

# Primjena principa graničnih stanja u tunelogradnji

Mladen Hudec

## Ključne riječi

tunelogradnja,  
proračun,  
podgrada,  
Eurokod 7,  
granično stanje,  
kriterij loma

M. Hudec

Prethodno priopćenje

## Primjena principa graničnih stanja u tunelogradnji

Polazeći od činjenice da je proračun podgrade tunela i podzemnih prostorija nepouzdan, ako se temelji na zajedničkim deformacijama stijene i podgrade, u ovom se radu opisuje inverzni postupak. Pritom se stijena opterećuje na rubu otvora reaktivnim silama koje može proizvesti podgrada. Upozorava se da treba kontrolirati zadovoljava li stijena kriterije loma. Pokazano je da se rješenje može naći primjenom metoda konačnih elemenata, konačnih razlika ili metodom rubnih elemenata.

## Key words

tunnel construction,  
design,  
support,  
Eurocode 7,  
limit state,  
failure criterion

M. Hudec

Preliminary note

## Use of limit state principles in tunnel construction

Starting from the fact that the structural analysis of the tunnel support and underground rooms is unreliable, the author describes the proposal of an inverse procedure in accordance with Eurocode 7. According to this procedure, the load is exerted on the rock at the boundary of the opening by reactive forces that can be produced by the support work. It is emphasized that builders must also verify whether the rock meets relevant failure criteria. It is shown that the solution may be reached by applying the finite-element method, finite difference method or, to simplify the procedure, the boundary element method.

## Mots clés

construction des tunnels,  
calcul,  
soutènement,  
Euro code 7,  
état limite,  
critère de rupture

M. Hudec

Note préliminaire

## La mise en oeuvre du principe des états limites dans la construction des tunnels

Partant du fait que le calcul statique du soutènement des tunnels et des salles souterraines n'est pas fiable, cet article décrit la proposition d'un procédé inverse, conforme à l'Euro code 7. Ce procédé consiste à charger la roche au bord de l'ouverture par des forces réactives que peut exercer le soutènement. On signale qu'il est nécessaire de vérifier si la roche satisfait les critères de rupture. Il a été démontré qu'une solution peut être trouvée par l'application de la méthode des éléments finis, des différences finies ou plus simplement par la méthode des éléments limites.

## Schlüsselworte:

Tunnelbau,  
Berechnung,  
Zimmerung  
Eurocode 7,  
Grenz Zustand,  
Bruchkriterium

M. Hudec

Vorherige mitteilung

## Anwendung des Grenz Zustand-Prinzips im Tunnelbau

Ausgehend von der Tatsache dass die statische Berechnung der Zimmerung von Tunneln und unterirdischen Räumen unzuverlässig ist wird in diesem Artikel der Vorschlag eines inversen Verfahrens in Einklang mit dem Eurocode 7 beschrieben. In diesem Verfahren wird das Felsmassiv am Rand der Öffnung durch Reaktivkräfte belastet die von der Zimmerung verursacht werden könnten. Es wird darauf hingewiesen dass man kontrollieren muss ob das Felsmassiv die Bruchkriterien befriedigt. Es wird gezeigt dass man die Lösung mittels der Methode der endlichen Elemente, endlicher Differenzen oder, einfacher, der Methode der Randelemente erreichen kann.

Autor: Prof. emer. dr. sc. **Mladen Hudec**, dipl. ing. građ., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6

## 1 Uvod

Primarna podgrada tunela i ostalih podzemnih prostorija bitni je element sigurnosti iskopanog profila. Ona se ugrađuje neposredno nakon iskopa cijelog profila ili dijela profila i mora osiguravati stabilnost poduprte stijene ili tla tijekom daljnjeg napredovanja iskopa, i odgovorna je za sigurnost ljudi i opreme. Suvremena konstrukcija podgrade sastoji se od slojeva mlaznog betona, eventualno armiranog mrežama, te od sidara, a u slučaju težih geotehničkih uvjeta primijenit će se i puni ili rešetkasti čelični lukovi, probojna podgrada ili posebni zahvati kao što je primjerice cijevni krov, zaštita kalote i bokova normalnim odnosno mlaznim injektiranjem ili armiranje ispred čela. Koliko god je podgrađivanje osnovni element stabilnosti iskopanog profila, toliko je upitna korektna statička kontrola stabilnosti te konstrukcije, ili bolje rečeno spregnute strukture, koja se sastoji od stijene neposredno uz otvor i ugrađenih konstruktivnih elemenata. Vjerojatno niti jedna druga konstrukcija nije opterećena s toliko teško odredivih faktora o kojima ovisi stabilnost konstrukcije kao što je upravo primarna podgrada podzemnih prostorija.

## 2 Prikaz problematike

Poznata je definicija da se tuneli ne grade u stijenama onakvim kakve naručuje investitor a priželjkuju projektanti i izvođači, nego onakvim kakve se nađu na trasi, a trasa se samo iznimno prilagođava geološkim uvjetima. Naši graditelji tunela sukobljavaju se ponajviše s karbo-natnim stijenama i mogu posvjedočiti da je jedino i osnovno pravilo u kršu da u kršu nema nikakvog pravila.

