

# Utjecaj iskopa tunela na stabilnost pokosa predusjeka

Davor Milaković, Meho Saša Kovačević

## Ključne riječi

tunel,  
predusjek,  
deformacija,  
proračun,  
stabilnost pokosa,  
trodimenzijski model

## Key words

tunnel,  
approach cutting,  
strain, analysis,  
slope stability,  
three-dimensional  
model

## Mots clés

tunnel,  
déblai d'approche,  
déformation,  
analyse,  
stabilité de talus,  
modèle tridimensionnel

## Ключевые слова

тоннель,  
предзарубка,  
деформация,  
расчёт,  
стабильность нагиба,  
трёхмерная модель

## Schlüsselworte

Tunnel,  
Voreinschnitt,  
Verformung,  
Berechnung,  
Böschungstabilität,  
dreidimensionales Modell

D. Milaković, M. S. Kovačević

Pregledni rad

## Utjecaj iskopa tunela na stabilnost pokosa predusjeka

U radu se opisuje stanje kada se u području predusjeka tunela nalaze dvije geotehničke konstrukcije, predusjek i tunel, u istom području djelovanja. Odgovara se na pitanje utjecaja iskopa tunela na stabilnost pokosa predusjeka. Prikazuje se proračun deformacija upotrebom numeričkog trodimenzijskoga modela, koji simulira stvarni proces iskopa predusjeka i tunela, kao i prijedlog tehnoloških rješenja za smanjenje utjecaja iskopa tunela na stabilnost pokosa u zoni predusjeka.

D. Milaković, M. S. Kovačević

Subject review

## The effect of tunnelling work on the stability of approach cutting

The situation when two geotechnical structures, the approach cutting and tunnel, are situated in the same area of action, i.e. in the approach cutting zone of the tunnel, is described in the paper. The influence of tunnelling work on the stability of the approach cutting is studied. The strain analysis based on the three-dimensional numerical model, which simulates the actual approach cutting and tunnelling work, is presented. The technological solution for reducing the tunnelling work impact on slope stability in the approach cutting zone is also proposed.

D. Milaković, M. S. Kovačević

Ouvrage de synthèse

## L'effet de creusement de tunnel sur la stabilité de déblai d'approche

La situation où deux ouvrages géotechniques, le déblai d'approche et le tunnel, sont situés dans la même zone d'action, c'est-à-dire, dans la zone de déblai d'approche du tunnel, est décrite dans l'ouvrage. L'effet de creusement de tunnel sur la stabilité de déblai d'approche est analysé. L'analyse de déformation basée sur le modèle numérique tridimensionnel, simulant le travail actuel sur le déblai d'approche et le tunnel, est présentée. La solution technologique pour réduire l'effet de creusement de tunnel sur la stabilité du talus dans la zone de déblai d'approche est également présentée.

Д. Милакович, М.С. Ковачевич

Обзорная работа

## Влияние выемки тоннеля на стабильность нагиба предзарубки

В работе описывается состояние, когда в зоне предзарубки тоннеля находятся две геотехнические конструкции, предзарубка и тоннель, в той же самой зоне действия. Дается ответ на вопрос влияния выемки тоннеля на стабильность нагиба предзарубки. Показывается расчёт деформаций примененем числовой трёхмерной модели, симулирующей действительный процесс выемки предзарубки и тоннеля, как и предложение технологических решений для снижения влияния выемки тоннеля на стабильность нагиба в зоне предзарубки.

D. Milaković, M. S. Kovačević

Übersichtsarbeit

## Einfluss des Tunnelausbruchs auf die Stabilität der Böschung des Voreinschnitts

Im Artikel beschreibt man den Zustand in dem sich im Gebiet des Tunnelvoreinschnitts zwei bodentechnische Konstruktionen, Voreinschnitt und Tunnel, im selben Wirkungsgebiet befinden. Man beantwortet die Frage über den Einfluss des Tunnelausbruchs auf die Stabilität der Böschung des Voreinschnitts. Dargestellt ist die Berechnung der Verformungen mit Hilfe eines numerischen dreidimensionalen Modells, womit der reale Prozess des Aushubs des Voreinschnitts und des Tunnels simuliert wird, sowie ein Vorschlag der technologischen Lösungen für die Minderung des Einflusses des Tunnelausbruchs auf die Stabilität der Böschung im Bereich des Voreinschnitts.

Autori: Mr sc. **Davor Milaković**, dipl. ing., Institut građevinarstva Hrvatske, Janka Rakuše 1, Zagreb;  
prof. dr. sc. **Meho Saša Kovačević**, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb

## 1 Uvod

Standardni proces projektiranja prometnica najčešće primjenjuje izradu zasebnih projekata trase i tunela pretpostavljajući minimalni utjecaj iskopa tunela na stabilnost pokosa u zoni predusjeka tunela. Međutim, kako se u zoni predusjeka tunela dvije geotehničke konstrukcije nalaze u istom području djelovanja postavlja se pitanje utjecaja iskopa tunela na stabilnost pokosa predusjeka.

