koji varira ovisno o vrsti stijene i metodi iskopa) s najčešće korištenim indeksima stijene (a to su npr. krnji Q ili RMR, ili pak GSI) (slika 1.).

Sljedeći korak u pristupu modeliranja kontinuuma sastoji se u usvajanju odgovarajućih konstitutivnih odnosa koji vrijede za stijensku masu. Iako se obično rabi linearna elastičnost, mogu se primjenjivati i konstitutivne jednadžbe za nelinearnu elastičnost. Ako se naglasak stavlja na progresivni slom stijenske mase, tada se trebaju primjenjivati elastoplastični modeli jer se na taj način može opisati "nakon-vršni" odziv (nakon postizanja vršne čvrstoće). Često rabljena funkcija popuštanja odgovara Hoek-Brownovu kriteriju sloma:

- odziv stijenske mase je elastičan ako je naponsko stanje unutar granica određenih funkcijom popuštanja;
- odziv stijenske mase je plastičan kada je naponsko stanje dostatno za postizanja funkcije popuštanja.

Broj "nakon vršnih" odziva koji se mogu pretpostaviti ovisi o kakvoći stijenske mase. Svojstva prikazana na slici 2. vrlo se često rabe za rješavanje problema koji se odnose na gradnju tunela [14]. Imamo tri slučaja:

a) *Vrlo loša kakvoća stijenske mase*

Ponašanje stijenske mase adekvatno je opisano ako pretpostavimo da je njezino ponašanje savršeno plastično, što znači da se deformacija nastavlja pri konstantnoj razini napona te da se slom koji upravo nastaje ne može povezati s bilo kakvom promjenom obujma.

b) *Prosječna kakvoća stijenske mase*

Logično se može pretpostaviti da do deformacijskog omekšanja dolazi usporedo sa smanjenjem čvrstoće stijenske mase zbog prijelaza iz prirodnog u razlomljeno stanje; stoga će se, nakon postizanja tog konačnoga "preostalog" stanja, deformacija događati pri konstantnoj razini napona.

c) *Vrlo dobra kakvoća stijenske mase*

U takvom slučaju (čvrsta stijenska masa, kao npr. masivni granit i gnajs) pretpostavlja se da nakon prekoračenja čvrstoće stijenske mase dolazi do naglog pada čvrstoće. To se objašnjava značajnim širenjem stijenske mase jer se smatra da se ona ponaša kao medij s nultom kohezijskom čvrstoćom i s konačnim kutem trenja.

Kao što su prikazali Hoek i drugi u [13], - a treba vidjeti i rad [20] - u posljednjih dvadesetak godina razvijeno je

nekoliko računalnih metoda s pomoću kojih se dobivaju odgovarajuća rješenja problema na koje nailazimo u tunelogradnji, a u okviru pristupa koji se temelji na jednakom kontinuumu. Te se numeričke metode mogu podijeliti u dva razreda: metode rubnih elemenata i metode područja. Prve uključuju nekoliko vrsta metoda rubnih elemenata (BEM) i podrazumijevaju dodatnu podjelu granica iskopa na elemente, jer je unutrašnjost stijenske mase matematički predstavljena kao beskonačni kontinuum. Područne metode uključuju metode konačnih elemenata (FEM) i metode konačnih razlika (FDM) i kod njih se fizički problem modelira numerički, tj. s pomoću diskretizacije (podjele na zone ili elemente) problematičnog područja, tj. stijenske mase u kojoj će se obavljati iskop.

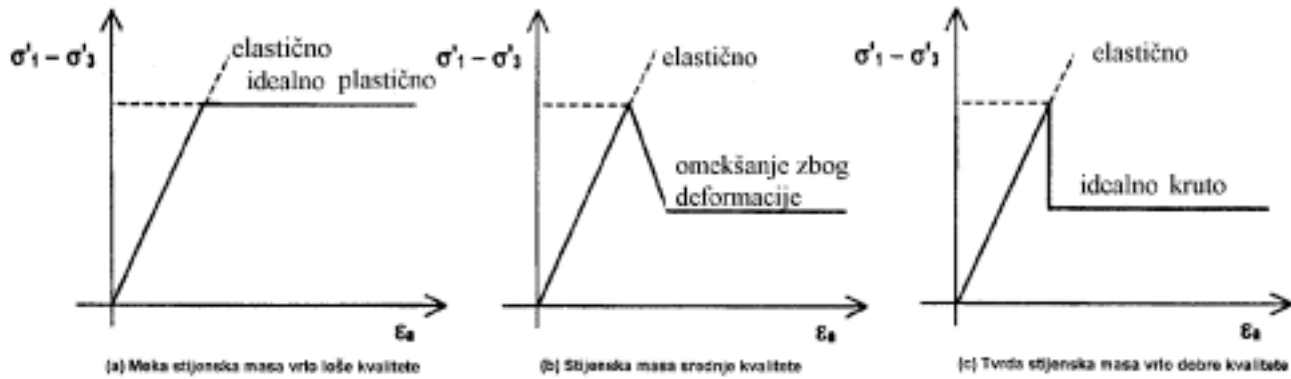
2.1.2 Modeliranje diskontinuuama

Usporedo sa sve većim prihvaćanjem činjenice da pukotine i diskontinuiteti u stijenskoj masi imaju ključnu ulogu u odzivu tunela na iskop, tj. da pukotine mogu dovesti do pojave nevezanih blokova blizu profila tunela pa tako i do lokalnog gubitka stabilnosti, da pukotine slabe stijenu i povećavaju zonu pomaka uzrokovanu iskopom, te da pukotine mijenjaju sustav protoka vode u blizini iskopa [19] danas se sve više pažnje posvećuje modeliranju diskontinuiteta u tunelogradnji, i to uglavnom primjenom kodova UDEC i 3DEC za dvodimenzionalne i trodimenzionalne modele diskontinuuama. Međutim, modeliranje diskontinuuama ne rabi se tako često kao metode bazirane na kontinuumu jer se smatra da je modeliranje diskontinuuama relativno nov i "još nedokazan" numerički postupak za analizu i projektiranje u području mehanike stijena [12].

U metodi izdvojenih elemenata (distinct element method) stijenska se masa predstavlja kao skup diskretnih blokova koji se mogu smatrati bilo "nedeformabilnima" ili "deformabilnima". Pukotine i diskontinuiteti prikazuju se kao veze između izdvojenih tijela. Osnovne su značajke ove metode [8] radi kojih je prikladna za određivanje bitnih mehanizama što karakteriziraju diskontinuirani medij:

- metoda dopušta odvajanje konačnih pomaka;
- metoda automatski priznaje nove kontakte u tijeku napredovanja proračuna.

Da bi se metoda izdvojenih elemenata mogla primijeniti pri rješavanju odgovarajućih problema u tunelogradnji, potrebno je razmotriti dva bitna pitanja, a to su podaci o geometriji pukotine i svojstva materijala koja se pripisuju pukotinama. Prvo pitanje odnosi se na uvođenje u model onih pukotina koje su najkritičnije za odziv stijenske mase. Drugo pitanje usko je povezano s potrebom da se u modelu pukotinama pripišu svojstva krutosti i čvrstoće stvarnih pukotina na terenu. Iako u odgovarajućoj

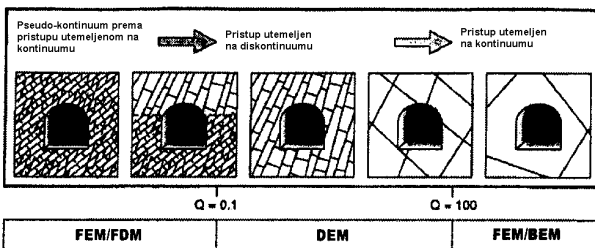


Slika 2 Naponsko-deformacijski odnosi za stijenske mase raznih kvaliteta [14]

literaturi postoje podaci koji mogu pomoći u odabiru odgovarajućih parametara [2], ovaj aspekt modeliranja još je uvijek povezan s mnogim teškoćama. Međutim, ovdje trebamo napomenuti da se značajna pomoć u dobivanju ulaznih podataka za dvodimenzionalno i trodimenzionalno modeliranje diskontinuumuma može dobiti na temelju indeksnog ispitivanja pukotina (vađenjem jezgara) i na temelju kartiranja terena [4, 5].