Prva i osnovna nepoznanica su opterećenja stijene na trasi tunela, zapravo primarno stanje naprezanja u stijeni, prije iskopa tunela. Vertikalno je opterećenje obično dobro definirano silama vlastite težine masiva iznad tunela, međutim, za bilo kakav statički proračun treba zadati i postojeće horizontalno opterećenje masiva. Obično se to zadaje odnosom horizontalnih i vertikalnih primarnih naprezanja  $K$ :

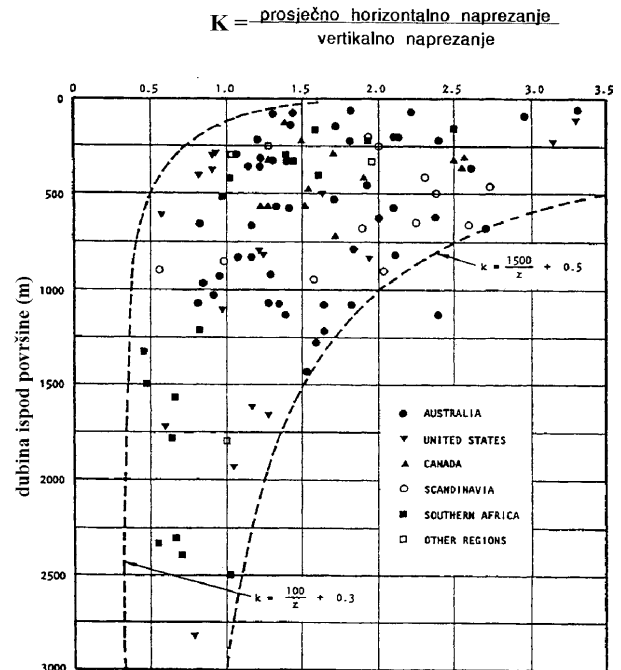
$$K = p_H/p_V \quad (1)$$

Usvajanjem pak pretpostavke da su bočne deformacije spriječene, uzima se u stvari odnos koji slijedi iz teorije elastičnosti:

$$K = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (2)$$

$\nu$  - Poissonov koeficijent.

Zapravo se ta prva nepoznata veličina kreće u vrlo širokim granicama. U Hrvatskoj, koliko mi je poznato, nije ni za jednu lokaciju taj odnos provjeren mjerenjem, a na slici 1. pokazani su rezultati mjerenja iz više zemalja prema [1].

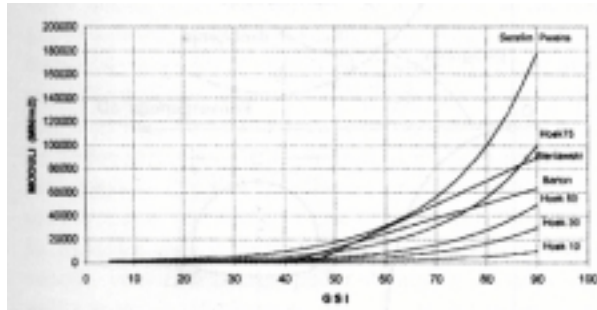


Slika 1. Izmjereni odnosi horizontalnih i vertikalnih osnovnih naprezanja u stijenama  $K$

Poznata je činjenica da su naši Dinaridi izrazita antiklinala ispresijecana još i sa brojnim konstatiranim rasjedima. Slična je situacija u Alpama, u kojima je na nizu mjesta ustanovljeno da horizontalna ili neka kosa osnovna naprezanja zbog tektonskih utjecaja mogu biti višestruko veća od osnovnih vertikalnih. Projektant mora po svojoj slobodnoj ocjeni odabrati taj odnos ili proračun provesti uz dvije isto tako proizvoljno pretpostavljene vrijednosti koje smatra mogućim gornjim i donjim granicama. A utjecaj tog nepoznatog odnosa više je nego bitan za sve pojave uz otvor iskopanoga podzemnog prostora, za odabiranje oblika poprečnog presjeka i, naravno, njegovu sigurnost.

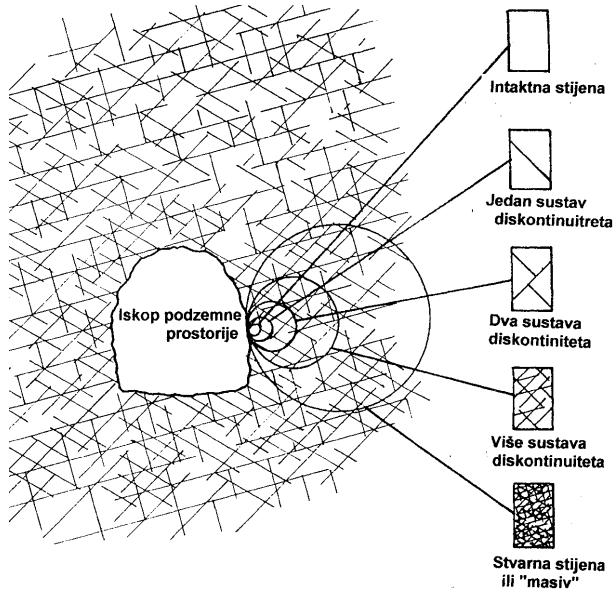
Druga osnovna nepoznanica jest stijena, i njezina mehanička svojstva, a sigurno je pritom jedino to da nikada nema dovoljno prethodnih inženjerskogeoloških istraživanja niti geotehničkih ispitivanja. Vrlo je teško odrediti stvarna mehanička svojstva stijene u masivu. Osim jednoosne čvrstoće konstatirane na malom standardnom uzorku, u proračun treba uvesti deformacijske karakteristike masiva. Radi se o modulima elastičnosti, odnosno modulima deformacija za pojedina područja stanja prostornog naprezanja, koji se mogu opet samo vrlo približno odrediti. Na veličine tih modula ne utječe samo iznos modula konstatiranog na malom monolitnom uzorku, nego mnogo više sustavi ploha diskontinuiteta, njihov raspored te naročito ispuna pukotina. Hoek [9] daje podatke kod kojih manje vodi računa o petrografskim karakteristikama stijene, a više o razlomljenosti masiva, broju sustava ploha diskontinuiteta i njihovim svojstvi-