Za navedeni utjecaj iskopa tunela na stabilnost predusjeka koji je detaljno analiziran u istoimenom magistarskom radu [1] upotrijebljen je numerički 3D model koji omogućava simulaciju ponašanja tla i stijenske mase upotrebom različitih konstitutivnih modela. Fazna je izvedba 3D numeričkog modela kontinuirani proces koji simulira stvarnu izgradnju građevine.

Proračun na odabranom modelu uzima u obzir sve relevantne faze izvedbe pokosa i tunela u zoni predusjeka.

Teorijske postavke analiza stabilnosti tunelskih otvora ovise i o metodama izvođenja tunela. Metoda izvođenja tunela koja je ovdje analizirana prepoznaje se u konceptu NATM-a, a zahtijeva medij dovoljne čvrstoće za aktivno sudjelovanje u stabilizaciji podzemnog iskopa.

Na temelju ovdje provedene 3D numeričke simulacije izvedbe pokosa predusjeka i tunela, te analize mjerenih slučajeva izvedenih tunela, u radu je predloženo niz tehnoloških rješenja kojima se posredno ili neposredno utječe na stabilnost pokosa predusjeka za izvedbe tunela i nakon nje.

## 2 Metode projektiranja geotehničkih konstrukcija

S obzirom na međusobno različite metode projektiranja geotehničkih konstrukcija tunela i pokosa usjeka, oni se najčešće promatraju i analiziraju u zasebnim projektima cjelinama. Tako se tijekom izrade projektne dokumentacije formiraju dva projekta, koji s jedne strane definiraju podgradni sklop za stabilizaciju tunelskog otvora i s druge strane zaštitne mjere za osiguranje stabilnosti pokosa. Navedeni proces izrade projektne dokumentacije nije upitan ako u fazi izvedbe postoji koordinacija geotehničkog nadzora izvedbe i praćenja ponašanja tunelskog otvora i pokosa u zoni predusjeka tunela. Međutim, inženjerska praksa pokazuje teškoće pri provedbi koordiniranoga rada geotehničkog nadzora ili čak neimenovanje geotehničkog nadzora u procesu izgradnje.

Prema Eurokodu 7 (CEN, 1997), tuneli i pokosi usjeka općenito pripadaju u 2. i 3. geotehnički razred što podrazumijeva složene i vrlo složene geotehničke konstrukcije [3]. Za analizu utjecaja iskopa tunela na stabilnost predusjeka primijenjen je pristup proračunom, upotrebom numeričkog 3D modela, te pristup mjerenjem i opažanjem kao potvrda primijenjenoga numeričkog modela [4] i [5].

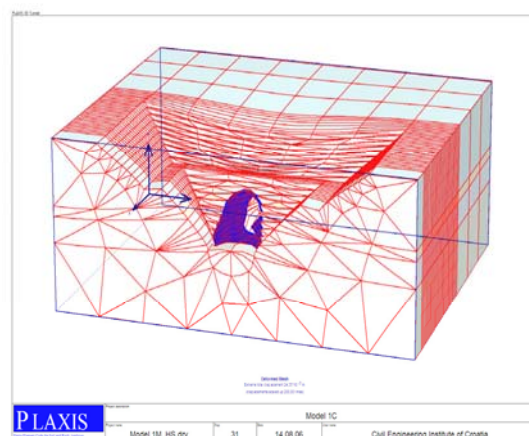
## 3 Analiza upotrebom numeričkog 3D modela

### 3.1 Definicija numeričkog modela

U okviru pristupa proračunom primijenjen je program konačnih elemenata Plaxis – 3D Tunnel [8] koji simulira ponašanje tla i stijenske mase koristeći se različitim modelima tla i stijene. Općenito, Plaxis je dvodimenzij-ski ili trodimenzijski program za analizu stabilnosti i deformacija geotehničkih konstrukcija. Primjena ovog programa daje napredne konstitutivne modele za simulaciju nelinearnog, vremenski ovisnog i anizotropnog ponašanja tla i stijenske mase. Osim toga, ovaj program omogućava analizu hidrostatskih i nehidrostatskih pomih tlakova te modeliranje podgrada tunela i zaštita pokosa.

Za preeliminarnu analizu, a koja ovdje nije prikazana, primijenjen je Mohr-Coulombov elastični idealno-plastični model. Međutim, ovaj model ne prepoznaje razliku između primarnog opterećenja i rasterećenja te daje ne-realno velike deformacije tijekom rasterećenja tla. Stoga je za predmetne analize upotrijebljen HS - *hardening soil* model (model ojačanja tla) koji pretpostavlja granicu popuštanja koja nije konstanta u prostoru glavnih naprezanja, već ima tendenciju povećanja elastične zone uzrokovane plastičnim deformacijama.