2.1.3 Rasprava

Pri rješavanju nekog problem u stadiju projektiranja, prvo treba odlučiti hoće li se za modeliranje ponašanja stijenske mase odabrati kontinuum ili diskontinuum. Ta se odluka može temeljiti na analizi predvidivog mehanizma (klizanje duž pukotina, otvorenost pukotina, rotacija i pomicanje blokova itd.) koji bi mogao utjecati na stabilnost tunela i na razmak između pukotina koji ovisi o veličini iskopa. Može se razmotriti predloženi raspon vrijednosti Q u kojem je modeliranje diskontinuumuma prikladnije od modeliranja kontinuumuma ($Q \cong 0,1 - 100$) kao što se može vidjeti na slici 3. [5].



Slika 3. Shematski prikaz područja za modeliranje diskontinuumuma prema vrijednosti Q [5]

Zaključci koji se mogu izvesti na osnovi dosadašnjeg iskustva i detaljnog proučavanja proračuna koji se ponekad primjenjuju u projektiranju tunela:

- Modeliranje izotropnog kontinuumuma češće se rabi kod modeliranja kontinuumuma, i to čak i u slučajevima kada je veličina blokova značajna u odnosu prema dimenzijama iskopa, ili kada je ponašanje stijenske mase izrazito anizotropno.

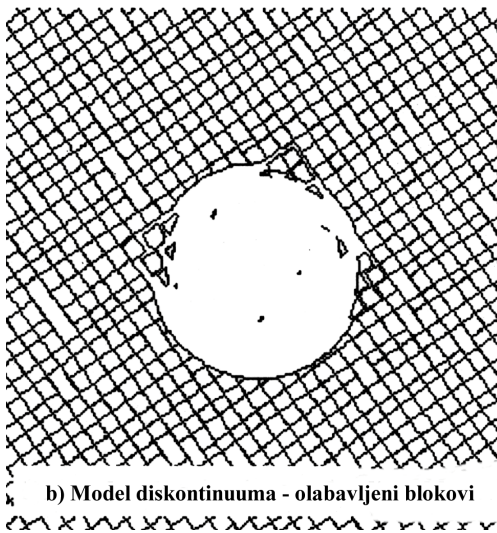
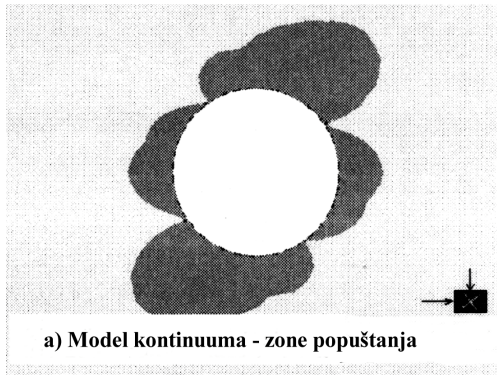
- Suviše često se pribjegava numeričkom modeliranju. Taj se postupak primjenjuje čak i kada nema dovoljno ulaznih podataka i spoznaja o projektu [20], ili kada su dimenzije planiranog iskopa takve da se takav postupak uopće ne smatra opravdanim.
- Čini se da do neopravdane primjene tih metoda dolazi zbog lakog pristupa računalnim kodovima, tj. zbog izrazite dostupnosti sofisticiranih metoda za proračunavanje. Ponekad se iskazuje zadovoljstvo zbog provedbe modela, bez obzira na to što su dobiveni rezultati u očitoj suprotnosti s empirijskim pravilima projektiranja i s logičnom inženjerskom prosudbom.

2.2 Valjanost modela diskontinuumuma

Iskustvo stečeno u primjeni numeričkog modeliranja u tehničkim strukturama, te potreba za usvajanjem sheme modeliranja koja je najprikladnija za analizu konkretnog problema, pokazuje da "je modeliranje komponenata, stijene, stijenskih pukotina i diskontinuiteta znatno logičnije i relevantnije od sadašnjih modela "crne kutije" koji se temelje na kontinuumu" [6]. Usporedba je na slici 4.

U vezi s primjenom modela diskontinuumuma u projektiranju tunela, može se postaviti pitanje složenosti modela koji se rabi radi sigurnosti da kritična svojstva konstrukcije nisu izostavljena iz analize [12]. S jedne strane teškoća jest u iznalaženju dostatnih geoloških podataka, dok se s druge strane pojavljuje i pitanje konfiguracije računala jer se često događa da potrebna konfiguracija prelazi mogućnosti korisnika.

Iz dosadašnjih iskustava proizlazi da se jedan od načina rješavanja ovog problema sastoji u primjeni modela diskontinuumuma zajedno s metodama za klasifikaciju stijenske mase a u kontekstu zajedničke kontrole očekivanog odziva tunela na iskop. Pošto se dokaže da je neki model prihvatljiv za dane uvjete stijenske mase, taj se model može poboljšavati i dodatno kontrolirati tijekom iskopavanja tunela. Kao oblik preliminarne provjere numeričkog modela može se rabiti skup uputa koje se daju u vezi s vrijednošću Q [6].



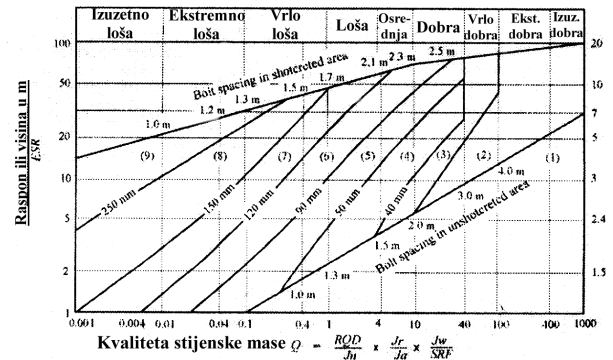
Slika 4. Usporedba slučaja pukotina karakterističnih za kontinuum (a) i rezultata modeliranja diskontinuuma (b) dobivenih analizom tipičnih mehanizama nestabilnosti oko tunela iskopanog metodom TBM u slaboj stijenskoj masi

Kategorije podgrada

Na temelju analize podataka s konkretnih projekata, Grimstad i Barton [11] izradili su dijagram prikazan na slici 5. koji omogućuje povezivanje vrijednosti indeksa Q sa stabilnošću i sa zahtjevima podgrađivanja podzemnih iskopa, a nakon dobivanja parametra kojeg oni nazivaju "jednakom dimenzijom". Taj parametar je raspon, promjer ili visina zida istog iskopa koji se dijeli s odgovarajućim numeričkim koeficijentom i stupnjem sigurnosti koji se traži od instaliranog podgradnog sustava da bi se održala stabilnost iskopa.

Ovisno o sustavu Q , dostupne su i dodatne upute [3] koje omogućuju ocjenjivanje određenog broja dodatnih parametara koji se odnose na stabilnost tunela i zahtjeve glede podgrađivanja:

- najveći raspon bez podupiranja,
- vertikalni pritisak na trajnu podgradu,
- dužina sidara.



Slika 5. Procjene podgradnih kategorija osnovane na indeksu kvalitete tunela Q [11]

Deformacije tunela [5]

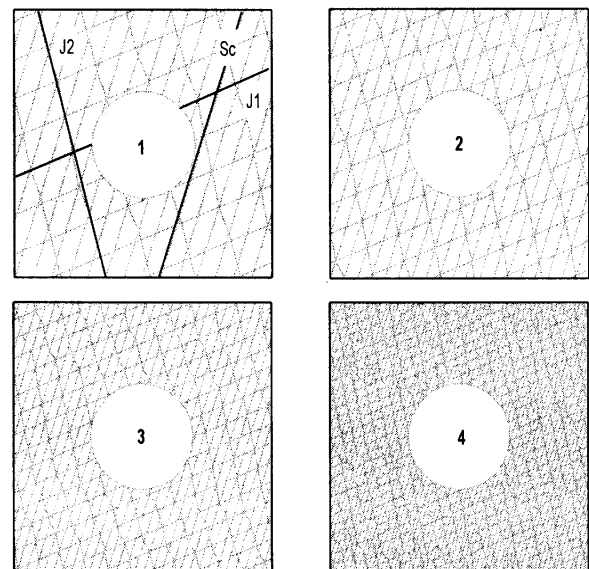
$$\text{vertikalna: } \Delta v = \frac{RASPON}{100 \cdot Q} \sqrt{\frac{\sigma_v}{\sigma_c}} \quad [\text{mm}]$$

$$\text{horizontalna: } \Delta h = \frac{VISINA}{100 \cdot Q} \sqrt{\frac{\sigma_h}{\sigma_c}} \quad [\text{mm}]$$

gdje su vrijednosti σ_v i σ_h (vertikalna i horizontalna komponenta napona *in situ*) te σ_c (jednoosna tlačna čvrstoća prirodnog stijenskog materijala) dane u usklađenim jedinicama (MPa). Vrijednosti raspon i visina (širina i visina tunela) iskazane su u mm.

