

ЗБОРНИК РАДОВА

4. српски конгрес о путевима, 2-3. јун 2022.

PROCEEDINGS

4th Serbian Road Congress, June 2-3, 2022

Издавач

Српско друштво за путеве "Via Vita"
Булевар Пека Дапчевића 45, 11000 Београд

За издавача

Биљана Вуксановић, дипл. инж. грађ.

Уредници

проф.др Владан Тубић
Доц.др Сања Фриц, дипл.инж.грађ.

Графички дизајн

Омнибус, Београд

Штампа

Вега, Београд

Тираж

300

ISBN 978-86-88541-14-5

CIP - Каталогизација у публикацији -
Народна библиотека Србије, Београд

625.7/.8(082)(0.034.2)

СРПСКИ конгрес о путевима (4 ; 2022)

Зборник радова [Електронски извор] / 4. српски конгрес о путевима, 2-3. јун 2022 = Proceedings / 4th Serbian Road Congress, June 2-3, 2022 ; [уредници Владан Тубић, Сања Фриц]. - Београд : Српско друштво за путеве "Via Vita", 2022 (Београд : Вега). - 1 електронски оптички диск (DVD) ; 12 cm

Системски захтеви: Нису наведени. - Насл. са насловне стране документа.
- Тираж 300. - Напомене и библиографске референце уз текст. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-86-88541-14-5

а) Путеви -- Зборници

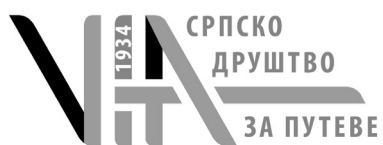
COBISS.SR-ID 66633993

ЗБОРНИК РАДОВА

4. српски конгрес о путевима, 2-3. јун 2022.

PROCEEDINGS

4th Serbian Road Congress, June 2-3, 2022



Српско друштво за путеве "Via Vita"
Београд, 2022. година

GEOTEHNIČKI USLOVI IZGRADNJE TUNELA „DEBELO BRDO“ NA AUTOPUTU E-80 NIŠ - PLOČNIK

Dragoslav Rakić¹, Radojica Lapčević², Irena Basarić Ikodinović³, Dragan Lukić⁴

¹ Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, Beograd, dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs

² Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, Beograd, radojica.lapcevic@rgf.bg.ac.rs

³ Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, Beograd, irena.basarić@rgf.bg.ac.rs

⁴ Univerzitet u Novom Sadu – Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, drlukic.lukic@gmail.com

Rezime: Tunel „Debelo brdo“ nazvan je po najizraženijem reljefnom obliku na ovoj drugoj deonici autoputa E-80 Niš – Pločnik. Osnovnu geološku građu na lokaciji tunela čini Mio-Plioceni kompleks heterogenog litološkog sastava. Izgradnja tunela je predviđena delom u otvorenom iskopu dužine 240 m, a delom sa podzemnim iskopom dužine 190 m. U zoni tunela, padina je okarakterisana kao uslovno stabilna, pa bi neadekvatna zasecanja mogla da izazovu klizanja terena. Iz tih razloga, u okviru rada posebno su prikazani geotehnički uslovi izgradnje tunela u otvorenom iskopu (predviđeno je osiguranje privremenog iskopa ugradnjom šipova), a posebno geotehnički uslovi tunelskog iskopa sa delimično modifikovanim modelom u odnosu na predloženo projektno rešenje.

Ključne reči: Tunel „Debelo brdo“, Geotehnički parametri, Privremene kosine, Šipovi, Podgrada.

GEOTECHNICAL CONDITIONS FOR THE CONSTRUCTION OF „DEBELO BRDO“ TUNNEL ON THE HIGHWAY E-80 NIŠ - PLOČNIK

Dragoslav Rakić¹, Radojica Lapčević², Irena Basarić Ikodinović³, Dragan Lukić⁴

¹ University of Belgrade – Faculty of Mining and Geology, Djusin 7, Belgrade, dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs

² University of Belgrade – Faculty of Mining and Geology, Djusin 7, Belgrade, radojica.lapcevic@rgf.bg.ac.rs

³ University of Belgrade – Faculty of Mining and Geology, Djusin 7, Belgrade, irena.basarić@rgf.bg.ac.rs

⁴ University of Novi Sad – Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaracka 2a, drlukic.lukic@gmail.com

Abstract: The "Debelo brdo" tunnel is named after the most pronounced relief form on this second section of the E-80 Nis - Pločnik highway. The basic geological structure at the location of the tunnel consists of the Mio-Pliocene complex of heterogeneous lithological composition. The construction of the tunnel is partly planned in an open excavation 240 m long, and partly with an underground excavation 190 m long. In the tunnel zone, the slope is characterized as conditionally stable, so inadequate cuts could cause sliding of the terrain. For these reasons, the paper presents separately the geotechnical conditions for the construction of the tunnel in open excavation (temporary excavation securing by installing piles is provided), and the geotechnical conditions for tunnel excavation with a partially modified model in relation to the proposed design solution.

Keywords: „Debelo brdo“ tunnel, Geotechnical parameters, Temporary slopes, Piles, Tunnel support.

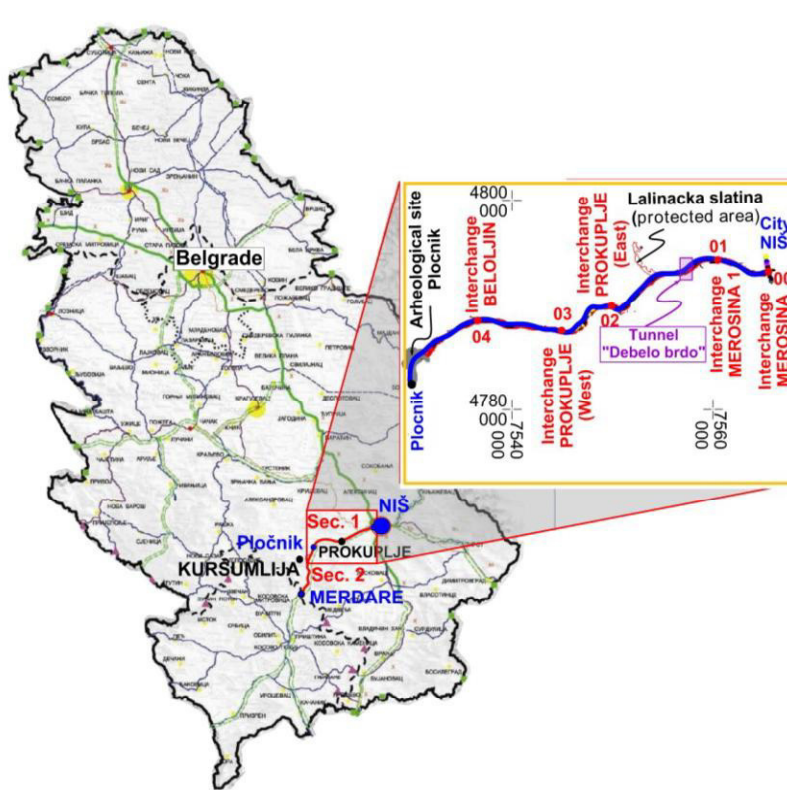
1. UVOD

Izgradnja autoputa E-80 od Niša do Merdara, a time i deonice od Niša do Pločnika, je od posebnog ekonomskog i društvenog interesa za R. Srbiju i Toplički kraj. Ovaj autoput predstavljaće saobraćajno čvorište zapadnog Balkana i biće deo glavne regionalne transportne mreže jugoistočne Evrope. Ukupna dužina trase autoputa je 77 km, i podeljena je na dve deonice. Prva deonica kreće od isključenja sa autoputa E-75 (petlja Merošina), a završava se kod neolitskog naselja Pločnik (Beloljin). Preostali deo trase pripada drugoj deonici od Pločnika do Meradara.

Tunel „Debelo brdo“ se gradi u sklopu prve deonice autoputa Niš (Merošina) – Pločnik (Beloljin) čija je ukupna dužina 36.3 km. Nazvan je po samom brdu koje predstavlja najizraženiji reljefni oblik na drugoj sekciji autoputa Merošine 1 – Prokuplje istok, dužine 8.63 km (km: 5+670 – km: 14+300), sa stacionažom tunela na km: 9+380 do km: 9+810 (Slika 1). Približne kote površine terena u zoni ulaznog portala su oko 300 m, a na izlaznom delu oko 318 m, dok je najviša kota iznad tunelske cevi oko 328 m (približna stacionaža km: 9+700). Na padini, u zoni tunela, usečene su jaruge, dubine 3-4 m. Generalni nagib padine je oko 8 do 10⁰. Pružanje padine je približno paralelno tunelskoj osovini, izuzimajući priportalne zone tunela. Uopšteno se može reći da je jedan deo padine na kome je planirana izgradnja tunela okarakterisan kao uslovno stabilan, pa bi neadekvatna zasecanja mogla da izazovu klizanja terena.