ma te o jednoosnoj čvrstoći uzorka. Na slici 2. pokazani su dijagrami modula elastičnosti masiva, a prema raznim autorima i u ovisnosti u geološkom indeksu čvrstoće GSI (*Geological Strength Index*) ili RMR (*Rock Mass Rating*) indeksu kvalitete stijene Bieniawskog odnosno  $Q$  karakteristici Bartona. Numerička vrijednost modula koji ulazi u proračun ima manje utjecaja na proračunate iznose naprezanja uz podzemnu prostoriju bez podgrade, ali je bitna kada se u proračun uzme i utjecaj podgrade. Razlike pojedinih procjena modula na slici 2. pokazuju koliko su nepouzdana podaci o deformacijama statički neodređenog sustava stijena - podgrada.



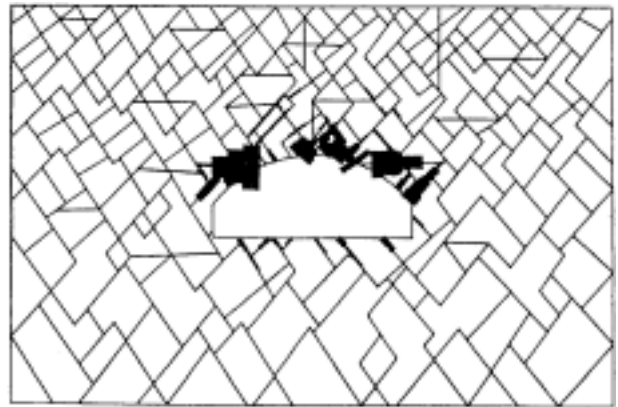
Slika 2. Računski modul elastičnosti masiva u ovisnosti o geološkom indeksu čvrstoće, prema [9] Hoek definira modul u ovisnosti od jednoosne čvrstoće uzorka izražene u  $\text{MN/m}^2$

Stijena naravno nije monolit niti homogena sredina, ona je ispresijecana plohama diskontinuiteta i razlomljena na veće ili manje blokove. Utjecaj odnosa veličine blokova i dimenzija podzemne prostorije, odnosno veličine uzorka i njegovih svojstava zorno prikazuje crtež na slici 3, uzet iz knjige Hoeka i Browna [2].



Slika 3. Utjecaj obuhvaćenog volumena na svojstva razlomljene stijene

Obično u proračunima nema mogućnosti da se točnije uzme u obzir i taj oblik anizotropije stijena, a mogućnost da se i o tome ipak može voditi računa pokazuje



Slika 4. Programom UDEC izračunana klizanja po plohama diskontinuiteta stijene za športsku dvoranu u Oslu [4].

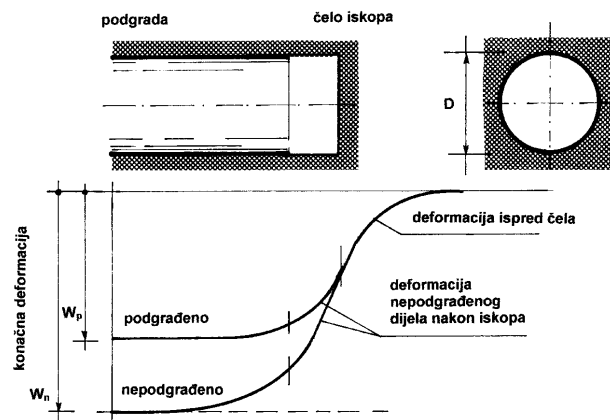
primjer na slici 4. Radi se o poznatoj podzemnoj olimpijskoj dvorani u Oslu, raspona 62 metara, za koju su bili provedeni izvanredno opsežni istražni radovi. Za proračun naprezanja i pomaka iskorišteni su programi distinktnih (odijeljenih) elemenata UDEC i 3DEC koji uzimaju u obzir plohe diskontinuiteta i raspucanost stijene. Pokazani presjek jedan je od sustava distinktnih elemenata, konstruiranim prema pravilima teorije vjerojatnoće i konstatiranih ploha diskontinuiteta, njihovoj orijentaciji, gustoći i svojstvima na plohama kontakata među blokovima. Naravno da je taj izuzetan istraživački, teoretski i numerički napor bio adekvatan značenju objekta.

Za analizu stabilnosti podzemnih prostorija potrebno je definirati kriterije loma stijene ili tla. Oni se izražavaju intenzitetima graničnih normalnih i posmičnih naprezanja, odnosno glavnih naprezanja. Najstariji je poznati kriterij loma Mohra i Coulomba, koji definira granično posmično naprezanje ovisno o normalnom naprezanju na kritičnoj plohi klizanja, sličan je i kriterij Druckera i Pragera, a nešto drugačije je formuliran noviji kriterij Hoeka i Browna. Dok su prva dva primjerenija problemima mehanike tla, posljednji je pogodniji za probleme mehanike stijena. Ta dva kriterija, imaju zajedničko svojstvo da ne vode računa o trećoj komponenti tenzora naprezanja u prostoru, a mogu se definirati sa dvije odnosno tri konstante.