Metoda izvođenja tunela koja je ovdje analizirana prepoznaje se u konceptu NATM-a [9], a zahtijeva medij dovoljne čvrstoće za aktivno sudjelovanje u stabilizaciji podzemnog iskopa. NATM karakterizira iskop razradom profila tunela (npr. kalota, *benč* i podnožni svod) na međusobnim udaljenostima koje ovise o kvaliteti tla i stijenske mase.



Slika 1. Geometrija numeričkog modela

Karakteristični se poprečni presjek promatranog numeričkoga modela sastoji od sljedećih elemenata (slika 1.):

- tunelskog profila "potkovičastog" oblika
- bočnih pokosa predusjeka visine 10 m i nagiba 1:1

- berme širine 4 m koja dijeli ukupni pokos visine 20 m na dva jednaka dijela.

Osim toga, ovaj poprečni presjek simulira zaštitu iskopa tunela čeličnim cijevima (*pipe-roof*) koja je definirana poboljšanjem karakteristika tla u zoni kalote tunela. Visina modela je 33 m, što omogućava minimalni utjecaj rubnih uvjeta na stanje naprezanja i deformacija u modelu.

Profil samog tunela visine je 10,5 m i širine 10,0 m. Razrada profila analizira se uglavnom u tri faze iskopa i zaštite iskopa u tunelu:

- iskop kalote visine 4,5 m
- iskop *benča* visine 3,0 m
- iskop podnožnog svoda visine 3,0 m.

Napredovanje iskopa tunela prilagođeno je odabranim parametrima tla. Ovim modelom predviđeno je napredovanje od 1 m u kaloti i *benču* tunela, te 10 m u podnožnom svodu. Nakon svakog iskopa ugrađuje se mlazni beton na profil tunela i čelo iskopa tunela. Za provedenu analizu definirani su sljedeći parametri tla i podgradnih elemenata:

Tablica 1. Parametri osnovnog HS modela pjeskovite gline

Pjeskovita glina	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$E_{50}^{ref}$ N/m <sup>2</sup>	$E_{oed}^{ref}$ MN/m <sup>2</sup>	$E_{ur}^{ref}$ M/m <sup>2</sup>	$c^{ref}$ kN/m <sup>2</sup>	$\Phi^{\circ}$	$\psi^{\circ}$	$\nu_{ur}$	$P_{ref}$ kN/m <sup>2</sup>	$m$	$K_0^{nc}$
Drenirani i nedrenirani uvjeti	15	55	55	165	15	30	0	0,2	100	0,8	0,5

Tablica 2. Parametri poboljšanoj sloja pjeskovite gline

C-pipe roof	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$E_{50}^{ref}$ MN/m <sup>2</sup>	$E_{oed}^{ref}$ MN/m <sup>2</sup>	$E_{ur}^{ref}$ M/m <sup>2</sup>	$c^{ref}$ kN/m <sup>2</sup>	$\varphi^{\circ}$	$\psi^{\circ}$	$\nu_{ur}$	$P_{ref}$ kN/m <sup>2</sup>	$m$	$K_0^{nc}$
Drenirani i nedrenirani uvjeti	9	500	500	1500	100	40	0	0,2	100	0,5	0,35 7

Tablica 3. Parametri mlaznog betona

Mlazni beton	$EA$ kN/m	$EI$ kNm <sup>2</sup> /m	$d$ m	$w$ kN/m/m	$\nu$
Elastični model	3000000	22500	0,3	8,4	0,15

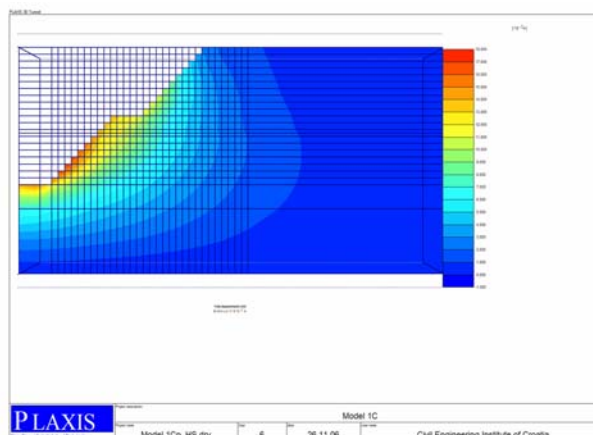
U zoni kalote tunela simulirana je ugradnja zaštitnih čeličnih cijevi (*pipe-roof*) poboljšanjem karakteristika pjeskovite gline debljine jednog metra.

Osim geotehničkih parametara tla u analizi utjecaja iskopa tunela na stabilnost pokosa predusjeka važno je prikazati i karakteristike deformabilnosti podgradnih elemenata u tunelu, u ovom slučaju mlaznog betona.