¹ Dragoslav Rakić: dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs

Projektom je predviđena izgradnja jedne tunelske cevi sa približnim poprečnim presekom oko 85 m². Kolovozna konstrukcija u tunelu je projektovana pod nagibom od oko 4%. Visina otvorenog dela tunela u odnosu na kolovoznu konstrukciju je oko 8.3 m, dok se konstruktivna visina kreće od 10.9 – 11.9 m, ne računajući zaštitnu potpornu konstrukciju. Izgradnja tunela predviđa se delom u otvorenom iskopu (km: 9+390 do km: 9+580 i od km: 9+770 do km: 9+800), a delom sa podzemnim iskopom (km: 9+580 do km: 9+770).



Slika 1. Trasa autoputa sa karakterističnim detaljima na deonici Niš-Pločnik

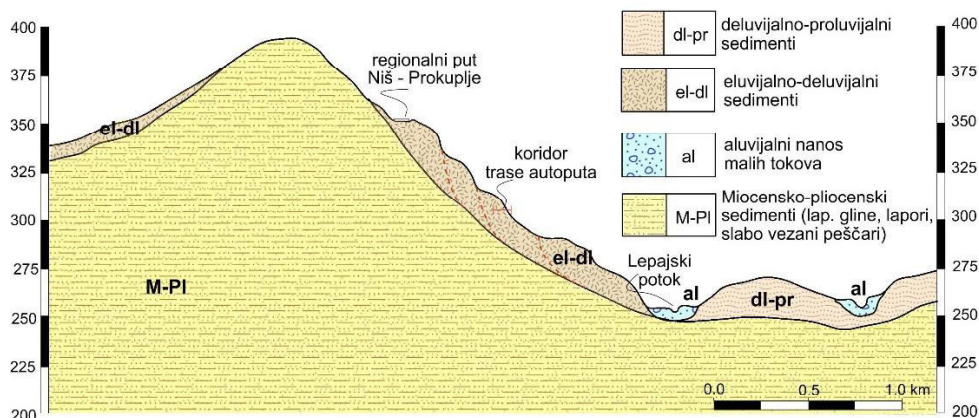
2. OPŠTI PRIKAZ GEOTEHNIČKIH KARAKTERISTIKA TERENA

Za definisanje geološke građe i geotehničkih karakteristika terena na lokaciji tunela, izveden je zavidan obim terenskih i laboratorijskih istraživanja [1,2,7]. Od terenskih istraživanja, značajno je pomenuti istraživanja koja se odnose na šire područje trase autoputa koja su omogućila registrovanje krupnih – regionalnih struktura i dali ulazne podatke za ocenu seizmičke aktivnosti i njen uticaj na građenje tunela „Debelo brdo“. To se pre svega odnosi na: fotogeološku analizu satelitskih snimaka sa izradom studije rupturnog sklopa i geomorfoloških pojava na čitavoj trasi autoputa i prikazom eventualnih pojava nestabilnosti, neotektonsku i seizmogeološku analizu, definisanje seizmičkog hazarda i određivanje projektnih parametara seizmičnosti, reinterpretaciju postojeće inženjerskogeološke karte i izradu inženjerskogeološke karte ograničenja u razmeri 1 : 25000.

Geološku građu na lokaciji tunela „Debelo brdo“ čine mlađi Neogeni brežuljkasti tereni nizvodno od Prokuplja. Kompleks je lociran severoistočno od Prokuplja, i odgovara gornjem Miocenu i donjem Pliocenu, pa je izdvojen kao Mio-Plioceni kompleks heterogenog litoškog sastava. U površinskom delu dominiraju laporovite gline zone raspadanja (u zoni tunela „Debelog brda“ debljina kore površinskog raspadanja je preko 10 m), a osnovu čine lapori sa ređim proslojcima prašine i sitnozrnog peska, dok se povremeno javljaju i tanji proslojci peščara [3,4]. U zoni ulaznog portala tunela, na severnim padinama Debelog Brda, utvrđene su pojave aktivnog klizanja kao i uslovno nestabilni tereni, čije su reljefne forme karakteristične za umirena klizišta (Slika 2). Nestabilnosti su karakteristične za mekše neogene terene koji su u površinskom delu zahvaćeni procesima površinskog raspadanja, tako da u slučaju većih zemljanih iskopa može doći do reaktiviranja procesa klizanja, pa i uticaja na projektovanu trasu tunela.

Širi prostor lokacije tunela prekriven je kvartarnim sedimentima različitog genetskog porekla: deluvijalno-proluvijalnog, eluvijalno-deluvijalnog i proluvijalnog. Površina terena je ispresecana potočnim dolinama koje

su u donjim tokovima po pravilu odlagale proluvijalne sedimente izrazito heterogenog i nesortiranog materijala sa karakterističnim haotičnim ili ukrštenim smenama unutar različitih litoloških članova (prašinate peskove i prašinate gline, a znatno ređe peskove i šljunkove).



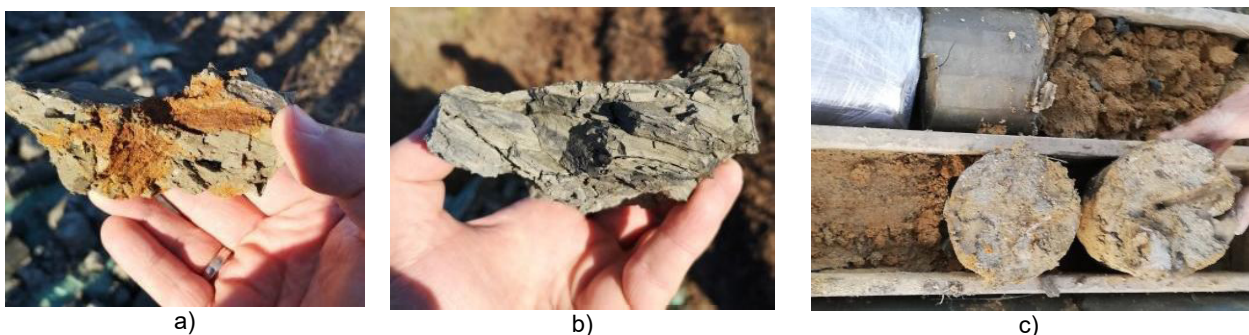
Slika 2. Karakterističan inženjerskogeološki presek neogenih brežuljkastih terena (km: 9+000 - km: 12+000)

Duž trase tunela sa podzemnim iskopom dužine oko 190 m (st. km 9+580 do st. km 9+770), izdvojene su dve geotehničke kvazihomogene zone: GTZ-1 i GTZ-2 [5,6].

Prva geotehnička zona (GTZ-1) predstavlja koru površinskog raspadanja lapora i peščara u kojoj dominiraju prašinate laporovite gline. Povremeno se javljaju i karbonatne konkrecije kao i tanji proslojci prašinstog materijala, a registrovane su i organske materije sa mogućim pojavama tankih fragmenata uglja. Ova sredina izgrađuje teren u povlatnom delu iznad tunela, debljine je od 10 – 13 m, a njena granica približno prati površinu terena. Sredina je intenzivno limonitisana sa dominantnom mrvičastom strukturom, ređe masivnom (Slika 3a). U pitanju je sredina tvrdo-plastičnog do polutvrđog konzistentnog stanja izrazito visoke plastičnosti. Kada je duže izložena atmosferskim uticajem, lako se raspada, drobi i mrvi.

Druga geotehnička zone (GTZ-2) izgrađena je od lapora glinovitog lokalno prašinsto-peskovitog, i predstavlja osnovnu stensku masu u kojoj će se izvesti kompletan iskop za tunel. U prirodnim uslovima teško se lomi, a prelom je različit, uglavnom hrapav i bez sjaja zbog većeg sadržaja prašinstih i peskovitih frakcija. Najčešće je polutvrđog konzistentnog stanja, teško gnječiv, većim delom prslinski je izdeljena u sitne monolite cm dimenzija po kojima se lako cepa i odvaja (Slika 3b), lokalno je masivan. Kada je sloj duže izložen atmosferskim uticajem, lako se raspada i drobi do fragmenata mm-cm dimenzija.

Ono što posebno karakteriše lokaciju tunela, jeste da je samo u jednoj bušotini utvrđena pojava čistog zasićenog peska na dubini od oko 12 m (Slika 3c), dok su u drugim bušotinama konstatovane zone sa povećanim sadržajem prašinstih frakcija, a povremeno se na većim dubinama, vrlo retko javljaju i sitni komadi čistog laporca, odnosno „lakog“ peščara koji zbog svoje mase podseća na tuf, a konstatovan je na samoj površini terena.