Ovi su kriteriji simplifikacija problema koji je zapravo mnogo složeniji. Ispitivanja bečke gline pokazala su da kriterij loma treba predstaviti krivuljom graničnih posmičnih naprezanja koja ima tri područja, a to je tzv. kriterij loma s kalotom. Postoji naime granično naprezanje, iza kojeg se tlo ponaša kao tekućina koja ne može preuzeti nikakvo posmično naprezanje. Za definiranje takvog kriterija potrebno je čak 11 konstanata.

Uglavnom ni stijene ni tla nisu linearno elastični nego obično i anizotropni, djelomično plastični i viskozni. Da bi se i to uvelo u račun, trebalo bi točno definirati konstitutivne zakone za stijenu, a to znači odrediti potreban broj materijalnih konstanta. Postoje naravno programi konačnih elemenata, konačnih razlika ili rubnih elemenata koji mogu uzeti u račun sva ta svojstva, ali ostaje pitanje kolika je konačna pouzdanost rezultata ako se uzme u obzir s koliko se proizvoljno odabranih veličina mora učiti u takve proračune.

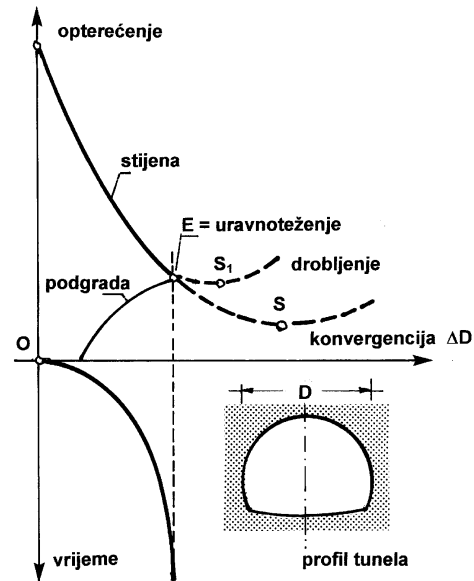
Udio podgradnog sustava u preuzimanju opterećenja svakako je problem za sebe. Podgrada se ugrađuje neposredno iza čela iskopa koje se nalazi u izrazito trodimenzionalnom stanju naprezanja. Dio stijene koji je upravo iskopan nije mogao biti istodobno s iskopom i podgrađen. Pojednostavljeno rečeno, opterećenje koje je preuzimala upravo iskopana dionica stijene mora se podijeliti na tri dijela: na opterećenje koje preuzima stijena uz iskopani dio, na dio koji preuzima stijena ispred čela iskopa i na dio koji opterećuje prije podgrađeni tunel. Ovu činjenicu dobro ilustrira slika 5. iz preporuka koje je predložila ITA (International Tunnelling Association), koja prikazuje trenutno stanje deformacija uz čelo iskopa, a iz toga se samo može zaključiti da je stanje deformacija i naprezanja uz čelo iskopa vrlo složeno troosno stanje, koje uza sve do sad nabrojene faktore ovisi još i o brzini napredovanja iskopa.



Slika 5. Raspodjela deformacija uz čelo iskopa i izvedeni dio tunela [3]

Djelovanje podgrade je ne samo statički neodređeno nego još i ovisno o vremenskim faktorima. U principu podgrada djeluje kao statički neodređeni sustav u kojem se deformacije stijene i podgrade izjednačuju. Jedan dio deformacija stijene dogodio se već prije iskopa, ispred čela, a drugi, najznačajniji, u trenutku iskopa otvorene dionice. Prije daljeg napredovanja iskopa ugradit će se na novoiskopanom dijelu podgrada koja se sastoji obično od nearmiranog ili armiranog mlaznog betona. Mlazni beton radi se s dodatkom ubrzivača vezanja, tako da

stvrđnjava već nakon desetak minuta, ali njegov proces punog vezanja i stvrđnjavanja traje još danima i tjednima. U prvi se trenutak stijena oslanja na podgradu od mlaznog betona, čiji je modul vrlo nizak, a konačnu vrijednost će postići tek nakon nekog vremena.



Slika 6. Odnos raspodjele opterećenja, konvergencije tunelskog profila i vremena (NATM)

Nova austrijska tunelska metoda (NATM) je uspio sustav principa poboljšanja geotehničkih karakteristika stijene podgradom, iskorištavanja primarne čvrstoće stijene, racionalnosti podgradnih sustava i obavezne kontrole djelovanja podgrade mjerenjem deformacija na iskopanom i podgrađenom tunelu. Poznate krivulje odnosa deformacije i opterećenja, te vremena i deformacije, pokazane na slici 6., potvrđuju efikasnost primijenjenog podgradnog sustava i dokazuju da je proces deformiranja spregnute stijene i podgrade završen i postignuta stabilizacija. Nažalost, ovo je samo podatak da se stijena dalje ne deformira, ali nedostaje podatak o tome koliko ima još rezerve u nosivosti te spregnute strukture. Mjerenje deformacija ili "konvergencije" rezultira donjom krivuljom na slici 6. Od gornje krivulje poznat je samo vrh, te približno i točka uravnoteženja  $E$ , koja slijedi iz nosivosti podgrade i trenutka kada je deformiranje stijene zaustavljeno. Položaj donjeg tjemena krivulje  $S$  nije poznat, pa prema tome niti odnos trenutne nosivosti spregnute stijene i podgrade prema kritičnoj vrijednosti u "S" ili "S<sub>1</sub>", pa prema tome ni stvarni koeficijent sigurnosti podgrade.