2.2.1 Primjeri

U primjeru će se razmotriti tunel promjera 4,75 m kao tipičan problem za provjeru modela diskontinuuma s pomoću *Kodeksa izdvojenih elemenata* UDEC [15]. Namjera je bila ispitati utjecaj uvjeta stijenske mase s pomoću indeksa Q u poremećenoj zoni oko tunela.



Slika 6. Četiri modela UDEC s različitim vrijednostima Q : $Q_1 = 8,5$; $Q_2 = 4,1$; $Q_3 = 1,9$; $Q_4 = 0,67$

U istraživanju su uporabljena četiri modela (slika 3.). Uvedena su tri skupa trajnih diskontinuiteta dimenzija 20 x 20 m (S_c - škriljavost, pukotine J1, J2) s parametrima koji omogućuju dobivanje raspona vrijednosti Q od 8,5 za model br. 1 do 0,67 za model br. 4. Za sve je modele pretpostavljeno da početno naponsko stanje iznosi: σ_v (vertikalni napon) = 16,2 MPa, σ_h (horizontalni napon) = 4 MPa, što je naponsko stanje sile teže na dubini od oko 600 m, uz pretpostavljeni naponski koeficijent (σ_h/σ_v) od 0,25. Za svaki sustav prikazan na slici 6. pukotinski razmaci su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Razmak pukotina za 4 modela UDEC

Model	Škriljavost	Razmak pukotina [m]	
		J1	J2
1	0,8	1,6	2,0
2	0,6	1,2	1,5
3	0,4	0,8	1,0
4	0,2	0,4	0,5

U svim su modelima blokovi kamena deformabilni. Pretpostavljeno je da je prirodna stijena (gnajs) elastoplastični materijal koji se ponaša u skladu s Mohr-Coulombovim kriterijem popuštanja. Zadana su svojstva:

- modul elastičnosti $E = 60$ GPa
- Poissonov koeficijent $\nu = 0,25$
- kohezija $c = 30$ MPa
- kut trenja $\phi = 33^\circ$.

Smatra se da su diskontinuiteti Mohr-Coulombove pukotine, to jest do su to elastične i savršeno plastične pukotine te da im je normalna krutost $K_n = 40$ GPa/m i posmična krutost $K_s = 4$ GPa/m. Za koheziju se uvijek uzima vrijednost nula, a kut trenja ϕ iznosi 58° za model 1, 38° za model 2, 22° za model 3 i 11° za model 4, i to za škriljavost i za pukotine.

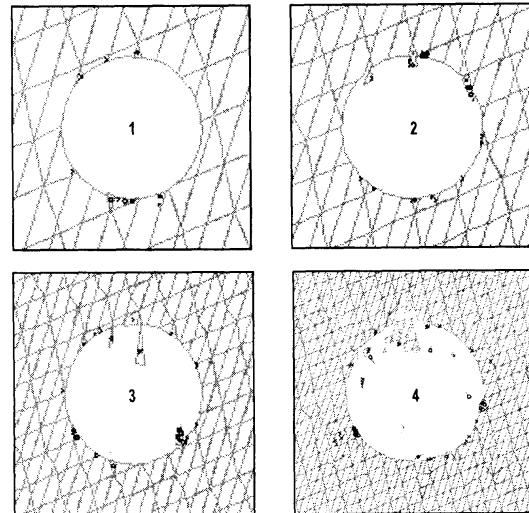
Tunel bez podgrade

Prva serija proračuna obavljena je za stanje bez podgrade, a poremećena je zona definirana kako slijedi [19]:

- zona sloma, u kojoj nevezani kameni blokovi padaju u tunel,
- otvorena zona, u kojoj dolazi do otvaranja pukotina,
- zona smicanja, u kojoj dolazi do određenog pomaka pukotina (3 mm) zbog smicanja.

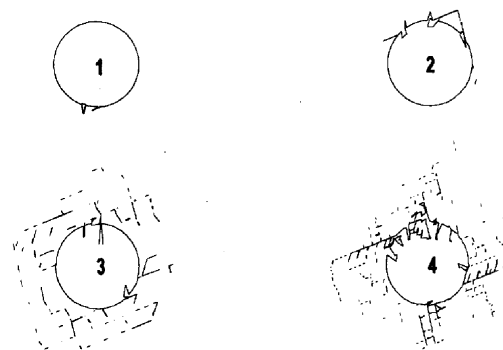
Rezultati dobiveni za 4 modela prikazani su na slikama od 7. do 9. na kojima je opisana zona sloma, otvorena zona i zona smicanja u području oko tunela. Može se uočiti sljedeće:

- zone smicanja izračunane za područje oko tunela pokazuju da je model 1 stabilan te da na ostalim modelima, počevši od 2 pa do 4, stanje postaje sve kritičnije;

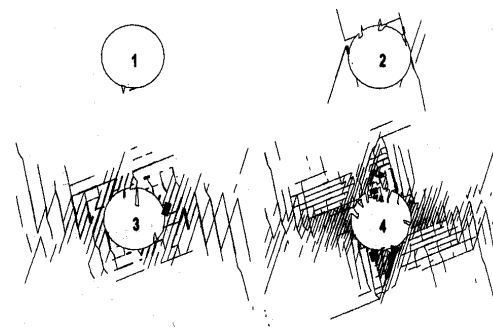


Slika 7. Blokovi koji su popustili i nevezani blokovi oko tunela, za modele od 1 do 4.

- otvorena zona i zona smicanja rastu usporedo s padom kvalitete stijenske mase, i to počevši od modela 1 pa do modela 4, što je u skladu s ponašanjem u posmičnim zonama,
- čini se da se dobiveni rezultati podudaraju s predviđenim kategorijama podgrađivanja koje su prikazane na slici 5., a prema kojima podgrada uopće nije potrebna samo na tunelu koji je simuliran s pomoću modela 1, dok složenost potrebnih mjera podgrađivanja raste od modela 2 prema modelu 4.



Slika 8. Otvorene zone oko tunela za modele od 1 do 4



Slika 9. Zone smicanja oko tunela za modele od 1 do 4

Tuneli s podgradom

Kao izravna posljedica opisanih analiza, te prema zahtjevima za podgrađivanje iz slike 5., u modelima od 2 do 4 uvedene su mjere podgrađivanja prema tablici 2.

Tablica 2. Mjere podgrađivanja

Model	Broj sidara	Dužina sidra [m]	Razmak između sidara ⁽¹⁾ [m]	Debljina torkreta [cm]
2	5	2,4	1,70	4,0
3	9	3,0	1,40	8,0
4	11	3,0	1,25	11,5

⁽¹⁾ Predviđen je kvadratni raspored sidara

Pri simuliranju sidara primijenjena je opcija CABLE iz kodeksa UDEC koja omogućava potpuno vezivanje sidra sa stijenskom masom. Torkret je u model unesen opcijom STRUCT kojom se pretpostavlja da je torkret zapravo niz greda spojenih sa stijenskom masom.

U okviru prve procjene sposobnosti predviđanja modela diskontinuuuma UDEC za tunele s podgradom, vertikalni i horizontalni pomaci Δv i Δh dobiveni opisanim empirijskim formulama na bazi Q uspoređuju se s rezultatima proračuna UDEC prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Vertikalni i horizontalni pomaci

Model	Δv [mm]		Δh [mm]	
	procjena	proračun	procjena	proračun
2	4,5	5,0	2,6	2,6
3	9,2	10,2	4,7	5,3
4	26,0	25,1	13,3	12,9

3 Analiza konkretnog slučaja

3.1 Uvodni prikaz

U ovoj se analizi obrađuju problemi koji su se dogodili 11. rujna 1997. godine na st. 2360 m kada se tunelska krtica (TBM) privremeno zaglavila u rasjednoj zoni pri

probijanju tunela F2 koji je jedan od glavnih elemenata projekta hidroelektrane Pont Ventoux - Susa u dolini Susa pokraj Torina. Iskop ovog tunela (promjera 4,75m) obavljen je otvorenom konfiguracijom TBM u kvarcnom mikašistu, a visina nadsloja dosegala je i do 800 m (slika 10.).