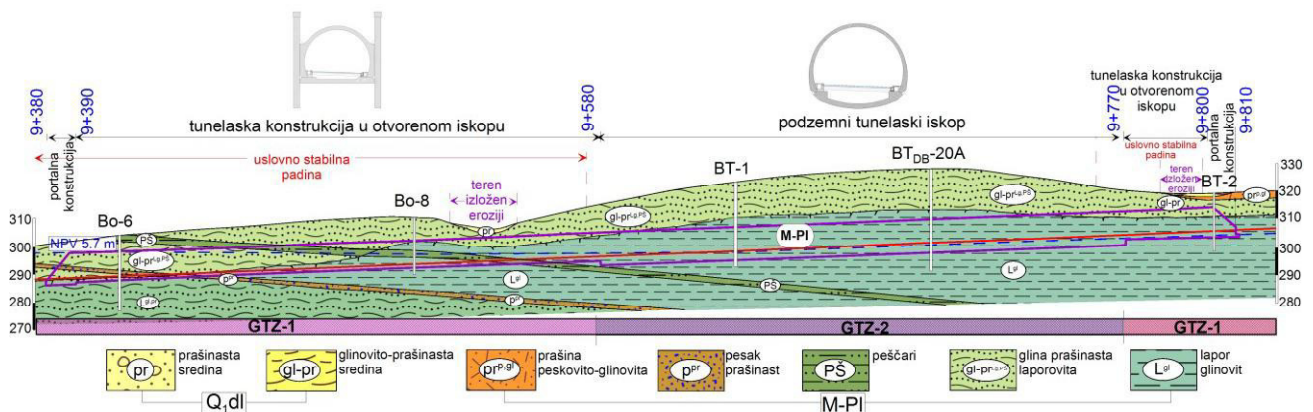


Slika 3. Makroskopski izgled laporovitih gline, glinovitih lapora i proslojka peska

U dve istražne bušotine ugrađene su pijezometarske konstrukcije, u kojima su redovno vršena osmatranja, tako da je utvrđen nivo podzemne vode. Pijezometarski nivo kretao se u intervalu od 5.5 – do 13.5 m, što

ukazuje da se filtracija vode obavlja niz padinu ka Lepajskom potoku i Krajkovačkoj reci (uopšteno morfologija terena je promenljiva, a NPV se kreće u intervalu kota 300 – 307 m). U vreme izvođenja terenskih istražnih radova (novembar-decembar 2019. god), nivo podzemne vode bio je približno u visini nivelete tunela ili neposredno ispod nje. U jednoj bušotini je ustanovljeno da je voda pod pritiskom, što može biti i jedan od razloga aktivnog klizanja terena na ovoj padini (u nožici registrovanih klizišta koja su van trase tunela, utvrđeno je i dreniranje vode iz padine, a konstatovana su i manja zabarenja, bez obzira na duži sušni period tokom 2019 god).

Podužni geotehnički presek terena, sa izdvojenim geotehničkim zonama, prognoznim nivoom podzemne vode, položajem nivelete tunela kao i predloženim načinom iskopa, prikazani su na Slici 4.



Slika 4. Podužni geotehnički presek duž ose tunela „Debelo brdo“

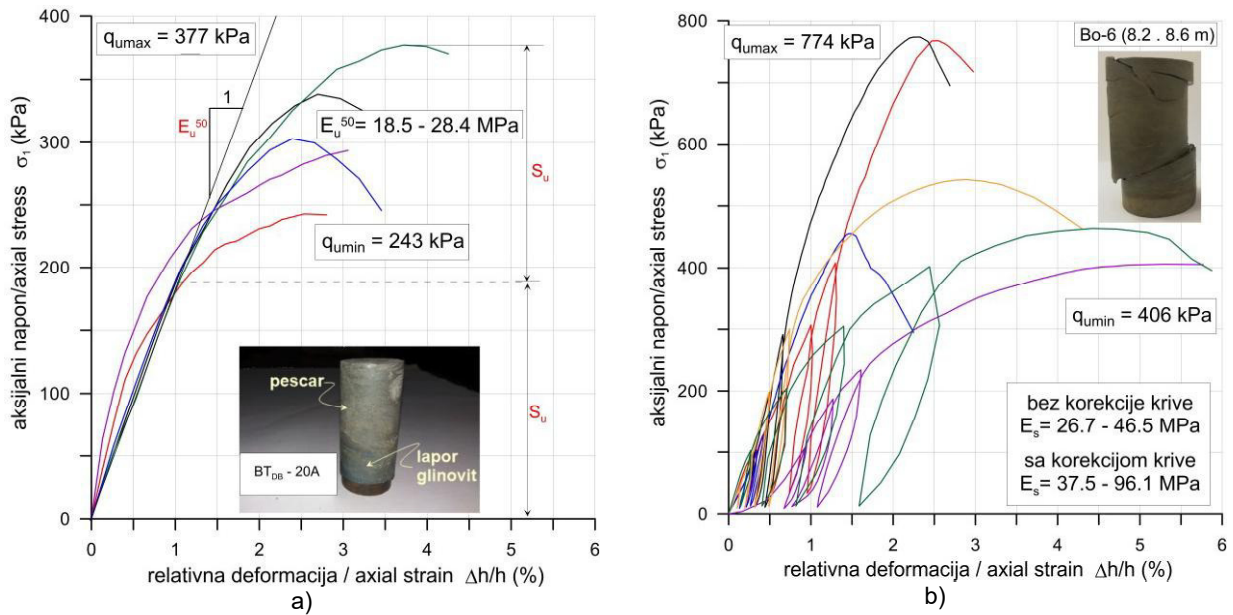
3. DEFINISANJE FIZIČKO-MEHANIČKIH PARAMETARA

Najznačajniji istražni radovi koji su izvedeni duž trase tunela, prikazani su u Tabeli 1.

Tabela 1. Geotehnička istraživanja izvedena na lokaciji tunela „Debelo brdo“

Inženjerskogeološko kartiranje	Detaljna inženjerskogeološka karta (1 : 2500)
Istražno bušenje – 6 bušotina	Ukupne dužine bušenja od 146 m (min. dubina bušotine 12 m, a maksimalna 36.5 m)
Uzet je 31 uzorak tla i mekših stenskih masa, i na njima su urađena laboratorijska geomehanička ispitivanja	
Opiti standardne penetracije – 8 SPT opita	
Dilatometarski opit - 1 opit	
Izvedene su dve pijeziometarske konstrukcije	
Geofizička istraživanja	10 geoelektričnih sondi (ES-23 do ES 32), Refrakciona ispitivanja su urađena duž 3 profila (SP-7 do SP-9)
Izvršena su mineraloško - petrološka ispitivanja	
Urađena su i hemijska ispitivanja na uzorcima podzemnih voda	

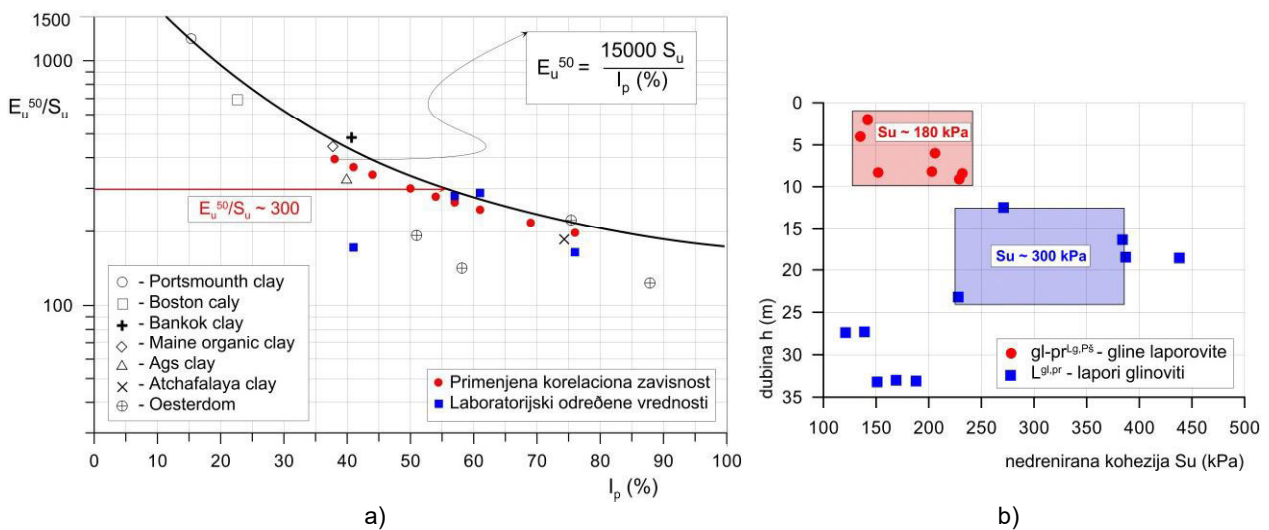
Laboratorijskim ispitivanjima je za glinovito-laporoviti Mio-Plioceni kompleks utvrđeno da se radi o materijalima ekstremno visoke plastičnosti sa granicom tečenja koja je na nekim uzorcima iznosila i preko 110%. S obzirom da je kod većine uzoraka indeks konzistencije bio veći od 1 ($I_c > 1.0$), može se reći da su materijali uglavnom u čvrstom stanju konzistencije, sa jednoaksijalnom čvrstoćom pritiska $q_u > 250$ kPa. Međutim, povremene pojave lamina peščara (debljine 10 – 20 cm), kao i zone slabije raspadnutog lapora, kao i pojave tanjih lamina laporca, imale su znatan uticaj na povećanje vrednosti jednoaksijalne čvrstoće na pritisak. Ispitivanja su obavljena u skladu sa odgovarajućim standardom (Slika 5a), ali je primenjena i nestandardna metoda, koja je podrazumevala nekoliko ciklusa rasterećenja i ponovnog opterećenja pri nižim vrednostima aksijalnog pritiska (Slika 5b). Iz tih razloga utvrđen je i znatno širi interval vrednosti q_u koji se krtao od $q_u = 243 – 774$ kPa.