### 3.2 Analiza u dreniranim uvjetima

Drenirani uvjeti znače da postoji strujanje vode u tlu ili iz tla tijekom vremenskog razdoblja u kojem je došlo do promjena vanjskog opterećenja te tako ne dolazi do razvoja dodatnih pornih tlakova. U ovom radu analiza u dreniranim uvjetima pretpostavlja da promjene opterećenja

teku dovoljno sporo ili da su dovoljno dugo u tlu tako da ne dolazi do razvoja dodatnih pornih tlakova uzrokovanih promjenama opterećenja u modelu [11].



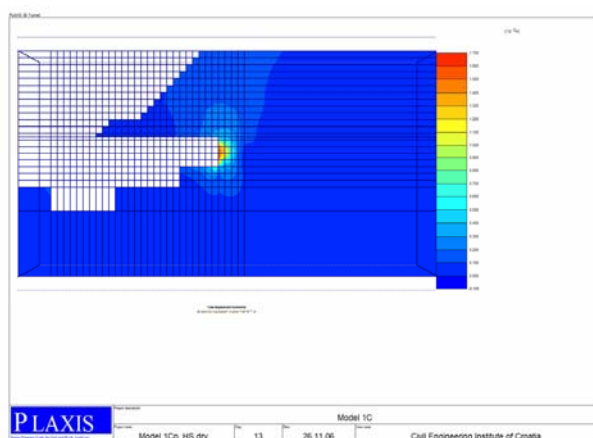
Slika 2. Iskop predusjeka u dreniranim uvjetima

Dijagram na slici 2. prikazuje ukupne pomake u dreniranim uvjetima na kraju iskopa pokosa predusjeka te simulira položaj formiranja klizne plohe na kraju ukupnog proce-

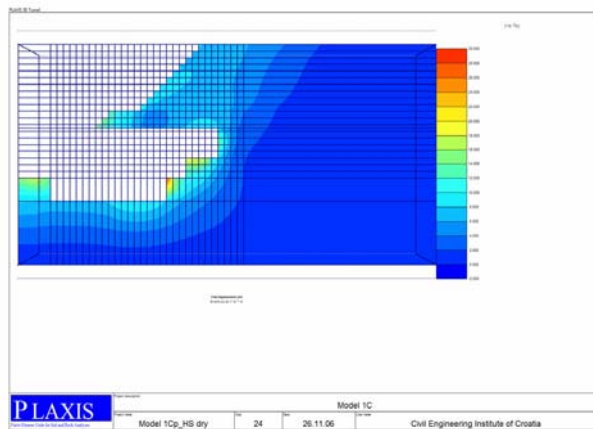
sa izvedbe predusjeka. Klizna ploha formirana je na donjem dijelu i dijelu gornjeg pokosa predusjeka.

Dijagram na slici 3. prikazuje prirast pomaka u dreniranim uvjetima za fazu iskopa kalote tunela bez ugradnje podgradnog sklopa. Položaj najvećih deformacija nalazi se na čelu iskopa kalote tunela, pri čemu nije uočljiv znatniji utjecaj na pokose predusjeka.

Dijagram na slici 4. prikazuje ukupne pomake u dreniranim uvjetima nakon posljednje promatrane faze ugradnje podgradnog sklopa u podnožni svod tunela. Ova analiza simulira položaj najvećih pomaka na kraju ukupnog procesa izvedbe. Zone najvećih pomaka obuhvaćaju iskop kalote, *benča* i podnožnog svoda. Uočljiv je manji utjecaj iskopa tunela na donji dio gornjeg pokosa predusjeka.



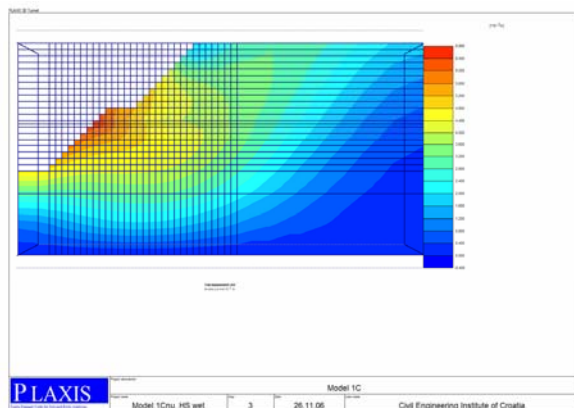
Slika 3. Iskop kalote tunela u dreniranim uvjetima



Slika 4. Završetak jednog ciklusa iskopa i ugradnje podgradnog sklopa u tunelu – drenirani uvjeti