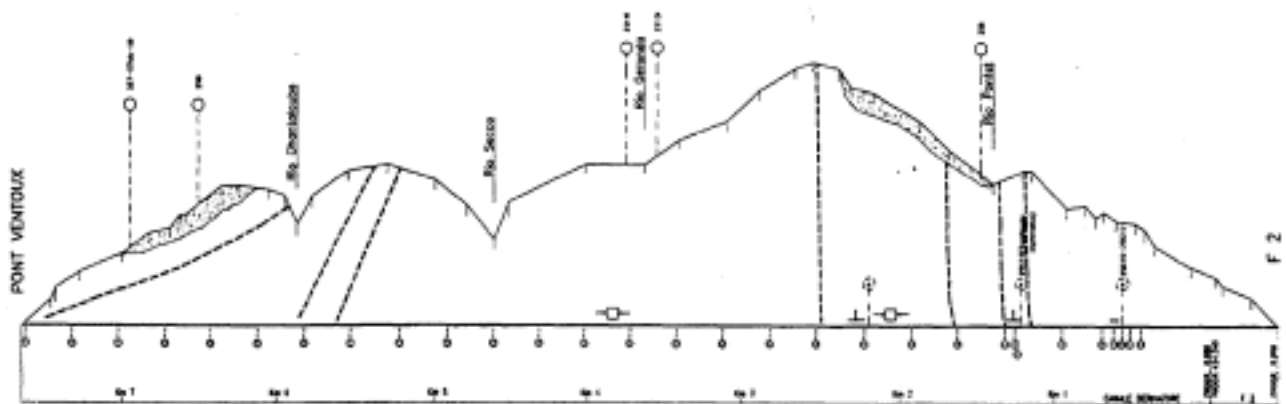


Slika 11. Prikaz dijela tunela F2 u kojem je gnajnsni materijal bio uglavnom dobre kvalitete.

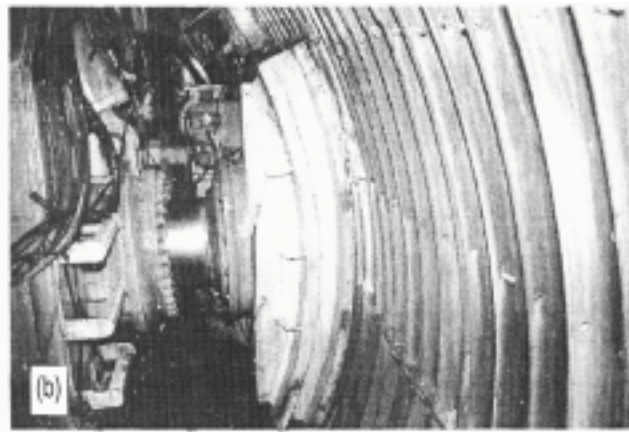
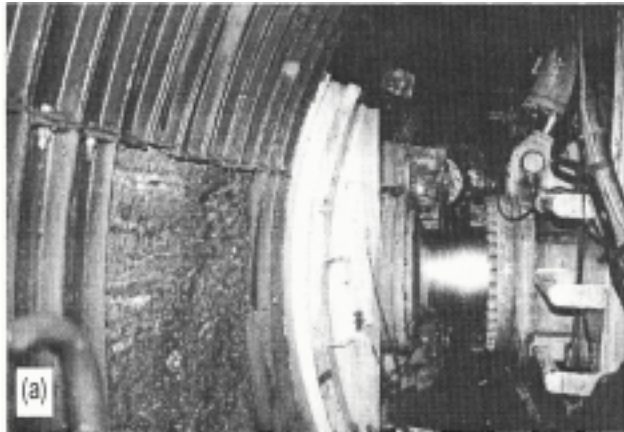
Nakon prvih 1800 m tunela, gdje su uvjeti stijenskog iskopa bili uglavnom dobri i gdje su vrijednosti RMR varirale od 65 do 75 (slika 11.), počeli su se pojavljivati problemi koji su se povećavali kako su se graditelji približavali rasjednoj zoni. Zbog izuzetno teških problema, bilježe se velika zakašnjenja u odnosu prema planiranim rokovima. Na slici 12. su dvije fotografije područja iza stacionaže 2360 m gdje rasjed koji se razmatra u ovom radu siječe tunel i bitno usporava radove.

3.2 Opis problema prenaprezanja u st. 2360 m

Na slici 13. pojednostavljeni je prikaz uvjeta na čelu iskopa u trenutku kada se krtica privremeno zaglavila zbog prenaprezanja i pomicanja stijenskog bloka za 25 cm na desnoj strani iskopa. Kvarcni mikašist odlikuje se prisutnošću triju do četiriju pukotinskih sustava, a to uključuje i listastu strukturu. Na bazi podataka dobive-

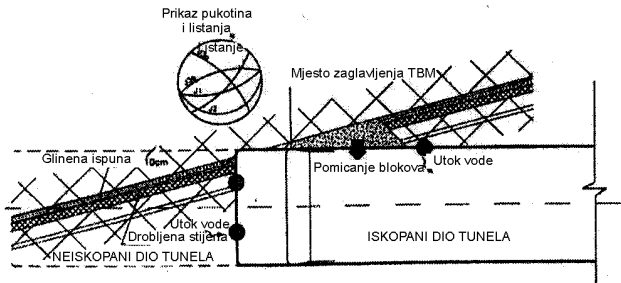


Slika 10. Tunel F2: Pont Ventoux - Clarea.



Slika 12. Prikaz tunela F2: (a) lijeva kalota i (b) desna kalota, gdje su uvjeti stabilnosti postali izuzetno teški pa su zbog toga kontinuirano postavljane obložne ploče

nih geološkim kartiranjem, koje je obavio geolog Pont Ventoux [18] nakon što se TBM uspio probiti nekoliko metara dalje od dijela u kojem se zaglavio, ustanovljeno je da postoje barem dva subparalelna diskontinuiteta, od kojih drugi ima glinenu ispunu s kršjem, a otvor varira od nekoliko centimetara pa do više od jednog decimetra.



Slika 13. Prikaz uvjeta na čelu iskopa

Uvjeti stijenske mase ocijenjeni su u dužini od 7 m, tj. između stacionaža st. 2349 m i st. 2356 m, pri čemu je indeks RMR iznosio 31. Detaljnijim ispitivanjem vrijednosti Q prema [4], koje je provedeno u zoni od st. 2350 m do st. 2360 m, dobiven je izuzetno velik raspon vrijednosti Q i to od otprilike 0,007 ("izuzetno loše" - samo lokalno) pa do 0,3 ("loše"), s tim da je srednja ponderirana vrijednost svih mjerenja iznosila oko 0,05. Temperatura vode koja teče kroz pukotine iznosi 20°. Pritisak vode nije mjeren ali se smatra da, imajući na umu visinu nadsloja od 650 m, ne može biti veći od oko 6 do 7 Mpa (izvan područja tunelske odvodnje).

3.3 Čvrstoća stijenske mase

Na čvrstoću stijenske mase u razmatranoj dionici najviše utječu uglavnom "loši" uvjeti i ograničena posmična čvrstoća duž diskontinuiteta. U tablici 4. su tipična svojstva čvrstoće izvedena iz troosnog ispitivanja uzoraka stijenke.

Tablica 4. Tipična svojstva čvrstoće

Jednoosne tlačne čvrstoće [MPa]		Hoek-Brownove empirijske konstante	
$\sigma_{c,p}$	$\sigma_{c,r}$	$m_{i,p}$	$m_{i,r}$
144	77	7,0	6,1

Za stijensku masu vrlo dobre kvalitete koja je prisutna u velikom dijelu tunela (slika 11.), tipična svojstva stijenske mase mogu se odrediti na temelju geološkog indeksa čvrstoće, kako slijedi:

- prirodna čvrstoća stijene $\sigma_{ci} = 144$ MPa
- Hoek-Brownova konstanta $m_i = 7,0$
- geološki indeks čvrstoće $GSI = 70$
- Hoek-Brownova konstanta $m_b = 2,4$
- Hoek-Brownova konstanta $s = 0,02$
- tlačna čvrstoća stijenske mase $\sigma_{cm} = 27,2$ MPa
- modul deformacije $E_m = 35,0$ GPa