Slika 5. Karakteristični dijagrami za standardne i nestandardne jednoaksijalne opite

Nedrenirana čvrstoća smicanja, dobijena je iz rezultata jednoaksijalnih opita, kao i na osnovu određenih korelacionih zavisnosti sa rezultatima SPT opita. Nedrenirana čvrstoća smicanja s_u za laporovite gline prašinate ($gl-pr^{L-g,Ps}$) kreće se u intervalu od $S_u = 121 - 237$ kPa, a za lapore glinovite lokalno prašinate ($L^{gl,pr}$) $S_u = 228 - 387$ kPa.

Zbog izrazite heterogenosti sredine, vrednost nedreniranog modula elastičnosti kretale su se u veoma širokom intervalu od $E_u = 29.7$ do preko 70 MPa. Usvajanjem nedrenirane čvrstoće smicanja za laporovite gline prašinate ($gl-pr^{L-g,Ps}$) od $s_u = 180$ kPa, a za lapore glinovite lokalno prašinate ($L^{gl,pr}$) $s_u = 300$ kPa, na osnovu veze koju su predložili Duncan i Buchignami (1976), dobijaju se vrednosti nedreniranog modula elastičnosti u rasponu od $E_u = 33.0 - 57.0$ MPa za laporovite gline, odnosno od $E_u = 55.0 - 89.0$ MPa za lapore glinovite (Slika 6). Treba napomenuti da su na lokaciji tunela izvedena i geofizička ispitivanja, i da su na osnovu određenih korelacionih zavisnosti između brzine prostiranja talasa i gustine tla, za tri geodinamička profila terena, dobijene vrednosti modula elastičnosti u intervalu od $E_{u1} = 35 - 69$ MPa; $E_{u2} = 35 - 82$ MPa i $E_{u3} = 45 - 69$ MPa, koje se dosta dobro slažu sa prikazanim vrednostima dobijenim na osnovu korelacionih zavisnosti. Deformabilne karakteristike ovih Mio-Pliocenih sredina (parametri stišljivosti i konsolidacije), definisane su i u edomaterskaom aparatu. Primenom poznate veze M_v i E_u dobijene su vrednosti modula elastičnosti od $E_u = 45 - 66$ MPa, tako da i one odgovaraju već prikazanim vrednostima.



Slika 6. Karakteristične vrednosti nedrenirane čvrstoće smicanja i nedreniranog modula elastičnosti

Efektivni parametri čvrstoće smicanja na materijalima iz laporovitog kompleksa, određeni su iz opita direktnog smicanja i triaksijalnih opita. Ono što je posebno interesantno to je izražena subhorizontalna

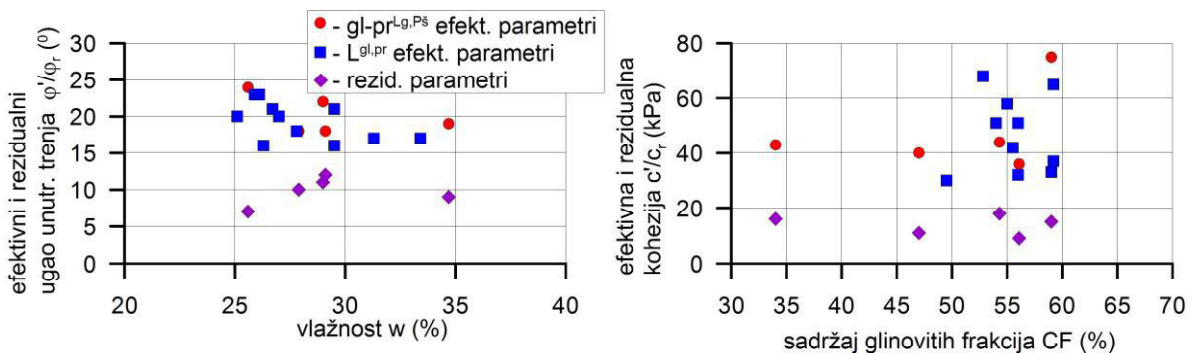
ispugalost (anizotropija), bez jasno izraženih kliznih površina prilikom triaksijalnih ispitivanja, što je predstavljalo poseban problem prilikom interpretacije ovih rezultata (Slika 7).



Slika 7. Izgled uzoraka bez jasno definisanih površina smicanja nakon ispitivanja u triaksijalnom aparatu

Parametri čvrstoće smicanja, bez obzira na korišćenu metodu ispitivanja, su dosta različiti, i kreću se u veoma širokim intervalima, kako za sloj laporovite gline prašinate (gl-pr^{Lg.Ps}) tako i za sloj lapora glinoviti lokalno prašinate (L^{gl.pr}). Ovo se naročito odnosi na efektivnu koheziju, čije su se vrednosti za laporovite gline prašinate (gl-pr^{Lg.Ps}) kretale u intervalu $c' = 40.0 - 75.0$ kPa sa uglovima unutrašnjeg trenja od $\varphi' = 18-22^\circ$ odnosno, za lapor glinoviti lokalno prašinate (L^{gl.pr}) $c' = 32.0 - 58.0$ kPa, a $\varphi' = 21-23^\circ$.

Kako je u neposrednoj zoni lokacije tunela utvrđeno i aktivno klizište, a teren je u jednom većem delu okarakterisan kao potencijalno nestabilan, na ovim materijalima je ispitana i rezidualna čvrstoća smicanja, i dobijene su sledeće vrednosti rezidualne kohezije $c_r = 10-18$ kPa, odnosno rezidualnog ugla unutrašnjeg trenja $\varphi_r = 10-12^\circ$ za laporovite gline prašinate (gl-pr^{Lg.Ps}), tj. $c_r = 9-14$ kPa, i $\varphi_r = 7-11^\circ$ za sloj lapora glinoviti lokalno prašinate (L^{gl.pr}). Zavisnosti parametara čvrstoće smicanja od vlažnosti i sadržaja glinovitih frakcija, prikazane su na Slici 8. Može se primetiti da se ugao unutrašnjeg trenja kreće u jednom uskom intervalu, dok to nije slučaj sa kohezijom, tako da se neka opšta zavisnost za koheziju ne može uspostaviti. Ono što je evidentno, to je da se sa povećanjem vlažnosti delimično smanjuje ugao unutrašnjeg trenja, što je i dokazano od strane više autora.