Statička koncepcija podgrade još se više komplicira pri primjeni nekih suvremenih metoda iskopa u slabim stijenama, kada se probojnom podgradom, cijevnim krovom ili krovom izrađenim metodom mlaznog injektiranja opterećenje djelomično preuzima tim konstruktivnim elementima.

Nije čudno da graditelji tunela zaziru od proračuna podgrade i bježe u empirijsko odabiranje podgradnih sustava samo na temelju klasifikacija. Najviše se primjenjuju RMR (Rock Mass Rating) sistem klasifikacije Bieniawskog i Q sistem Norveškog geološkog instituta (NGI). Oba su sustava utemeljena na analizi po nekoliko stotina prokopanih i izgrađenih tunela i nesumljivo predstavljaju rezultat iskustva mnogih graditelja tunela i temeljitih studija tih iskustvenih rezultata, pa su solidna osnova za procjenu potrebnih zahvata. Ipak, čisto empirijski postupak malo vodi napretku struke i znanosti, pa se ne treba ograničiti samo na njega.

Treba shvatiti da je, bez obzira na opseg istražnih radova, graditelj tunela suočen svakodnevno s drugačijom geotehničkom situacijom na čelu iskopa, ali i da nema vremena čekati ispitivanja mehaničkih svojstava stijena na koje je naišao. Posljedica toga je da ono što se uobičajeno naziva projektom u tunelogradnji je samo prva faza projektiranja, a izrada izvedbenog projekta podgradnog sustava seli iz projektnog biroa na gradilište. Stvarnost na gradilištu za iskopa traži gotovo svakodnevne intervencije, upravo u načinu podgrađivanja i savladavanja onih poteškoća koje je teško predvidjeti na temelju prethodnih istražnih radova, ma koliko oni bili opsežni, a u definiranju intervencija će učestvovati ekipa kompetentnih stručnjaka raznih struka i to na gradilištu. Zbog toga vjerojatno niti jedna grana tehnike ne traži od inženjera pri izvođenju toliko osobne odgovornosti, snalaženja, inventivnosti i intuicije kao izvedba podzemnih prostora.

Prethodni prikaz pokazuje da je pomalo dubiozan bilo kakav "točniji" proračun podgradnih sustava unaprijed. Točniji proračun tražio bi vrlo opsežna prethodna istraživanja, a potom proračune s programima, koji bi mogli obuhvatiti sve materijalne karakteristike stijenskog masiva i vremensku analizu pojava uz čelo iskopa i iza njega. Nažalost i takav bi se proračun morao provesti uz niz manje ili više proizvoljnih pretpostavki, a onda se postavlja pitanje dokle ići s opsegom proračuna i variranjem ulaznih podataka. Projektantu ne preostaje ništa drugo nego da projektom izbjegne mogućnost pojave iznenađenja i predvidi podgrađivanje za sve mogućnosti promjena kvalitete stijena, odnosno mora predvidjeti podgradne sustave za sve moguće kategorije tunelskog iskopa.

Nema razgovora o tome je li statički dokaz stabilnosti podgradnih sustava nužan ili nije, i to ne samo zato jer to traže propisi o inženjerskim objektima. Upravo zbog prikazanih poteškoća u odabiranju ulaznih podataka, od statičkih proračuna podgradnih sustava ne treba tražiti više nego što se traži za uobičajene kontrole stabilnosti ostalih inženjerskih konstrukcija, ali proračuni podgradnih sustava moraju biti dovoljno pouzdani, a uz to što jednostavniji, pregledniji i po mogućnosti takvi da ih se može provesti i na gradilištu.

### 3 Neke odredbe Eurokoda 7

Kao osnovu za razmatranje koncepcije statičkog proračuna podgrade uzima se Eurokod 7, koji definira način dokaza stabilnosti geotehničkih konstrukcija. On je kao prednorma prihvaćen unutar sustava njemačkih tehničkih propisa DIN. Taj postupak predviđa uspoređivanje ekstremnih računskih statičkih utjecaja  $S_d$  i granične nosivosti inženjerske konstrukcije  $R_d$ . Ekstremno proračunsko djelovanje  $S_d$  je funkcija računskih opterećenja  $F_d$ , geometrijskog oblika konstrukcije definirane s dimenzijom  $a_d$ , svojstvima primijenjenih materijala  $f_k$ , faktora sigurnosti  $\gamma_d$ :

$$S_d = S_d(F_d, a_d, f_k, \gamma_d) \quad (3)$$

S druge strane, granična nosivost konstrukcije  $R_d$  ovisi o materijalnim i geometrijskim karakteristikama konstrukcije  $a_k$ , čvrstoće odnosno kritičnog naprezanja materijala  $f_k$  i parcijalnom faktoru sigurnosti  $\gamma_m$  ovisnom o materijalu:

$$R_d = R(a_k, f_k, \gamma_m) \quad (4)$$

Konstrukcija se smatra prihvatljivom ako je:

$$S_d \leq R_d \quad (5)$$

Parcijalni faktori sigurnosti za stalna i prolazna opterećenja, prema Eurokodu 7, pokazani su u tablici 1.