3.4 Uvjeti napreznja in situ

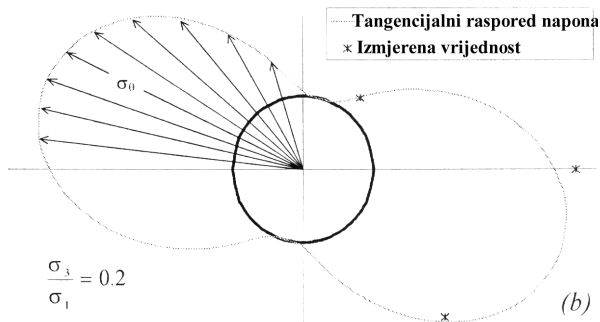
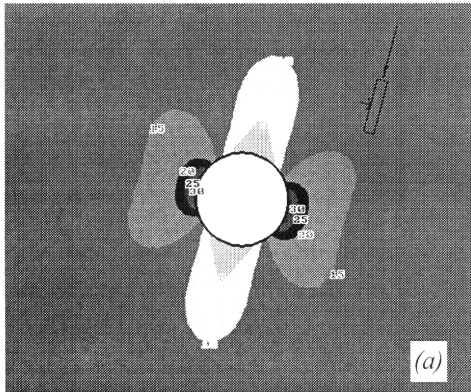
Zbog visokog nadsloja i blizine boka doline, što utječe na pojavu deformacija i tankih ploča u izoliranim zonama po dužini tunela, preporučeno je da se napreznje izmjeri s pomoću pokusa s tlačnim jastukom i hidrauličkim pokusima za određivanje sitnih lomova. Za sada su dostupni samo podaci dobiveni za mjerenja tlačnim jastukom po presjeku tunela na st. 950 m, gdje visina nadsloja iznosi otprilike 400 m, a prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Podaci o izmjerenim napreznjima tlačnim jastukom

Zona tlačnog jastuka	Kut u odnosu na horizontalnu os [°]	Pritisak tlačnog jastuka [MPa]
M1	0	34,8
M2	+50	3,3
M3	-45	23,5

Na osnovu analize koncentracije napona u linearno elastičnim uvjetima oko tunela metodom konačnih elemenata i kodeksa Phase² [9], kako je to prikazano na slici 14., procijenjeno je da su početni naponi u ravnini poprečno na os tunela:

- najveći glavni napon $\sigma_1 = 13 \text{ MPa}$
- najmanji glavni napon $\sigma_3 = 2,6 \text{ MPa}$
- kut σ_1 u odnosu prema vertikalnoj osi $\theta_1 = 15^\circ$



Slika 14. Konturni prikaz najvećega napreznja(a), izračunana i izmjerena tangencijalna napreznja (b)

3.5 Modeliranje kontinuuma

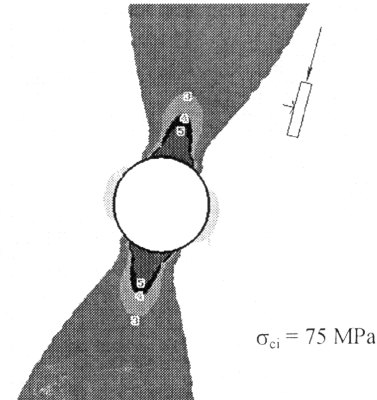
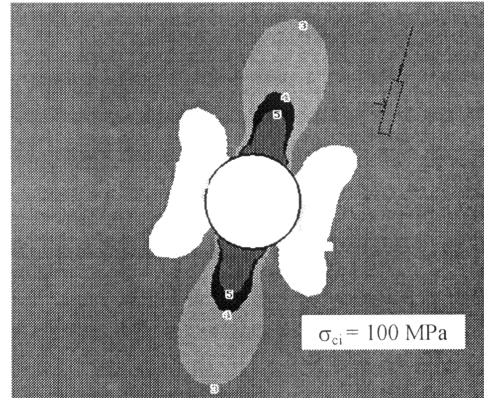
3.5.1 Pristup sa $m = 0$

Da bi se odredilo u kojoj se mjeri modeliranjem kontinuuma može na zadovoljavajući način interpretirati nestabilnost tunela, prvo su obavljene numeričke analize za određivanje uvjeta stabilnosti, i to s pomoću kriterija konstantnoga devijatorskog napreznja koje je predloženo u [16].

Pretpostavljeno je da su na promatranom profilu (st. 2360 m) početna napreznja σ_1 i σ_3 proporcionalno veća i to zbog većeg nadsloja (650 m). Osim toga, pretpostavljeno je da koeficijent napreznja K_0 (odnos najmanjeg prema najvećem napreznju - σ_3/σ_1) u ravnini profila tunela iznosi 0,2, tj. kao i u profilu u kojem su obavljena mjerenja tlačnim jastukom.

Ove su analize obavljene s pomoću kodeksa Phases² i Hoek-Brownova kriterija za razne vrijednosti σ_{ci} i za $s = 1$. Stabilnost tunela ocijenjena je izračunavanjem kontura faktora čvrstoće na način prikazan na slici 15. Pretpostavlja se da će stijenska masa unutar konture faktora čvrstoće (SF ($m=0$) ≈ 1) biti nestabilna, osim ako nije dobro poduprta.

Iz navedenih pojednostavljenih proračuna (model linearno elastičnog kontinuuma, bez uzimanja u obzir

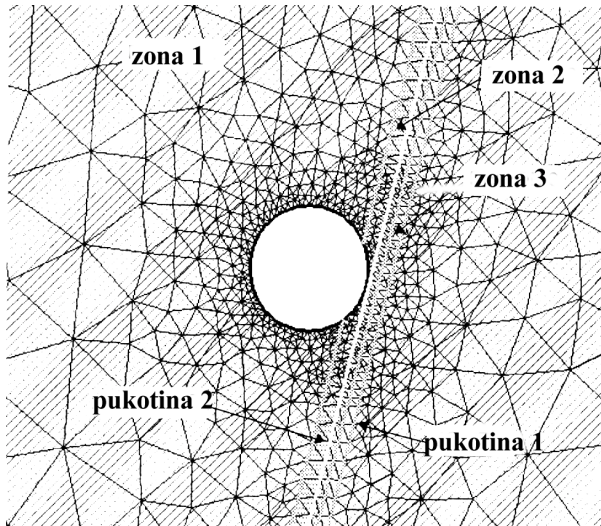


Slika 15. Konture faktora čvrstoće određene pristupom $m = 0$ za tunel u st. 2360 m ($\sigma_{ci} = 100, 75 \text{ MPa}$).

hidrostatičkog potencijala itd.), može se zaključiti da u bočnim kalotama tunela dolazi do lokalnog sloma koji se produbljuje prema unutrašnjosti stijenske mase usporedo sa smanjenjem jednoosne tlačne čvrstoće neporemećenog mikašista od 100 MPa do 75 MPa. Ako čvrstoća stijene varira od 100 do 75 MPa, to bi moglo značiti da ne možemo isključiti mogućnost pojave lokalnih pločastih nestabilnosti pod uvjetima jako anizotropnog režima napona u tunelu, čija se prisutnost vidi po vrijednosti K_0 koja iznosi 0,2.

3.5.2 Elastično-kruto-plastični model

U prethodnim je proračunima razmatrano prenapreznje stijenske mase po obodu tunela, ali se pritom nije u obzir uzimala prisutnost diskontinuiteta. Stoga je odlučeno da se isti problem nestabilnosti analizira uvođenjem tih dodatnih parametara u numerički model.



Slika 16. Detalj modela FEM s prikazom različitih svojstava materijala i pukotina

Kao što možemo vidjeti na slici 16., modelom su obuhvaćena dva diskontinuiteta koji se nalaze u blizini desnog zida tunela te koji se pružaju u pravcu tunela. Da bi se u obzir uzela poremećenost stijenske mase zbog pojave pukotina u blizini diskontinuiteta te kod očito masivnije stijene u lijevoj kaloti gdje je listanje i prenaprezanje znatno manje izraženo, donesena je odluka da se u skladu s Hoek-Brownovim kriterijem sloma u model unesu tri različite regije sa svojstvima materijala prikazanim u tablici 6.

Tablica 6. Odabrana svojstva materijala modela

Svojstvo	Područje (slika 16.)		
	1	2	3
E_m [GPa]	35	7,5	18
ν_m [-]	0,25	0,35	0,35
σ_{ci} [MPa]	150	150	150
m_{bp} [-]	2,4	0,74	1,68
s_b [-]	0,036	0,002	0,012
m_{br} [-]	1,2	0,74	1,00
s_r [-]	0,0087	0,002	0,001

σ_{ci} - čvrstoća neporemećene stijene;
 m_{bp} , m_{br} , s_b , s_r - Hoek-Brownove konstante;
 E_m - modul deformacije stijenske mase;
 ν_m - Poissonov koeficijent.