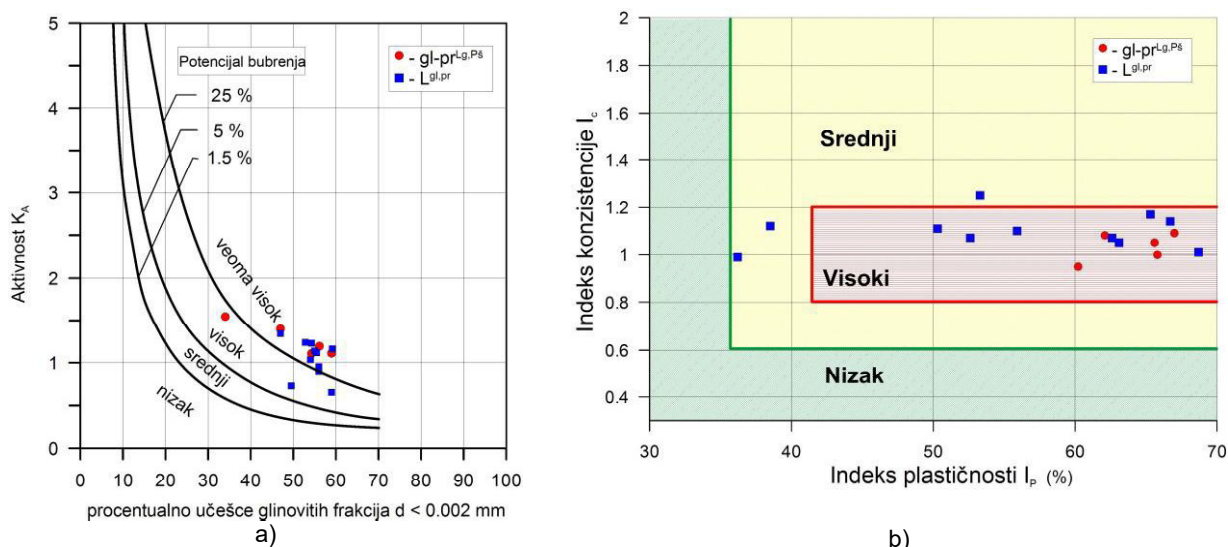
Slika 8. Međuzavisnosti čvrstoće smicanja, vlažnosti tla i sadržaja glinovitih frakcija

Navedene geotehničke karakteristike ukazuju da je neophodno predložiti parametre za dva različita sistema iskopa. Prvi se odnosi na slučaj da se podzemni radovi i zaštita padine potpornim konstrukcijama, izvode relativno brzo u kratkim vremenskim intervalima nakon iskopa, i tada se predlaže korišćenje „kritičnih“ parametara čvrstoće smicanja, koji su definisani za odgovarajuću vrednost pomeranja. Međutim, ukoliko se izgradnja tunela ne može izvesti u relativno kratkom vremenskom roku, onda se moraju uzeti u obzir i nepovoljni sezonski vremenski uslovi, ali i činjenica da je u neposrednoj zoni tunela, utvrđeno aktivno klizanje. U tom slučaju odgovarajuće geostatičke proračune, tj. analize stabilnosti kosina treba sprovoditi sa rezidualnim parametrima čvrstoće smicanja.

Karakteristično je da su na osnovu edometarskih ispitivanja, svi uzorci iskazali potencijal bubrenja, bez obzira na to iz koje sredinu su uzeti (laporoviti gline prašinate ili lapora glinoviti lokalno prašinate). Na nekim uzorcima iz ove laporovite serije napon bubrenja bio je veći od $\sigma_{sw} > 300$ kPa, tako da se može reći da se radi o sredinama sa veoma visokim potencijalom bubrenja u prisustvu vode (Slika 9a). Ovi rezultati ukazuju da je pri dimenzionisanju tunelske podgrade neophodno uračunati i dodatni pritisak usled bubrenja. Treba napomenuti da je postupak laboratorijskih ispitivanja bio različit, pa je tako u većini slučajeva voda

dodavana na početku ispitivanja pri stupnju opterećenja od 50 kPa, ali u nekim slučajevima i pri opterećenju od 200 kPa, tako da su dijagrami kompresije bili različiti. S obzirom da se radi o ekstremno plastičnim sredinama, ovo je posebno značajno jer podrazumeva da se nakon iskopa vrše i obavezne zaštite od podzemnih kao i tehnoloških voda koje se moraju odstranjivati, a sam iskop ne bi trebalo dugo da ostane nezaštićen.

Kako duž trase tunela dominiraju meke stene, postoji određeni rizik od lepljenja tj. začepljenja glave mašine za iskop jako plastičnim materijalima. U ovakvim uslovima proces čišćenja mašine može da bude dugotrajan i da na taj način uspori radove. Mogućnost lepljenja materijala može se proceniti na osnovu odnosa karakteristika tla, tj. indeksa konzistencije i indeksa plastičnosti. Kao što se može videti na slici 9b, bez obzira na dominaciju čvrstih i polučvrstih materijala u prirodnom stanju vlažnosti, postoji izvesni rizik od lepljenja materijala. U tim slučajevima se koristi glava sa većim brojem otvora u sredini i sa sistemom za ispiranje.



Slika 9. a) Potencijal bubrenja Mio-Pliocenog kompleksa b) rizik od začepljenja glave za iskop

Na osnovu sagledavanja terenskih uslova i zbirne analize svih laboratorijskih ispitivanja, usvojene su merodavne vrednosti prametera fizičko-mehaničkih svojstava geotehničkih sredina, koje su korišćene prilikom geotehničkih analiza (Tabela 2).

Tabela 2. Merodavne vrednosti fizičko-mehaničkih parametara na lokaciji tunela „Debelo brdo“

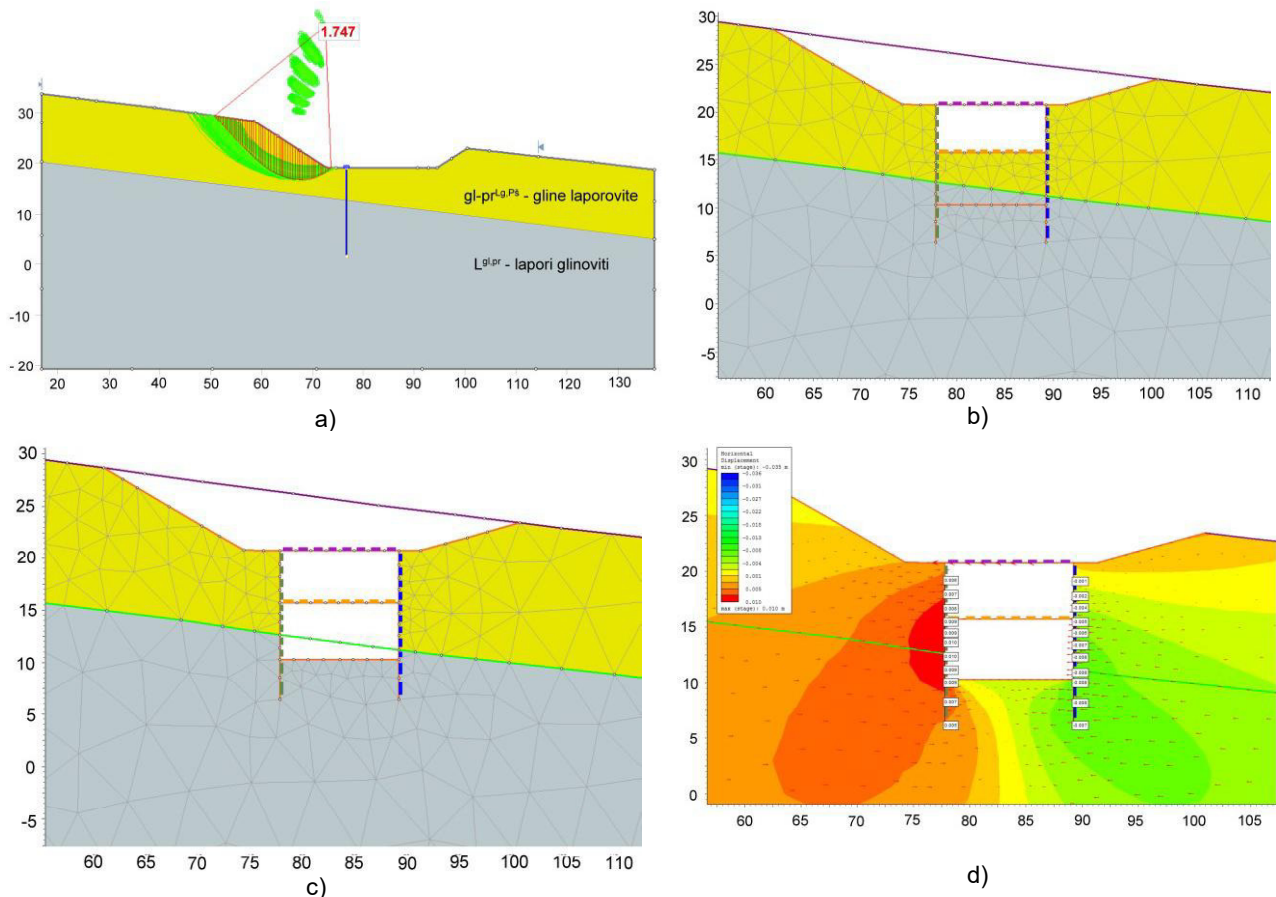
Geotehnička sredina	Fizičko-mehanički parametri							
	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (^o)	c_r (kPa)	ϕ_r (^o)	E_s (MPa)	E_r (MPa)	ν
Laporovita glina prašinstava (gl-pr ^{L-g})	18.5	28	18	12	10	20	60	0.35
Lapor glinovit lokalno prašinstav (L ^{gl,pr})	19.0	40	20	12	11	25	75	0.33

4. GEOTEHNIČKE PREPORUKE VEZANE ZA IZGRADNJU TUNELA

Imajući u vidu svojstva i stanje ovodnjenosti stenskih masa, za izgradnju tunela u otvorenom iskopu predviđeno je osiguranje privremenog iskopa, ugradnjom šipova. U vezi sa tim sprovedene su odgovarajuće geotehničke analize u skladu sa predloženim fazama iskopa i to: prva faza obuhvata iskop vršnog dela kosine, a druga faza iskop za izradu tunelske konstrukcije.