Tablica 1. Faktori sigurnosti prema Eurokodu 7.

slučaj	Djelovanja			Svojstva tla			
	stalna		pokretna	TAN Φ	c'	c <sub>u</sub> *	q <sub>u</sub> **
	nepovoljna	povoljna					
A	1.00	0.95	1.50	1.10	1.30	1.20	1.20
B		1.00	1.50	1.00	1.00	1.00	1.00
C	1.00	1.00	1.30	1.35	1.60	1.40	1.40

\* c<sub>u</sub> označuje graničnu koheziju  
\*\*q<sub>u</sub> označuje jednoosnu čvrstoću stijene ili tla.

Objašnjenje slučajeva iz tablice 1.:

- A se odnosi na probleme gdje je glavno nepovoljno djelovanje hidrostatski tlak vode ili uzgon,
- B je mjerodavan za granične nosivosti konstrukcijskih elemenata koji su dio temeljne ili potporne konstrukcije,
- C je mjerodavan za graničnu nosivost tla ili podloge, koja ne ovisi o obliku i nosivosti konstruktivnih elemenata, primjerice slučaj kliznih ploha koje ne prolaze kroz potpurnu konstrukciju.

Očigledno, podgrada podzemnih prostorija je pod stalnim djelovanjem kontaktnih sila između stijene i podgrade kao trajnim nepovoljnim opterećenjem, pa to odgovara slučaju B.

Pokazano je s koliko se nepoznatih ili proizvoljnih pretpostavki mora proračunavati ponašanje spregnute konstrukcije koja se sastoji od podgrade i stijene, jer ponašanje te statički neodređene strukture ovisi prvenstveno o ostvarenim deformacijama, a one opet ovise o mnogo unaprijed teško odredivih faktora. Treba stoga pokušati izbjegnuti statički proračun koji se temelji na vrlo problematično odredivim zajedničkim deformacijama stijene i podgrade.

#### 4 Primjena Eurokoda 7 na proračun podgrade

Granični utjecaj stijene na podgradu teško je odrediti, ali je moguće odrediti granični utjecaj podgrade na stijenu. Proračun podgrade valja stoga koncipirati inverzno, što znači da treba pretpostaviti graničnu nosivost podgrade i vidjeti zadržava takva podgrade stijenu određenih karakteristika u stabilnom stanju. Da bi se utjecaj stalnog opterećenja stijene na podgradu moglo uspoređivati s nosivošću podgrade trebalo bi utjecaj stijene množiti s faktorom  $\gamma_d = 1.35$ , odnosno, treba nosivost podgrade podijeliti sa tim faktorom i kontrolirati utjecaj podgrade na stijenu. Izraz (5) može se transformirati u oblik :

$$S_{du} \leq \frac{R_d}{\gamma_d} \quad (6)$$

gdje je:

$S_{du}$  - granični utjecaj podgrade na stijenu,

$R_d$  - granična nosivost podgrade

$\gamma_d$  - projektni faktor sigurnosti za konstrukciju.

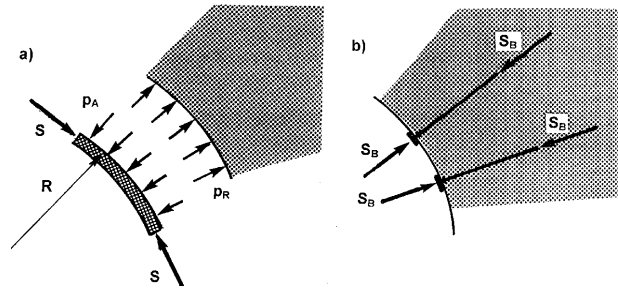
Uvođenjem graničnog stanja podgrade može se dakle problem analize graničnih stanja invertirati. Umjesto da se proračunava stanje podgrade koje slijedi iz nekog pretpostavljenog odnosa deformacija stijene i podgrade, možemo u račun uključiti graničnu nosivost podgrade i analizirati efekt reakcije podgrade na stijenu. Treba kontrolirati da li uz graničnu (dozvoljenu) reakciju podgrade i stijena zadovoljava uvjete kriterija loma. Time bi se dokazala moguća granična ravnoteža sustava podgrada - stijena, uz zadovoljen propisani faktor sigurnosti za podgradu i zadovoljenje kriterije loma stijene.

Za takav postupak postoje dva vrlo značajna razloga :

- Vrlo je dubiozna veza između deformacija podgrade mlaznim betonom i njezine nosivosti koja bi slijedila iz tih deformacija, jer se radi o deformacijama mladog i popustljivog betona za koji nije poznato kako je u kojoj fazi očvršćivanja betona bio opterećen. Sigurnije je ne voditi računa o deformacijama podgrade i direktno pretpostaviti utjecaj graničnog stanja podgrade na stijenu.
- Opterećenje stijene graničnom interakcijom stijene i podgrade na rubu otvora određivo je i postaje ulazni

podatak za analizu stanja naprežanja i deformacija stijene. Uspoređivanje dobivenih naprežanja (uz rub otvora) s kriterijima loma daje mjeru sigurnosti sprege stijene i podgrade.