### 3.3 Analiza u nedreniranim uvjetima

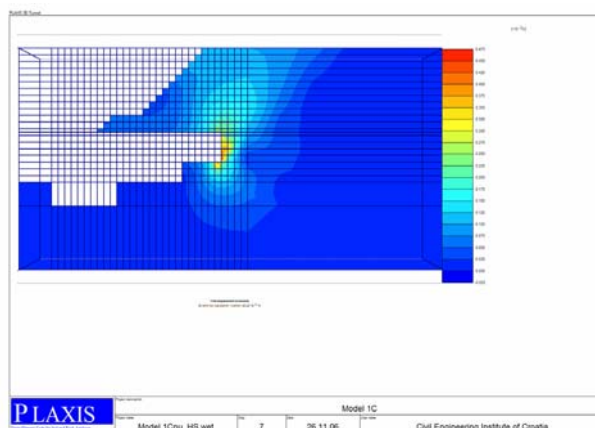
Nedrenirani uvjeti znače da nema strujanja vode u tlu ili iz tla tijekom razdoblja u kojem je došlo do promjena vanjskog opterećenja, pri čemu dolazi do razvoja dodatnih pomih tlakova. Stoga je u ovom radu primijenjena analiza u nedreniranim uvjetima pod pretpostavkom razvoja dodatnih pomih tlakova koji se javljaju zbog male propusnosti tla odnosno tamo gdje promjene opterećenja teku mnogo brže nego što voda može ući ili izaći iz tla.



Slika 5. Iskop predusjeka u nedreniranim uvjetima

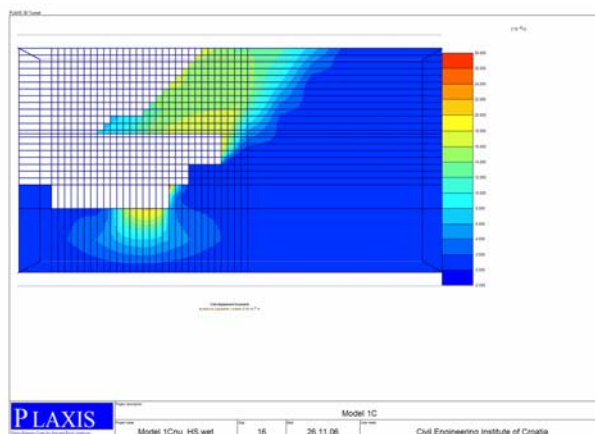
Dijagram na slici 5. prikazuje ukupne pomake u nedreniranim uvjetima kojima se simulira položaj formiranja klizne plohe tijekom izvedbe pokosa predusjeka. Klizna ploha formirana je uglavnom na donjem pokosu predusjeka.

Dijagram na slici 6. prikazuje prirast pomaka u nedreniranim uvjetima za iskop kalote tunela bez ugradnje podgradnog sklopa. Položaj najvećih deformacija nalazi se na čelu i podnožnom svodu iskopa kalote tunela, pri čemu nije uočljiv znatniji utjecaj na pokose predusjeka za promatrani položaj čela iskopa tunela.



Slika 6. Iskop kalote tunela u nedreniranim uvjetima

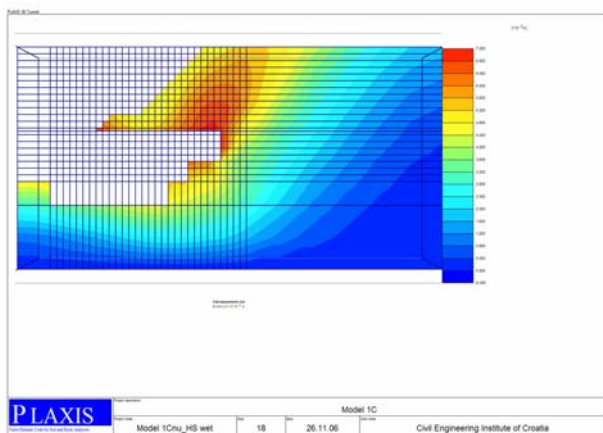
Dijagram na slici 7. prikazuje prirast pomaka u nedreniranim uvjetima za iskop podnožnog svoda tunela bez ugradnje podgradnog sklopa. Položaj najvećih deformacija nalazi se očekivano u zoni podnožnog svoda tunela, ali je uočljiv i utjecaj na širu zonu pokosa predusjeka.



Slika 7. Iskop podnožnog svoda tunela u nedreniranim uvjetima

Dijagram na slici 8. prikazuje ukupne pomake u nedreniranim uvjetima nakon posljednje promatrane faze iskopa podnožnog svoda i ugradnje mlaznog betona. Ova analiza simulira položaj najvećih pomaka tijekom te odmah nakon procesa izvedbe promatrane sekcije tunela. Zone najvećih pomaka obuhvaćaju cjelokupni dio tunela

u napredovanju zajedno s pripadajućim dijelom pokosa predusjeka.



Slika 8. Završetak jednog ciklusa iskopavanja i ugradnje podgradnog sklopa u tunelu – nedrenirani uvjeti

**Zaključak**

Iz navedenih analiza možemo zaključiti da je utjecaj iskopavanja tunela na stabilnost pokosa predusjeka za promatrani model pjeskovite gline u nedreniranim uvjetima veći u odnosu na drenirane uvjete.