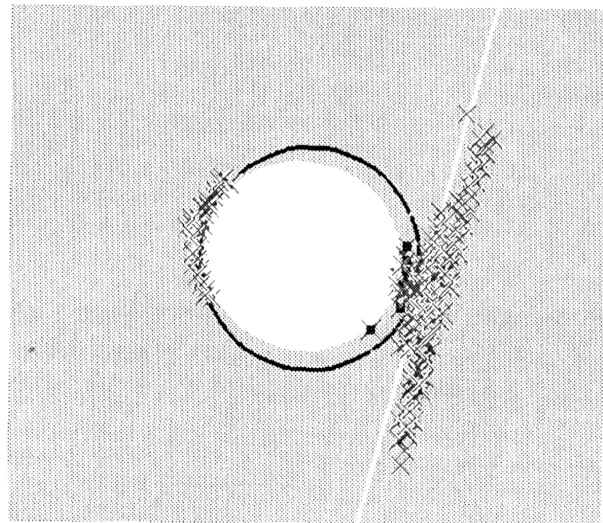
Stijenska masa oko tunela zadana je kao plastična, a elastična kruta plastična opcija iz Phase² aktivirana je zadavanjem konstanta za vršnu čvrstoću (m_{bp} , s_b) koja se od preostale čvrstoće (m_{br} , s_r) razlikuje samo kod masivnije stijenske mase. Vrijednosti su odabrane na temelju osobne prosudbe da bi se tako u obzir uzeli bolji uvjeti stijenske mase na bočnom zidu. Diskontinuiteti su uvedeni u model opcijom "pukotine" iz Phase², a svojstva pukotina su prikazana u tablici 7.

Tablica 7. Svojstva pukotina

Svojstvo	Pukotina (slika 17.)	
	1	2
K_n [MPa/m]	1250	1250
K_s [MPa/m]	125	125
h [m]	0,08	0,02
c [MPa]	0	0
ϕ [°]	22	22

K_n , K_s - normalna i posmična krutost
 h - otvorenost pukotine
 c - koherentnost pukotine
 ϕ - kut trenja pukotine

Na slici 17. vidimo udubljenje zona sloma na desnoj i lijevoj strani prema predviđanjima iz elastično-kruto-plastičnog modela. Prema toj analizi udubljenje je značajnije na desnoj strani što je u skladu sa stvarnom situacijom u tunelu gdje je do sloma zbog naprezanja i do pomaka blokova došlo u tijeku napredovanja radova, zbog čega se tunnelska krtica i zaglavila.



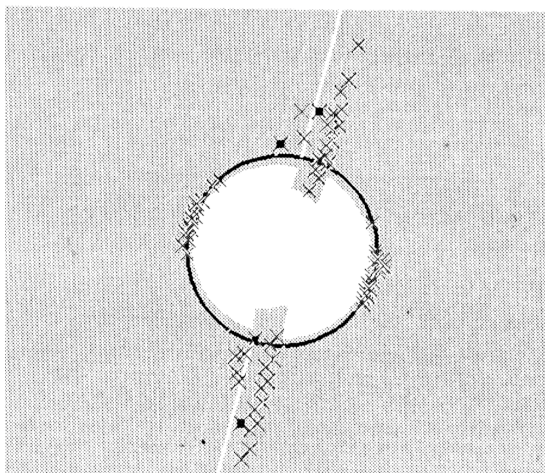
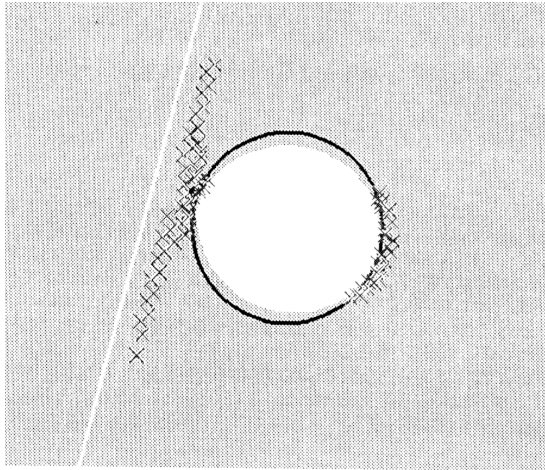
Slika 17. Proračun zona popuštanja oko tunela i deformirane mreže obavljene s pomoću elastičnog kruto-plastičnog konstitutivnog modela

Možemo zaključiti da konstrukcijski diskontinuiteti u blizini tunela uvelike utječu na stabilnost tunela. To je vrlo značajan aspekt kojemu treba pridodati i utjecaj visokog nadsloja i izuzetno anizotropni režim napona u sadašnjoj situaciji, te utjecaj vode koji nije uključen u numeričku analizu.

3.5.3 Pouke iz projekta

Kod budućih ispitivanja geoloških i hidrogeoloških uvjeta u zoni koja prati trasu tunela treba predvidjeti prisutnost gline ispunjene diskontinuitetima nepovoljnog usmjerenja, što je ovdje slučaj isto kao i visok hidrostatski potencijal.

Dakle, pouke koje smo iz opisanog primjera izvukli svakako valja uzeti u obzir pri određivanju interaktivnog ponašanja u području između stijenskog okruženja i TBM. Zapravo, uvjeti izvođenja tunelskih radova mogli bi postati još teži jer se tunel buši u stijenskoj masi koja je već sada pod velikim naponom, a očekuje se da će visina nadsloja porasti do najviše 800 m.



Slika 18. Proračun zona popuštanja oko tunela i deformirane mreže obavljen za dva moguća geološka stanja duž osi tunela

Imajući to na umu, isto kao i činjenicu da tunelska krtica (TBM) buši po zakrivljenoj putanji, korisno bi bilo iskoristiti sposobnost predviđanja elastičnog kruto plastičnog modela te analizirati dva moguća stanja:

- kad se diskontinuiteti pružaju paralelno s osi tunela, u tjemenu;
- kad su diskontinuiteti na lijevom boku.

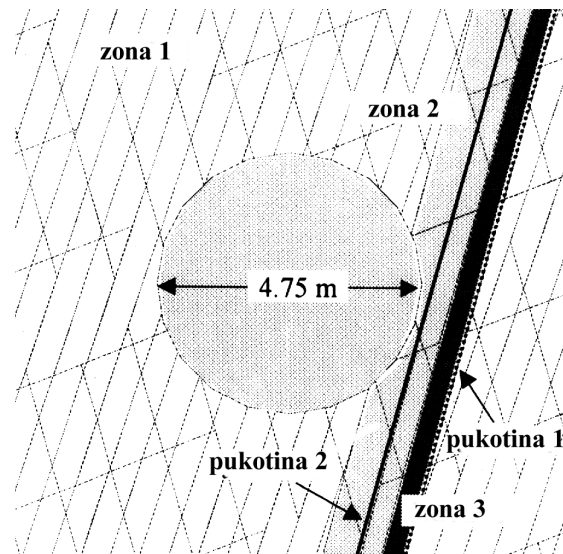
Proračuni su obavljeni uz nepromijenjene pretpostavke glede svojstava materijala i pukotina, te naponskog stanja *in situ*. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 18. gdje se vidi iskaz zona popuštanja oko tunela i deformirana mreža.

3.6 Modeliranje diskontinuuama

Znajući da diskontinuiteti (glavni diskontinuiteti i pukotine) imaju glavnu ulogu u razvoju nestabilnosti tunela, problem je analiziran i s pomoću diskontinuiranih modela, s dvodimenzionalnim kodeksom izdvojenih elemenata, tj. s UDEC-om [15]. Stijenska masa oko tunela predstavljena je sa dva diskontinuirana modela, i to: determinističkim modelom i modelom mreže diskretnih svojstava.

3.6.1 Deterministički model

Pretpostavlja se da kroz stijensku masu prolaze tri niza pukotina i da je struktura listasta. U model su unesene različite vrijednosti glede razmaka, stupnja postojanosti i posmične čvrstoće da bi se tako simulirali uvjeti stijenske mase izvan zone rasjeda (slika 19.). Opet je pretpostavljeno da su pukotine Mohr-Coulombove pukotine, tj. da su to elastične i savršeno plastične pukotine. Blokovi su tretirani kao elastično-plastičan materijal koji se ponaša u skladu s Mohr-Coulombovim kriterijem. U tablicama 8. i 9. daju se svojstva kamenih blokova i pukotina za zone sa slike 19.