Kao primjer opterećenja ruba graničnim opterećenjem neka posluži slika 7. Podgrada se sastoji samo od sloja mlaznog betona debljine  $d$ , a beton je kvalitete  $m_b = f_b$ . Radijus luka podgrade iznosi  $r_L$ . Granična normalna sila  $S_{NU}$  koju može preuzeti betonski presjek debljine  $d$  i dužine 1.0 m u smjeru osi tunela, iznosi:



Slika 7. Medusobno djelovanje luka podgrade i stijene i djelovanje zategnutog sidra.

$$S_{NU} = d \times 1.0 \times f_b \quad (7)$$

Luk radijusa  $r_L$  opterećen normalnom silom  $S_{NU}$  proizvodi na obod tlak  $p_{RU}$ :

$$p_{RU} = \frac{S_{NU}}{r_L} \quad (8)$$

Za analizu stanja u stijeni treba taj tlak podgrade još podijeliti s faktorom sigurnosti  $\gamma_d$ , pa se dobiva konačno opterećenje ruba otvora :

$$p_{RU} = \frac{d f_b}{r_L \gamma_d} \quad (9)$$

gdje je:

$p_{RU}$  - granični reaktivni tlak podgrade na stijenu [kN/m<sup>2</sup>],

$d$  - debljina luka od mlaznog betona [m],

$f_b$  - čvrstoća mlaznog betona [kN/m<sup>2</sup>],

$r_L$  - radijus luka podgrade [m]

$\gamma_d$  - faktor sigurnosti (=1.35).

Slično treba izračunati reaktivne tlakove podgrade na stijenu i za ostale elemente podgradnog sustava. Armaturna mreža povećava uzdužnu silu luka i daje reaktivni tlak:

$$p_{R,S} = \frac{A_s f_s}{r_L \gamma_d} * \frac{1}{1000} \quad (10)$$

gdje je:

$A_S$  - površina čelika po m' [ $\text{mm}^2/\text{m}$ ],

$f_S$  - granica popuštanja čelika [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ],

$r_L$  - radijus luka [m].

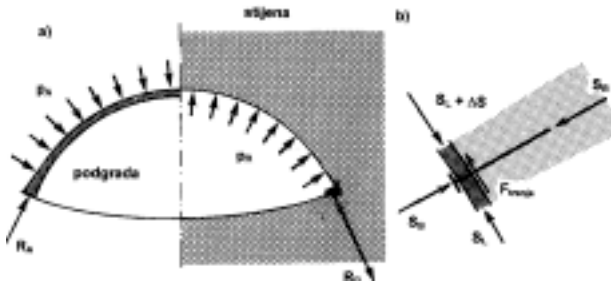
Dijeljenjem sa 1000 dobiva se  $p_R$  u  $\text{kN}/\text{m}^2$ .

Na isti se način proračunava i utjecaj čeličnih lukova, s time da treba uzeti u obzir uzdužni razmak lukova i svesti površinu  $A_S$  na površinu koja odgovara jedinici dužine tunela. Utjecaj sidara može se predstaviti sa dvije nasuprotnne sile, od kojih jedna djeluje na rubu otvora, a druga u sidrištu.

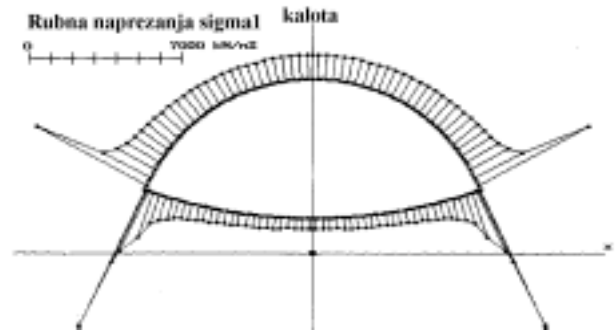
Posebno treba istaknuti da opterećenje reaktivnim tlakom podgrade mora biti uravnotežen sustav sila. Na slici 8. pokazano je djelovanje graničnih aktivnih tlačnih sila na kalotu luka podgrade. Ne smije se pritom zaboraviti na reakcije kojima taj luk mora djelovati na svoj oslonac. Na lijevom dijelu slike 8. pokazano je djelovanje stijene na luk tlakom  $p_A$  i logično je da takvo djelovanje u petama luka prouzrokuje reakcije  $R_A$ . Kada se promatra djelovanje podgrade reaktivnim tlakom  $p_R$  na stijenu, mora se u petama luka također djelovati reaktivnim silama  $R_R$  koje uravnotežuju opterećenje kalote. Treba uzeti u obzir da su relaksacijski procesi u mladom (i "mekom") mlaznom betonu intenzivniji i da će konačni rezultat biti postojanje samo normalnih sila u luk, a iz toga slijedi da su i reakcije luka tangencijalne na os luka.

U proračun se mogu uključiti i sidra (slika 7.), a uz djelovanje normalne komponente  $S_B$  postoje i sile trenja između luka podgrade i stijene  $F_{\text{trenja}}$  koje će se suprotstavljati mogućem popuštanju oslonca. Ipak ne može se cijela sila  $R_R$  ostvariti trenjem, jer se luk podgrade ponaša slično užetu obavijenom oko cilindra, koje se ne može uravnotežiti bez neke početne sile zatezanja, a ovdje je potrebno osiguranje oslonca ili tzv. slonovskom nogom ili zategnutim sidrima uz oslonac luka koja mogu aktivirati trenje.