**4 Potvrda numeričkog modela primjenom pristupa opažanja i mjerenja**

Ovaj pristup omogućuje da se na osnovi provedenih opažanja i mjerenja na terenu te povratnih analiza na modelu potvrdi ili eventualno korigira numerički model i procijenjeni geotehnički parametri.

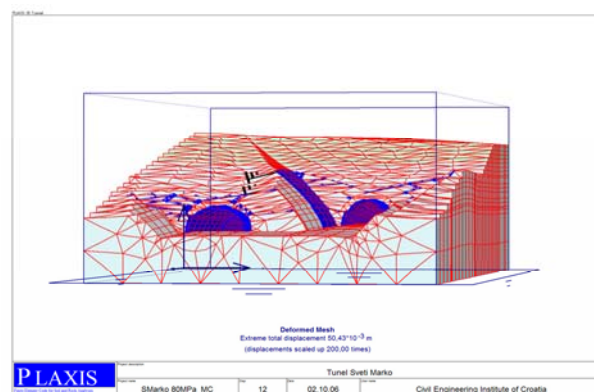
Odabran je primjer tunela Sveti Marko na autocesti Zagreb-Rijeka gdje su tijekom radova na iskopu istočnog predusjeka tunela provedena opsežna opažanja i mjerenja. Tunel se sastoji od dviju cijevi smještenih na osnoj udaljenosti od 25 m s nadslojem najveće visine 22 m. Izvedba varijante tunela umjesto usjeka u trasi odabrana

je zbog zahtjeva za očuvanjem groblja na površini terena. Osim tehnološki zahtjevne izvedbe tunela posebno složen geotehnički problem bila je i stabilizacija istočnog predusjeka tunela [12].

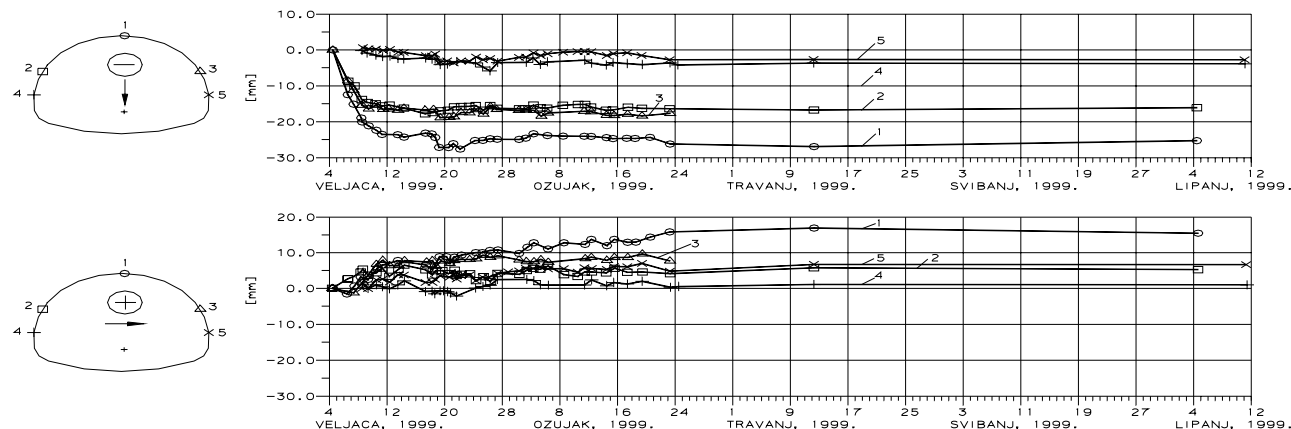
U geološkom smislu područje tunela i predusjeka izgrađeno je od dezintegriranih klastičnih naslaga zastupljenih mješavinama gline, pijeska, praha i odlomaka pješčenjaka. Ispod navedenog sloja, čija se debljina kreće od 10 do 20 m, nepravilno se pojavljuje sloj potpuno dezintegriranog dolomita s osnovnom stijenskom masom-dolomitima u podlozi. Za promatrani model na slici 9., kojim se analizira stvarni proces izvedbe predusjeka tunela Sveti Marko, definiran je površinski sloj gline i sloj klastičnih naslaga u podlozi. Analiza je provedena za drenirane uvjete i geotehničke parametre prema tablici 4.