Slika 19. Detalj determinističkog modela UDEC na kojem se vide područja raznih materijala i pukotine

Tablica 8. Svojstva materijala za deterministički model

Svojstvo	Zona		
	1	2	3
E_m [GPa]	60	30	10
ν_m [-]	0,25	0,35	0,35
c [MPa]	34	6,0	2,8
ϕ [°]	38	36	34
c - koherentnost			
ϕ - kut trenja			
E_m - modul deformacije stijenske mase			
ν_m - Poissonov koeficijent			

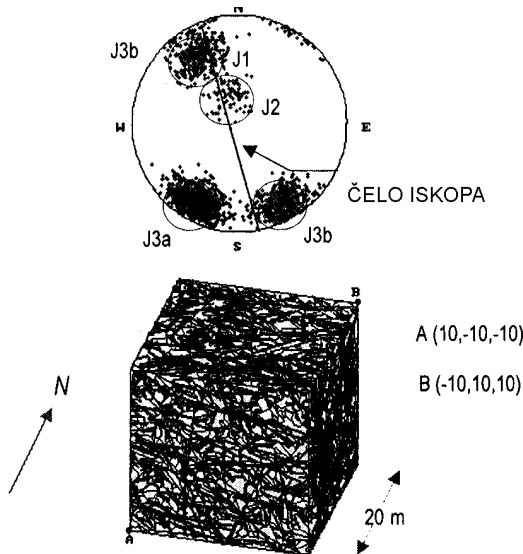
Tablica 9. Svojstva pukotina za deterministički model

Svojstvo	Zona			Pukotina
	1	2	3	1-2
K_n [GPa/m]	40	5×10^{-3}	10×10^{-3}	$1,25 \times 10^{-3}$
K_s [GPa/m]	4	5×10^{-4}	10×10^{-4}	$1,25 \times 10^{-4}$
c [MPa]	0,1	0	0	0
ϕ [°]	33	22	22	22

K_n, K_s - normalna i posmična krutost
 c - koherentnost pukotine
 ϕ - kut trenja pukotine

3.6.2 Model mreže diskretnih svojstava (Discrete Feature Network - DFN)

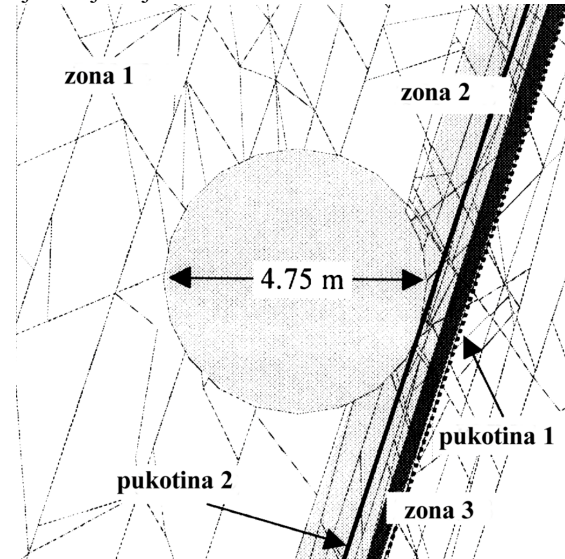
Izrađen je i model mreže diskretnih svojstava (DFN), i to na temelju postupaka ugrađenih u FracManov kodeks [10]. Rezultati geološkog kartiranja na desnoj strani tunela bili su osnova za određivanje ulaznih podataka koji se odnose na usmjerenje, veličinu i stupanj razlomljenosti skupova pukotina J1, J2 i J3 a, b (slika 20.). Oni su superponirani listastom strukturom i diskretnim svojstvima dvaju opisanih subparalelnih diskontinuiteta. Tako dobiveni trodimenzionalni volumen prikazan je na slici 20. na kojoj se također vide skupovi pukotina dobiveni FracManovim kodeksom.



Slika 20. Trodimenzionalni model mreže diskretnih svojstava izrađen FracManovim kodeksom, s iskazom skupova pukotina. Ovaj prikaz je tipičan za stijensku masu koju nalazimo u desnoj kaloti tunela

Model UDEC dobiven je proračunom poprečnog presjeka ortogonalnog na os tunela s pomoću trodimenzionalne mreže diskretnih svojstava iskazane na slici 20. Ta mreža dvodimenzionalnih lomova ne može se izravno uključiti u proračun putem UDEC-a jer lomovi trebaju biti dobro povezani, tj. kodeksom ne mogu tretirati izo-

lirani lomovi. Istovremeno je trebalo provjeriti valjanost modela, uzimajući u obzir uvjete stijenske mase oko tunela. To je obavljeno povećavanjem veličine blokova iz prvobitnog modela dvodimenzionalne mreže, i to u tjemenu i u lijevoj kaloti, da bi se u obzir uzelo općenito bolje stanje stijenske mase u tim zonama.



Slika 21. Detalj modela UDEC-DFN na kojem se vide područja raznih materijala i pukotine

Uz komandu "Zadajte rub", koja se rabi u kodeksu UDEC, upotrebljava se i postupak kojim se ukidaju svi tragovi loma koji se nalaze izvan zadane granične dužine. Konačno stanje tipičnog modela prikazano je na slici 21. Što se tiče opisanoga determinističkog modela, pretpostavljeno je da se pukotine ponašaju kao Mohr-Coulomb-ove pukotine dok su blokovi tretirani kao elastoplastičan materijal.

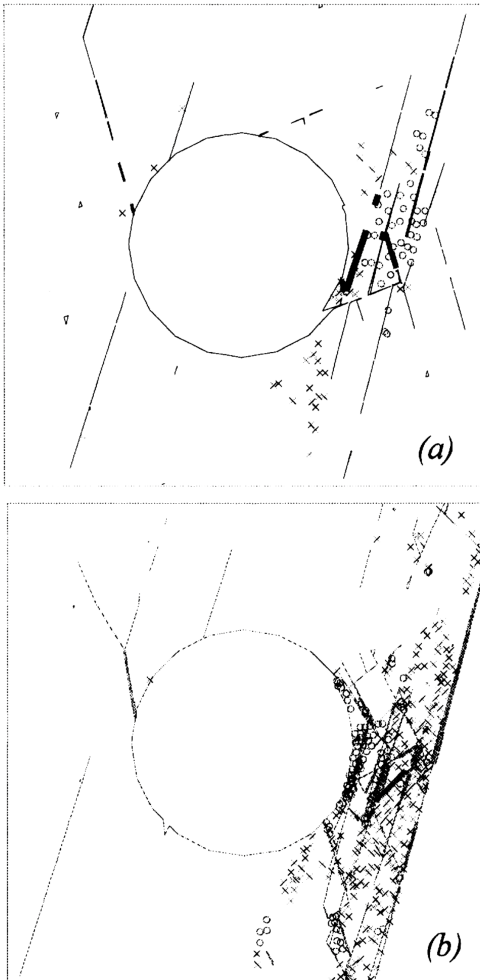
3.6.3 Rezultati

Naponski uvjeti jednaki onima koji su pretpostavljeni u modelima kontinuuma primijenjeni su i za deterministički model i za model DFN.

Da bismo vidjeli mogu li se pristupom utemeljenim na kontinuumu dobiti rezultati slični onima na diskontinuumu, obavljani su proračuni kojima je simuliran iskop tunela prema modelima konačnih elemenata, a uz primjenu rubnih naponskih uvjeta. Ovdje treba napomenuti da pritisak vode oko tunela nije uzet u obzir. Zapravo, glavni je naglasak stavljen na zone popuštanja koje karakteriziraju padajući blokovi i na posmične pomake inducirane uzduž pukotina (slika 22.). Također je u obzir uzet trend pomicanja blokova na desnom boku tunela (slika 23.).

Dobiveni rezultati pokazuju da su uvjeti prenaprezanja i kretanja blokova na desnom boku tunela dobro opisani u oba modela: determinističkom tako i u modelu DFN.

Što se tiče elastično-kruto-plastičnog modela kojim je određena prisutnost dvaju subparalelnih diskontinuiteta, treba napomenuti da je produbljivanje loma na desnom boku dobro reproducirano u pristupu baziranom na diskontinuuu (usporedi slike 17. i 22.). Međutim, za razliku od pristupa utemeljenog na kontinuuu (slika 17.) u drugom se slučaju (slika 22.) ne uočava značajan razvoj nestabilnosti na lijevom boku. To je očita podudarnost sa stvarnim uvjetima u tunelu, gdje se tunelska krtica (TBM) zaglavila zbog nestabilnosti i pomicanja blokova na desnom boku.