Prva faza podrazumeva manji obim zemljanih radova potrebnih za formiranje privremene kosine i radnog platoa za ugradnju šipova. Radovi će se izvoditi u laporovitim glinama prašinstim, tako da su za analize stabilnosti korišćeni predloženi fizičko-mehanički parametri za ovu geotehničku sredinu. S obzirom na već pomenute nestabilnosti na padini ispod lokacije tunela, analiza je prvo urađena korišćenjem rezidualnih

parametara čvrstoće smicanja, za projektovani nagib kosine 1:2, i tom prilikom je dobijen faktor sigurnosti $F_s < 1.0$. Iz tih razloga je predloženo da se iskop izvede sa jednom bermom širine 4 m na visini od oko 5 m u odnosu na kotu radnog platoa. Za predloženi način iskopa, dobijen je zadovoljavajući faktor sigurnosti koji je nešto veći od 1 ($F_s = 1.014$), uz napomenu da je analiza urađena sa rezidualnim parametrima čvrstoće smicanja. Međutim, u slučaju da se zemljani radovi i zaštita padine potpornom konstrukcijom, izvedu u kratkom vremenskom periodu i bez uticaja eventualnih atmosferskih promena (intenzivne padavine i sl.), analiza je urađena i sa „kritičnim“ parametrima čvrstoće smicanja, tako da je dobijen znatno veći faktor sigurnosti ($F_s = 1.747$). Ovde treba napomenuti da se radi o materijalima u kojima se pod određenim uslovima promene vlažnosti, mogu značajnije da smanje otporna svojstva i da im se poveća zapremina tj. da dođe do bubrenja, što bi podrazumevalo i posebne mere zaštite. U okviru druga faze iskopa izvešće se zaštitni šipovi koji će biti osigurani razuporom (Slika 10).



Slika 10. Geotehničke analize stabilnosti tokom prve faze iskopa: a) kratkoročna stabilnost sa kritičnim parametriča čvrstoće smicanja; b) prva faza iskopa sa razuporom; c) druga faza iskopa za tunel; d) očekivana horizontalna pomeranja šipova

Izgradnja tunela na delu sa podzemnim iskopom izvešće se po principima NATM (New Austrian Tunneling Method). Predviđa se iskop sa faznom razradom profila: kalote, oporaca, a nakon toga podnožnog svoda. Za zaštitu kalotnog iskopa predviđa se primarna podgrada: krovni-cevni štit, remenate, armaturne mreže i slojevi torkreta. Da bi se sprečila prekomerna sleganja predviđena je slonova stopa, ugradnja mikro šipova i ankera, i izrada privremenog podnožnog svoda. Za osiguranje iskopa u predelu oporaca takođe je predviđena konstrukcija od remenata, mreža, slojeva torkreta i ankera. U cilju smanjenja sleganja i stabilnosti iskopa, i na nivou oporaca predviđena je izrada druge slonove stope, ugradnja drugog reda mikro šipova i drugog privremenog podnožnog svoda. Za osiguranje iskopa u predelu podnožnog svoda predviđena je konstrukcija od remenata, armaturnih mreža i slojeva torkreta. Sekundarnu podgradu treba dimenzionisati imajući u vidu vremensko slabljenje i smanjenje nosivosti elemenata primarnog podgradnog sistema, pre svega torkreta i ankera.

Kako bi se prilagodio sistem primarne podgrade i dokazala stabilnost iskopa tunela u različitim fazama građenja, obavljene su naponsko-deformacijske analize. Za analizu naponsko-deformacijskih stanja u

tunelskoj podgradi i okolnoj stenskoj masi, najpouzdanija je trodimenzionalna analiza, kojom se simulira napredovanje radova sa praćenjem naponskih promena i deformacija u okolini privremenog radnog čela. Međutim, kada se čelo iskopa udalji dovoljno daleko od posmatranog poprečnog preseka, granični problem prelazi u dvodimenzionalne uslove ravnog stanja deformacija (2D), tako da se proračuni stabilnosti tunela načelno vrše primenom 2D modela ali, uz posredno uvođenje 3D efekata.

Nosivost nepodgrađene stenske mase u zavisnosti od stepena relaksacije napona je najbitniji faktor stabilnosti tunelskog iskopa. Faktor stabilnosti nepodgrađenog tunelskog iskopa definiše se kao odnos napona oko tunelskog iskopa (p_0) i jednoaksijalne čvrstoće stenske mase (σ_{cm}):

$$N_s = \frac{2p_0}{\sigma_{cm}}$$

Kada je faktor stabilnosti $N_s \leq 1$, odziv stenske mase biće elastičan, dok u slučaju da je faktor stabilnosti $N_s > 1.0$ stenska masa će se ponašati elasto-plastično, tj. deo stenske mase će se plastificirati. Da bi se definisala granica elastičnog ponašanja stenske mase, koristi se kritični stepen relaksacije koji se definiše koeficijentom λ_{cr} , na osnovu sledećeg izraza:

$$\lambda_{cr} = 1 - \left[\frac{2}{1+K} \cdot \frac{N_s - 1}{N_s} \right]$$

gde je $K = \text{tg}^2 (45 + \varphi/2)$

Da bi se stenska masa oko tunelskog iskopa na određenom rastojanju od čela iskopa ponašala elastično i pri faktoru stabilnosti $N_s > 1$, relaksacija napona usled iskopa tunela ne sme biti veća od vrednost λ_{cr} . To znači da je neophodno ugraditi oblogu (primarnu podgradu) na određenoj udaljenosti od čela iskopa, dovoljne nosivosti i krutosti koja obezbeđuje da 3D efekat još uvek zadržava potrebni nivo relaksacije napona. U skladu sa principima NATM, dozvoljen je određeni nivo plastifikacije oko tunelskog iskopa, ali on ne sme preći dužinu sidara. U idealnim okolnostima plastifikacija ne bi trebalo da prelazi dužinu od 3-6 m.

Simuliranje iskopa tunela i podgrađivanje, izvedeno je u devet koraka (Tabela 3).

Tabela 3. Fazni prikaz simulacije iskopa i podgrađivanja tunela „Debelo brdo“

Korak 1	Definisanje konturnih uslova, geometrije iskopa i geotehničkih sredina, polja primarnih napona
Korak 2	Formiranje površine terena
Korak 3	Inicijalno stanje – poništavanje deformacija
Korak 4	Relaksacija stenske mase u predelu kalote tunela
Korak 5	Formiranje zone poduhvatne podgrade, ugradnjom i injektiranjem cevnih ankera, iskop kalote tunela,
Korak 6	Postavljanje primarne podgrade u kaloti, izrada privremenog podnožnog svoda, u podini kalote, relaksacija stenske mase u predelu oporaca
Korak 7	Iskop oporaca, postavljanje primarne podgrade u predelu oporaca, izrada privremenog podnožnog svoda, na nivou oporaca, relaksacija stenske mase u zoni oporaca-bokovima
Korak 8	Iskop podnožnog svoda, izrada podnožnog svoda, potpuno rasterećenje

Usvajanjem određenih pretpostavki o svojstvima, stanju i ponašanju stenskih masa (geostatički naponi, koeficijent bočnog pritiska, Kulon-Morov kriterijum loma, različite vrednosti modula elastičnosti za opterećenje E_s i rasterećenje E_r , cevni štit je simuliran materijalom sa ekvivalentnim svojstvima, relaksacija napona u fazi iskopa za $\lambda = 0.3$, simulirana je progresivnim omekšavanjem stene, nakon ugradnje cevnog štita, naponi u stenskoj masi su relaksirani na $\lambda = 0.7$), sprovedene su geotehničke analize i dobijene su vrednosti određenih parametara koje su prikazane u Tabeli 4.