Tablica 4. Parametri numeričkog modela predusjeka tunela Sveti Marko

Tip modela	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$E_{oed}^{ref}$ MN/m <sup>2</sup>	$E_{50}^{ref}$ MN/m <sup>2</sup>	$c^{ref}$ kN/m <sup>2</sup>	$\phi^0$
Glina kvartara	20	15	15	25	25
Klastična serija	22	55	55	50	25



Slika 9. Geometrija numeričkog modela predusjeka tunela Sv. Marko



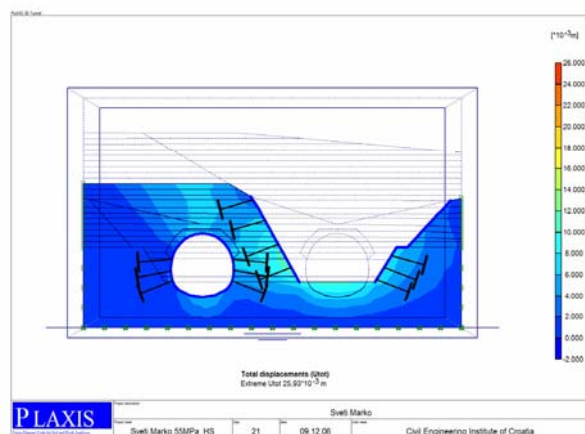
Slika 10. Rezultati kontrolnih mjerenja u zoni predusjeka lijeve cijevi tunela Sveti Marko [12]

Potpuna kontrola ponašanja geotehničke konstrukcije na terenu ostvarena je na osnovi dnevnih opažanja i analiza rezultata kontrolnih mjerenja. Kontrolni mjerni profili ugrađivali su se neposredno nakon iskopa *benča* na prosječnoj udaljenosti 6 m od čela kalote iskopa tunela.

Dodatni podgradni zahvati na stabilizaciji portalnog dijela lijeve tunelske cijevi karakteristični su primjer intervencije na osnovi rezultata kontrolnih mjerenja. U portalnom su dijelu lijeve tunelske cijevi na prva dva kontrolna mjerna profila tijekom napredovanja iskopa tunela registrirani pomaci svih mjernih točaka u smjeru predusjeka desne tunelske cijevi (slika 10.).

Interventno su u lijevom zidu tunela ugrađena dodatna IBI sidra duljine od 9 do 12 m. Nakon ugradnje sidara došlo je do stabilizacije i prestanka pomaka [12].

Prethodni rezultati kontrolnih mjerenja u zoni predusjeka lijeve tunelske cijevi potvrđeni su i rezultatima analize pomaka na slici 11. S obzirom da se smjerovi i rezultati pomaka na promatranom profilu numeričkog modela podudaraju s rezultatima izmjerenih pomaka na istom kontrolnom profilu tunela na terenu, potvrđena je ispravnost numeričkog modela te opravdanost intervencije primjenom dodatnih mjera na stabilizaciji tunela i predusjeka.

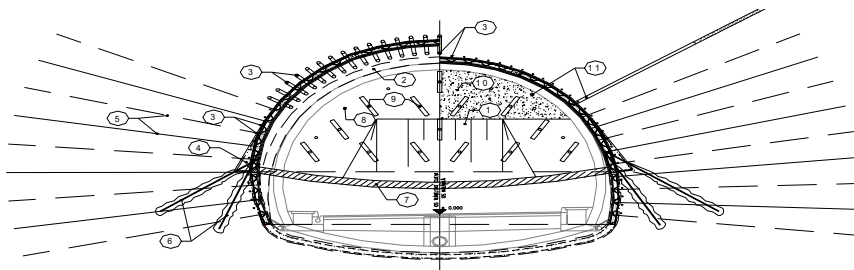


Slika 11. Prikaz ukupnih pomaka na modelu predusjeka tunela Sveti Marko

## 5 Prijedlog tehnoloških rješenja za smanjenje utjecaja iskopa tunela na stabilnost pokosa predusjeka

Na temelju analize mjerenih slučajeva izvedenih tunela te prikazane trodimenzijske numeričke simulacije izvedbe predusjeka i tunela na promatranom modelu, moguće

je izdvojiti niz elemenata kojima se posredno ili neposredno utječe na stabilnost pokosa predusjeka za izvedbu tunela i nakon nje (slika 12.):



Slika 12. Tehnološka rješenja dodatnog osiguranja iskopa tunela

- a) vrijednost geotehničkih parametara pojedinih slojeva tla i stijenske mase te njihov raspored;

Tehnološka rješenja - poboljšanja geotehničkih parametara pojedinih slojeva tla i stijenske mase moguće je postići na sljedeći način:

- ugradnjom čeličnih sidara većih duljina (5)
- injektiranjem pojedinih slojeva tla oko tunela (6)
- iskopom uz prethodno „zamrzavanje tla“
- iskopom pod zaštitom komprimiranog zraka

- b) inicijalnu stabilnost čela iskopa tunela

Tehnološka rješenja - inicijalnu stabilnost čela iskopa moguće je postići:

- izvedbom zaštitne zemljane jezgre na čelu iskopa tunela (1)
- ugradnjom zaštitnih cijevi u kaloti tunela (3)
- injektiranjem čela iskopa tunela (8)
- ugradnjom čeličnih sidara na čelo tunela (9)
- ugradnjom adekvatnog sloja mlaznog betona na čelo iskopa tunela (10)