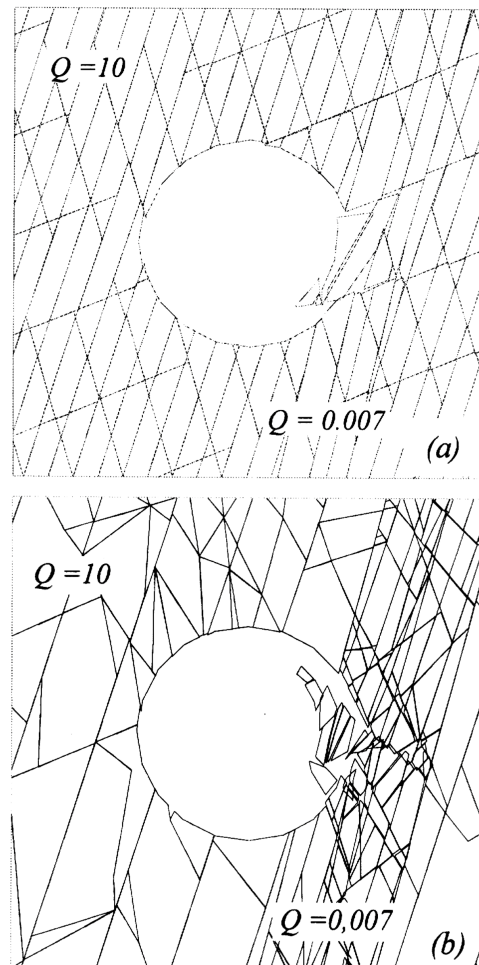


Slika 22. Olabavljeni blokovi i posmični pomaci duž pukotina oko tunela: deterministički model (a), model DFN (b)

Čini se da se u pristupu utemeljenom na kontinuuu u obzir uzimaju neki nepovoljni faktori značajni za uvjete nestabilnosti koji su nastali za iskopa s pomoću TBM-a:

- elastično-kruto-plastično ponašanje stijenskog materijala,
- izrazito anizotropni režim napona s vrlo niskim koeficijentom napona,
- prisutnost nepovoljnih dominantnih diskontinuiteta u desnoj kaloti tunela.

S druge strane, pristup utemeljen na diskontinuuu izvrsno pokazuje pomicanje blokova koje se pojavljuju u desnoj kaloti, dok obod tunela ostaje stabilan izvan rasjedne zone i to u tjemenu i u desnoj kaloti.



Slika 23. Pomicanje blokova oko tunela: deterministički model (a), model DFN (b)

4 Zaključak

Razmatrane su moderne metode numeričkog modeliranja kontinuuu i diskontinuuu a naglasak se stavlja na neke osnovne koncepte i upute za rješavanje problema koji se pojavljuju u stadiju projektiranja tunela. Što se tiče modeliranja u inženjerskoj praksi, prednost se daje modelima utemeljenima na diskontinuuu jer daju bitno realniju i reprezentativniju sliku ponašanja stijenske mase, nego što je to slučaj kod odgovarajućih modela kontinuuu.

Opisuje se modeliranje stijenske mase oko tunela promjera 4,75 m koji se izvodi otvorenom konfiguracijom TBM u kvarcnom mikašistu, pri čemu se ističe gubitak stabilnosti u zoni u kojoj tunel prolazi kroz rasjed. Za proračun su primijenjene metoda konačnih elemenata i

metoda izdvojenih elemenata, a i postupak dvodimenzionalnog modeliranja jer je trodimenzionalni prikaz suviše ograničen i nije prikladan zbog nesigurnosti ulaznih podataka.

Kod metode konačnih elemenata primijenjen je pristup jednakog kontinuuma, što uključuje i analizu utjecaja dvaju glavnih diskontinuiteta u desnoj kaloti tunela. Kod metode izdvojenih elemenata upotrijebljen je pristup potpunog diskontinuumu, i to putem determinističkog

modela ili modela mreže diskretnih svojstava. Prikaz stijenske mase baziran na diskontinuumu vjerodostojno odražava uvjete nestabilnosti koji su se pojavili na čelu iskopa tunnelskom krticom. S druge strane, prikaz s pomoću kontinuuma daje idealiziraniju sliku analizirane nestabilnosti. Možemo zaključiti da se za analizu stabilnosti u posebnim geološkim uvjetima moraju primijeniti modeli koji na najrealniji mogući način odražavaju stvarne uvjete na terenu.

LITERATURA

- [1] Barla, G.; Barla, M.; Repetto, L.: *Continuum and discontinuum modelling for design analysis of tunnels*. 9th Int. Congr. on Rock Mech. Paris, France, 1999.
- [2] Bandis, S.: *Engineering properties and characterization of rock discontinuities*. Comprehensive Rock Engineering. Volume 1. Fundamentals (Hudson J.A., editor). pp. 155.-183. Pergamon Press, Oxford (UK), 1993.
- [3] Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J.: *Engineering classification of jointed rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics. Vol. 6, pp. 189.-236. 1974.
- [4] Barton, N.: *Pont Ventoux Hydropower Project. Tunnel F2 - Pont Ventoux*. Assessment of geological conditions and required support for ch 2350-4000. Report to Nocon. 25 October 1997.
- [5] Barton, N.: *Quantitative description of rock masses for the design of NMT reinforcement* (Special Lecture 1). Int. Conf. on Hydro Power development in Himalayas. Shimla, India, 1998.
- [6] Barton, N.: *General report concerning some 20th century lessons and 21st century challenges in applied rock mechanics*. 9th International Congress on Rock Mechanics. August 25. - 28., 1999, Paris.
- [7] Brown, E.T., J. W.; Bray, B.; Ladanyi, Hoek, E.: *Characteristic line calculations for rock tunnels*. J. Geotech. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. 109. pp. 15.-39., 1983.
- [8] Cundall, P. A.; Hart, R. D.: *Numerical modelling of discontinua*. Comprehensive Rock Engineering. Volume 2. Analysis and Design Methods (Hudson J.A., editor). pp. 231-261. Pergamon Press, Oxford (UK), 1993.
- [9] Curran, J. H.; Corkun, B. T.: Phase². 2D finite element program for calculating stresses and estimating support around underground excavations. *Reference Manual and Tutorial Manual*. Rock Engineering Group. University of Toronto, 1997.
- [10] Dershowitz, W.; Lee, G.; Geoier, J.; La Pointe, P.: *FracMan Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modelling and Exploration Simulation*. User documentation. Version 2.50. Seattle. Golder Associates Inc., 1995.
- [11] Grimstad, E., Barton, N.: *Updating the Q-system for NMT*. Proc. of Int. Symp. on Sprayed Concrete. Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support. Fagernes (Kompan, Opsahl and Berg, editors): Norwegian Concrete Association, Oslo, 1993.
- [12] Hart, R. D.: *An introduction to distinct element modelling for rock engineering*. Comprehensive Rock Engineering. Volume 2. Analysis and Design Methods (Hudson J.A., editor). pp. 245.-263. Pergamon Press, Oxford (UK), 1993.
- [13] Hoek, E.; Grabinsky, M. W.; Diederichs, M. S.: *Numerical modelling for underground excavation design*. Trans. Inst. Min. Metal. Vol. 100. January-April 1991, pp. A22-A30.
- [14] Hoek, E.; Brown, E. T.: *Practical estimates of rock mass strength*. Int. J. Rock Mech. Min.Sci. Vol. 34, pp. 1156.-1186. 1997.
- [15] Itasca Consulting Group 1996. UDEC (Universal Distinct Element Code), version 3.0 Volume I: User's manual. Volume II: Verification problems and example applications. Minneapolis, Minnesota, USA. 1996.
- [16] Martin, C. D.; Mc Creath, D.R.; Stochmal, M.: *Estimating support demand-load caused by stress-induced failure around tunnels*. Int. Symp. on Rock Support, Lillehammer, June 1997.
- [17] Panet, M.: *Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.
- [18] Pont Ventoux 1997. *Nota relativa al sopralluogo effettuato in data 8/10/1997 in corrispondenza del fronte di scavo della galleria di derivazione nel tratto Pont Ventoux - F2* (Dott. Geol. G. Venturini).
- [19] Shen, B.; Barton, N.: *The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, pp. 117.-125. 1997.
- [20] Starfield, A. M., Cundall, P. A. *Towards a methodology for rock mechanics modelling*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 25, pp. 99.-106., 1988.

ZAHVALE

Posao opisan u ovom radu obavljen je uz financijsku potporu talijanskog ministarstva za sveučilišna i tehnološka istraživanja (MURST) u okviru znanstvenoistraživačkog programa Gradnja tunela u teškim uvjetima. Autori se ovim putem zahvaljuju na pomoći G. Giampieriju i L. Repetto-u, bivšim studentima Politecnico di Torino.

Srdačno se zahvaljujemo i na dozvoli za objavljivanje ovog rada o tunelu F2, koju smo dobili od AEM-a (Azienda Energetica Metropolitana) iz Torina, investitora na hidrotehničkom projektu Pont Ventoux - Susa. Autori se također zahvaljuju i tvrkama koje su sudjelovale na projektu opisanom u ovom radu, tj. Astaldi-ju S.p.A iz Italije i Nocon-u iz Norveške.