Tabela 4. Vrednosti parametara koji se koriste pri simulaciji uticaja na iskop čela tunela „Debelo brdo“

N_s	λ_{cr}	r_p	λ_0	r_{p0}	K_0
9.8	0.41	24.7	0.7	10.1	0.65

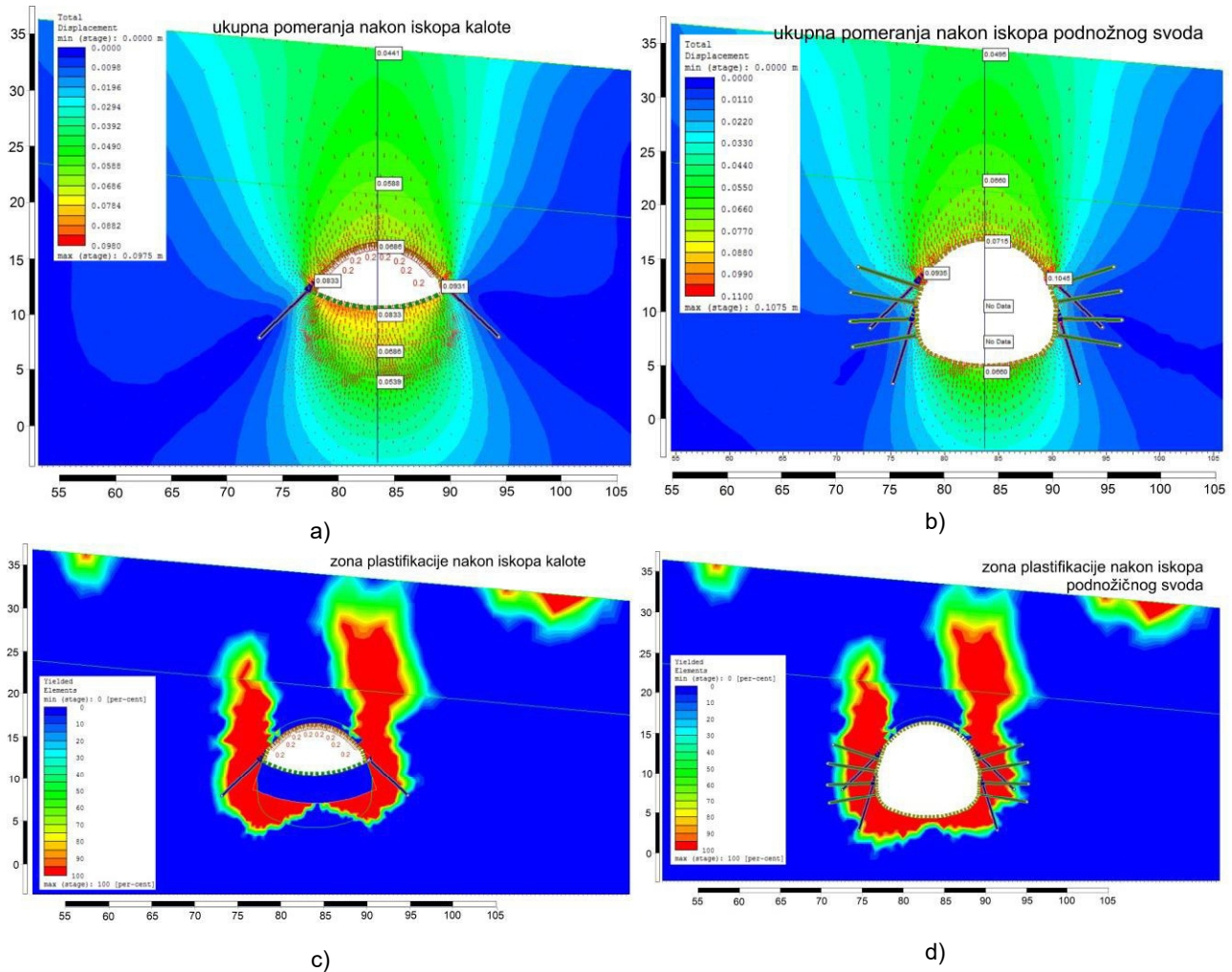
r_p - poluprečnik zone plastifikacije za slučaj nepodgrađenog iskopa

r_{p0} - poluprečnik zone plastifikacije za slučaj relaksacije $\lambda_0 = 0,7$

Verifikacija podgrade tunela je izvršena pomoću programskog paketa *Phase2*. Softver *Phase2* koristi metod konačnih elemenata i omogućava numeričku analizu svih vrsta tunela i drugih podzemnih objekata u dve dimenzije. Faze izrade modela pratile su uobičajenu građevinsku praksu, tj. iskop i primenu mera osiguranja.

Rezultati proračuna ukazuju da će iskop izazvati znatna pomeranja stenske mase u zoni tunelskog iskopa ali, određena pomeranja će se manifestovati i na površini terena (Slika 11a i 11b). Takođe, i zona plastifikacije stenske mase javlja se do same površine terena (Slika 11c i 11d), pa iz tih razloga sve aktivnosti u toku izgradnje treba izvoditi obazrivo. Sile u ankerima i podgradnim elementima su unutar graničnih, dopuštenih vrednosti.

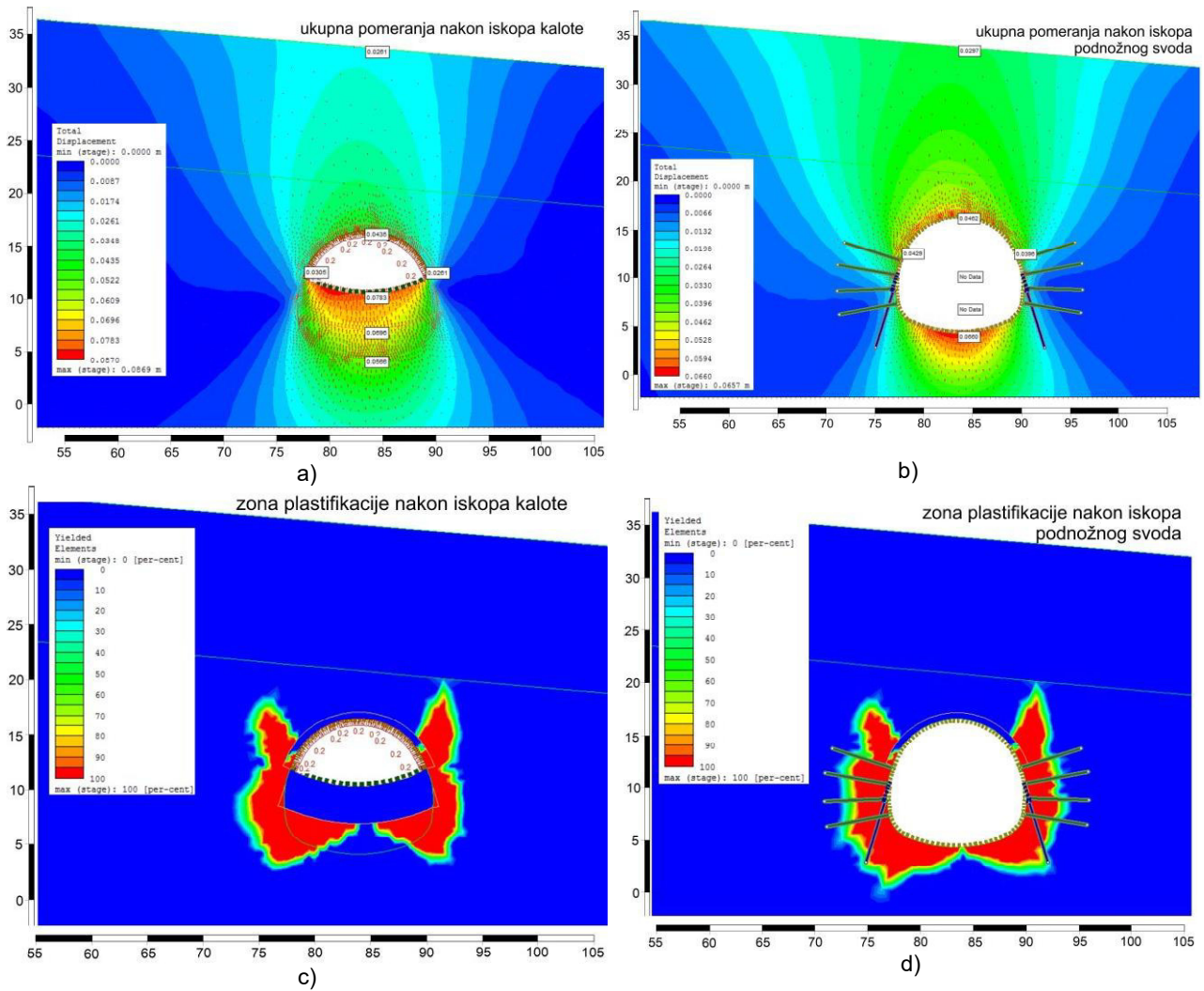
Rezultati geotehničkih proračuna, za predloženo rešenje načina izgradnje tunela „Debelo brdo“ prikazani su na Slikama br. 11.