- c) duljinu i površinu napredovanja pojedinih faza iskopa tunela

Tehnološka rješenja - utjecaj duljine napredovanja i ploštine iskopa moguće je kontrolirati na sljedeći način:

- izvedbom zaštitne zemljane jezgre na čelu iskopa tunela (1)
- povećanjem debljine mlaznog betona (2)
- ugradnjom zaštitnih cijevi u kalotnom dijelu tunela (3)
- osiguranje nožice iskopa kalote tunela (4)
- primjenom višefaznog iskopa kalote tunela

d) udaljenost pojedinih faza iskopa tunela (kalota, *benč* i podnožni svod)

Tehnološka rješenja - utjecaj udaljenosti pojedinih faza iskopa moguće je kontrolirati:

- ugradnjom privremenih zakrivljenih podnožnih svodova od mlaznog betona na dijelu kalote i *benča* (7)
- primjenom višefaznog iskopa kalote tunela

e) nedrenirani uvjeti na čelu iskopa tunela;

Tehnološka rješenja - drenirane uvjete tijekom iskopa tunela moguće je postići:

- ugradnjom drenažnih cijevi u svodu i na čelu iskopa tunela (8, 11)
- ugradnjom drenažnih cijevi većih duljina na pokosima predusjeka

f) nagib pokosa predusjeka

Tehnološka rješenja - smanjenje utjecaja nagiba pokosa predusjeka moguće je postići na sljedeći način:

- ublažavanjem nagiba pokosa predusjeka (ako je to racionalno i dopušteno s obzirom na postojeće građevine)
- ugradnjom dodatnih podgradnih mjera na pokose predusjeka

g) nivo podzemne vode (sušno i kišno razdoblje)

Tehnološka rješenja - smanjenje razine podzemnih voda moguće je postići:

- ugradnjom bunara za crpenje vode na površini terena
- ugradnjom drenažnih cijevi na pokose predusjeka
- izvlačenjem vode iz područja predusjeka vakuumom.

## 6 Zaključak

Iskop tunela, osobito za nedrenirane uvjete u tlu, u velikom broju slučajeva znatno utječe na stabilnost pokosa predusjeka. Za cjelovitu projektnu analizu tog utjecaja poželjno je koristiti se sljedećim elementima:

- proračunom s upotrebom numeričkog 3D modela
- jedinstvenim geometrijskim modelom koji obuhvaća pokose i ulazni dio tunela predusjeka
- hardening soil modelom (modelom ojačanja tla) koji optimalno opisuje ponašanje tla prilikom opetovanih ciklusa iskopa i podgrađivanja tunela
- analizom u dreniranim i nedreniranim uvjetima
- analizom u sušnom i kišnom razdoblju
- analizom koja simulira sve faze iskopa predusjeka i ugradnje podgradnog sklopa u tunelu
- prijedlogom tehnoloških rješenja za smanjenje utjecaja iskopa tunela na stabilnost pokosa predusjeka.

## LITERATURA

- [1] Milaković, D.: *Analiza utjecaja iskopa cestovnih tunela na stabilnost pokosa predusjeka*, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [2] CEN: Eurokod 7: *Geotehničko projektiranje – 1.dio: Opća pravila* (ENV 1997-1:1994.), Bruxelles, 2001.
- [3] Orr, T.L.L.; Farrell, E. R.: *Geotechnical Design to Eurocode 7*, 1st edn, Springer Verlag, London, 1999.
- [4] Hoek, E.; Brown, E. T.: *Underground excavations in rock*, 1st edn, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.
- [5] Bieniawski, Z. T.: *The Design Process in Rock Engineering*, Rock Mechanics and Rock Engineering 17 (1984), 183-190.
- [6] ITA Working Group on General Approaches to the Design of Tunnels: *Guidelines for the design of tunnels*, Tunnelling and Underground Space Technology 3 (1988) 3, 237-249.
- [7] Stojković, B.: *Osiguranje stabilnosti primarne podgrade cestovnih tunela u sedimentnim stijenama*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [8] Brinkgreve, R. B. J.; Vermeer, P. A.: *Plaxis 3D Tunnel*, Version 1, Balkema Publishers, Netherlands, 2001.
- [9] Sauer, G.: *NATM in Soft Ground*, World Tunnelling 3 (1990) 6, 431-437.
- [10] Poisel, R.: *Concepts of NATM*, Summercourse No. 5, IACES Bureau of Vienna, Vienna, 1995.
- [11] Duncan, J. M.; Wright S. G.: *Soil Strength and Slope Stability*, 1st edn, John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.
- [12] Stojković, B.; Stanić, B.; Kovačević, M. S.: *Cutting protection at the entrance of a tunnel passing through unstable slopes*, 15th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Istanbul, 2001.