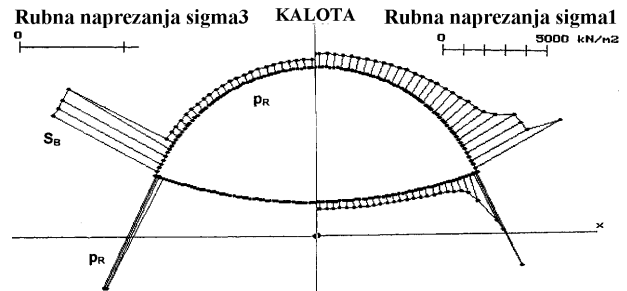
Kao primjer proračuna pokazan je presjek kalotnog dijela cestovnog tunela, podgrađenog lukom podgrade. Luk podgrade oslanja se na tzv. "slonovsku nogu" koja će i u drugoj fazi iskopa donjeg dijela profila biti većim dije-



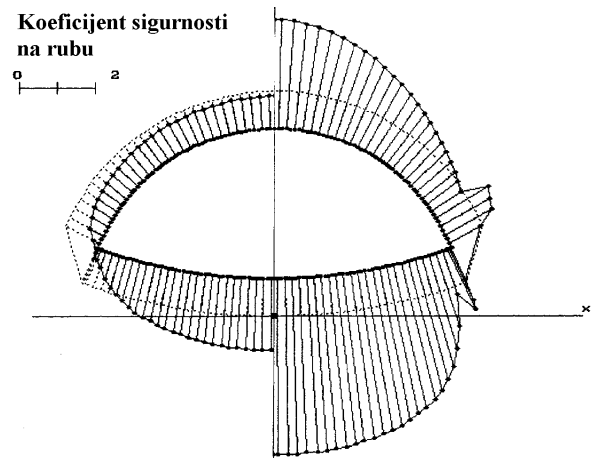
Slika 8. Medusobno djelovanje stijene i luka podgrade i djelovanje trenja na luk podgrade



Slika 9. Stanje cirkularnih naprezanja uz kalotni dio iskopa cestovnog tunela, bez podgrade



Slika 10. Stanje radijalnih (lijevo) naprezanja na rubu iskopa i odgovarajućih tangencijalnih naprezanja (desno) opterećenje reaktivnim tlakom podgradnog sustava



Slika 11. Koefficient sigurnosti nepodgrađena stijena (lijevo) i podgrađena stijena (desno)

lom sačuvana. Upotrijebljen je program rubnih elemenata RUBNI, koji ima ugrađenu kontrolu kriterija loma po Hoek-Browna. Na slici 9. pokazan je dijagram rubnih cirkularnih (= tangencijalnih na rub) naprezanja za otvor bez podgrade.

Na slici 10. pokazano je zadano opterećenje reaktivnim silama podgrade koje prikazuje dijagram radijalnih naprezanja i odgovarajućih cirkularnih naprezanja, koja se razlikuju od onih dobivenih je sustav podgrade i optereće-

nje stijene reaktivnim tlakom podgrade. Na slici 11. pokazani su odnosi proračunatih naprezanja i kritičnih naprezanja prema kriteriju Hoek - Browna. Može se to smatrati neke vrste *koeficijenta sigurnosti* za stijenu neposredno uz otvor. Na lijevoj polovini slike pokazan je taj odnos za otvor bez podgrade, tj. za stanje pokazano na slici 9., a na desnoj sa podgradom, tj. za stanje na slici 10. Primjenjeni program RUBNI temelji se na teoriji elastičnosti, pa su naprezanja u stijeni veća od onih koja se dobivaju nakon procesa relaksacije. Rezultati su dakle na strani veće sigurnosti.

## 5 Zaključak

Prikazano je da se na proračun podgrade podzemnih prostorija može primijeniti princip graničnih stanja tako

da se rub otvora podzemne prostorije optereti graničnim dozvoljenim reaktivnim tlakom podgrade. Opterećenje reaktivnim tlakom podgrade i sidrima mora biti uravnoteženo. Proračun se može ponoviti samo uz variranje mehaničkih svojstava stijene u skladu s klasifikacijom, odnosno kategorizacijom stijene. Ako je podgrada dobro odabrana, onda će stijena uz otvor biti napregnuta ispod granica kriterija loma. To je ujedno dokaz stabilnosti konstrukcije. Proračun se može provesti bilo kojom numeričkim primjerom; metodom konačnih elemenata, metodom konačnih razlika ili metodom rubnih elemenata. Po našem mišljenju ova posljednja je najpogodnija, jer je vezana uz najjednostavnije zadavanje geometrije podzemnih prostorija i rješavanje najmanjeg broja jednadžbi.

## LITERATURA

- [1] Hoek E., Brown E.T., *Underground excavations in rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London 1982
- [2] Hudec M., *Statika obloga podzemnih prostorija* Mehanika stijena, temeljenje, podzemni radovi, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Zagreb 1983
- [3] *Konstruktivni projekt tunela*, Smjernice ITA, Građevinar, Zagreb 1992
- [4] Barton D., *Geotechnical design*, World Tunnelling, November 1991, London 1991
- [5] Hudec M., Frgić L., *Metoda rubnih elemenata*, Rudarsko - geološko - naftni zbornik, Zagreb 1993.
- [6] Hudec M., Frgić L., Paris B., *RUBNI - metoda rubnih elemenata*, skripta, Rudarsko - geološko - naftni fakultet, Zagreb 1994.
- [7] Mang H., Kropik C., *Computational Mechanics of the Excavation of Tunnels*, NATM, IACS, Wien 1995.
- [8] Szavits - Nossan, A., Ivšić T., *Eurocode 7*, Građevinski godišnjak '95, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Zagreb 1995
- [9] Hoek E.: *Rock Engineering*, *cours notes*, Author / Internet, Vancouver 1999