Slika 11. Naponsko deformacijske analize za predloženo rešenje: a) ukupna pomeranja nakon iskopa kalote; b) ukupna pomeranja nakon iskopa podnožnog svoda; c) zona plastifikacije nakon iskopa kalote; d) zona plastifikacije nakon iskopa podnožnog svoda

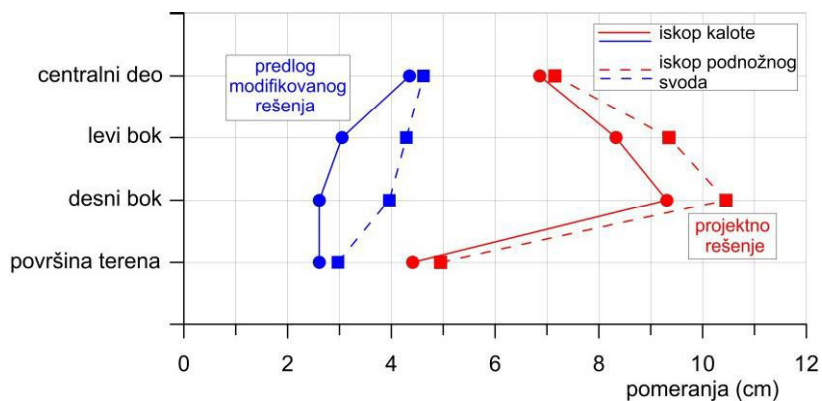
Najveće naponsko-deformacijske promene nastaju u fazi izvođenja kalote i to ispod cevnog štita, u zoni slonovih stopa. Stanje se može poboljšati ako se luk cevnog štita produži, tj. spusti do nivoa poda kalote. Međutim to je praktično nemoguće izvesti jer, u tom slučaju, za ugradnju cevnog štita smeta slonova stopa.

Iz tih razloga, mogući efekti spuštavanja cevnog štita do poda kalote, razmatrani su na modifikovanom modelu, bez slonove stope i mikrošipova na nivou kalote. Proračunski modeli sa rezultatima proračuna, koji ukazuju na efekte koji se ostvaruju modifikacijom projektnog rešenja prikazani su na Slikama 12, dok je zbirni prikaz svih pomeranja za predloženo projektno rešenje kao i rešenje sa predloženom modifikacijom, prikazano na Slici 13.



Slika 12. Naponsko deformacijske analize za modifikovano rešenje: a) ukupna pomeranja nakon iskopa kalote; b) ukupna pomeranja nakon iskopa podnožnog svoda; c) zona plastifikacije nakon iskopa kalote; d) zona plastifikacije nakon iskopa podnožnog svoda

Za laporovito glinovite sredine, u kojima se predviđa izgradnja tunela, po pravilu je problematična nosivost ankera. U ovakvim stenskim masama, kao najadekvatniji pokazali su se swellex ankeri, a po potrebi se mogu koristiti i ibo ankeri. Za privremeno osiguranje čela iskopa mogu se koristiti fiberglass ankeri i tanji sloj torkreta. Predloženo je da se iskop kalote izvodi faznom razradom čela, sa formiranjem potpornog tela, ostavljanjem prizme koja će doprinositi stabilnosti čelu iskopa.



Slika 13. Zbirni prikaz pomeranja kalote i podnožnog svoda za projektno i modifikovano rešenje

4. ZAKLJUČAK

Prognoza geotehničkih uslova izgradnje tunela "Debelo brdo", izvršena je na osnovu sveobuhvatne analize izvedenih geotehničkih istraživanja duž trase tunela. Interpretacija rezultata laboratorijskih ispitivanja je bila relativno složena, s obzirom da su obavljani i određeni nestandardni opiti, pa je iz tih razloga detaljno prikazan i način na koji su usvojeni fizičko-mehanički parametri sa kojima su izvršene odgovarajuće geotehničke analize (analize stabilnosti i naponsko deformacijske analize). Posebno su analizirani geotehnički uslovi vezani za iskop tunela (način iskopa, moguće pojave, konvergencija profila), a posebno geotehnički uslovi osiguranja iskopa (primarno, finalno, hidroizolacija).

Imajući u vidu svojstva i stanje ovodnjenosti stenskih masa, za izgradnju tunela u otvorenom iskopu predviđeno je osiguranje privremenog iskopa, ugradnjom šipova. S obzirom na registrovane pojave nestabilnosti u zoni tunela kao i relativno nepovoljne hidrogeološke uslove u terenu (na delu iskopa koji je planiran u otvorenom, može se očekivati podzemna voda jer je utvrđen prosljak peska debljine oko 1 m), predloženo je korišćenje rezidualnih parametara čvrstoće smicanja. Geotehničke analize su pokazale da se privremene kosine, iznad nivoa radnog platoa, gde će se izvesti šipovi, izvedu sa predloženim nagibom, ali sa bermom širine 4 m na visini od oko 5 m iznad radnog platoa.

Kada je u pitanju način iskopa, analizirano je predloženo projektno rešenje, a rezultati su pokazali da će u zoni tunelskog iskopa doći do znatnih pomeranja stenske mase, koje će se manifestovati i na površini terena. Iz tih razloga, analizirana je i delimično izmenjena varijanta iskopa, sa produženim cevnom štitom, tj. spuštenim do nivoa kalote, ali bez slonove stope i mikrošipova na nivou kalote, i tom prilikom su dobijene znatno manje deformacije oko tunelskog iskopa, sa deformacijama na površini terena koje su zanemarljive.

Zahvalnica

Ovaj rad je realizovan na osnovu „Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2022. godini“, br. 451-03-68/2022-14/200126, koji je potpisan sa Ministarstvom prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

- [1] Rakić, D. i dr. (2017). Idejni projekat i studija izvodljivosti sa procenom uticaja na životnu sredinu za izgradnju autoputa E-80 (SEETO Ruta 7): od administrativnog prelaza Merdare do Niša preko obilaznice Prokuplja, deonica Niš – Pločnik, Sveska E21: Elaborat o geotehničkim uslovima izgradnje trase autoputa, 202 p.
- [2] Rakić, D. i dr. (2017). Idejni projekat i studija izvodljivosti sa procenom uticaja na životnu sredinu za izgradnju autoputa E-80 (SEETO Ruta 7): od administrativnog prelaza Merdare do Niša preko obilaznice Prokuplja, deonica Niš – Pločnik, Sveska E22: Elaborat o geotehničkim uslovima izgradnje objekata – mostovi i nadvožnjaci, 230 p.
- [3] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Lazić, M.; Stevanović, M. (2017). Opšti geotehnički uslovi izgradnje autoputa E-80 Niš – Merdare, Deonica: Niš – Pločnik, I Deo, Zbornik radova VII naučno-stručnog međunarodnog savetovanja: Geotehnički aspekti građevinarstva, 75-82.
- [4] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Lazić, M.; Stevanović, M. (2017). Opšti geotehnički uslovi izgradnje autoputa E-80 Niš – Merdare, Deonica: Niš – Pločnik, II Deo, Zbornik radova VII naučno-stručnog međunarodnog savetovanja: Geotehnički aspekti građevinarstva, 83-92.
- [5] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Lazić, M.; Stevanović, M. (2018). Inženjerskogeološki uslovi izgradnje prve deonice autoputa Niš – Merdare, Zbornik radova - CD (Book of papers - CD), Treći Srpski kongres o putevima, Beograd, str. 12-23.
- [6] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Bogdanović, S.; Janković, J. (2019). Geotechnical zoning of the terrain along the first section of E-80 highway in Serbia – SEETO route 7”, *Proceedings of the XVII European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ECSMGE-2019*, Geotechnical Engineering foundation of the future, Reykjavik, Iceland, 2019.
- [7] Rakić, D. i dr. (2020). Projekat za građevinsku dozvolu za izgradnju autoputa E-80 u Srbiji (SEETO Ruta 7): od Niša (Merošina) do Pločnika (Beloljin) – I faza izgradnje; Deonica 2 km: 5+670.055– km: 14+300.00; WB18-SRB-TRA-02-TXT-E21, Sveska E21. Elaborat o geotehničkim istraživanjima terena za izgradnju autoputa, 1947 p.