



# SAVEZ GRAĐEVINSKIH INŽENJERA SRBIJE

ASSOCIATION OF CIVIL ENGINEERS OF SERBIA

## ZBORNIK RADOVA / PROCEEDINGS

MEĐUNARODNO NAUČNO-STRUČNO SAVETOVANJE  
INTERNATIONAL SCIENTIFIC FORUM

GEOTEHNIČKI ASPEKTI GRAĐEVINARSTVA  
I ZEMLJOTRESNO INŽENJERSTVO

GEOTECHNICAL ASPECTS OF CIVIL ENGINEERING AND EARTHQUAKE ENGINEERING



Vrnjačka Banja, 1-3. novembar 2023.

624.042.7(082)(0.034.2)

699.841(082)(0.034.2)

550.34(082)(0.034.2)

**МЕЂУНАРОДНО научно-стручно саветовање Геотехнички аспекти грађевинарства и земљотресно инжењерство (2023 ; Врњачка Бања)**

Zbornik radova Međunarodno naučno-stručnog savetovanja Geotehnički aspekti građevinarstva i zemljotresno inženjerstvo, Vrnjackska Banja, 01. - 03. novembar 2023. [Elektronski izvor] = Proceedings International Scientific Conference Geotechnical Aspects of Civil Engineering and Earthquake Engineering / [organizatori] Savez građevinskih inženjera Srbije ... [et al.] ; editor Radomir Folić. - Beograd : Savez građevinskih inženjera Srbije = Association of Civil Engineers of Serbia, 2023 (Beograd : Razvojno istraživački centar grafičkog inženjerstva). - 1 USB fleš memorija ; 7 x 2 x 1 cm

Sistemska zahteva: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 200. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-88897-17-4

a) Seizmicheske konstrukcije -- Zbornici b) Geotehnicke konstrukcije -- Zbornici v) Zemljotresi -- Zbornici

COBISS.SR-ID 128354569

**IZDAVAČ (PUBLISHER):**

Savez građevinskih inženjera Srbije / Association of Civil Engineers of Serbia  
Srbija, Beograd, Kneza Miloša 9/I, Tel. +381 (0) 11 32 30 357; +381 (0) 11 32 42 589

**EDITOR / (Editor in Chief):** Prof. emeritus dr Radomir FOLIĆ

**TEHNIČKI UREDNIK / (Editor):** Stoja TODORVIĆ - Saška

Svi radovi u ovom zborniku radova su recenzirani. Stavovi izneti u ovoj publikaciji ne odražavaju nužno i stavove izdavača, programskog odbora ili editora.

**TIRAŽ (Circulation):** 200

**ŠTAMPA (Printed by):** Razvojno istraživački centar grafičkog inženjerstva, Beograd

Međunarodno naučno-stručno savetovanje "Geotehnički aspekti građevinarstva i zemljotresno inženjerstvo" organizovano je pod pokroviteljstvom. **Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije.**

Organizatori (Organizers)

**Savez građevinskih inženjera Srbije, Beograd**  
**Srpsko društvo za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo**  
**Društvo za zemljotresno inženjerstvo Srbije**

Suorganizatori (Co-organizers)

**Inženjerska komora Srbije**  
**Privredna komora Srbije**  
**Institut IMS a.d. Beograd**

Sponzori (Sponsored):

LHR – GENERALNI SPONZOR  
TENSAR  
STATIKER  
GP GRADITELJ NOVI SAD  
EUROBILD  
PROINŽENJERING PLUS  
NOVKOL

---

**ORGANIZACIONI ODBOR (*ORGANIZING COMMITTEE*):**

Predsednik: Slavica ŽIVKOVIĆ, mast. ekon., Beograd, Srbija

Potpredsednik: Duška NEDELJKOVIĆ – VIDOJEVIĆ, LHR

Sekretar: Suzana VASIĆ, Beograd – Srbija

ČLANOVI: Zora JOJIĆ, LHR

Jovana MARKOVIĆ, LHR

Dr Selimir LELOVIĆ, dipl.inž.građ., Beograd – Srbija

Dr Ksenija ĐOKOVIĆ, dipl.inž.građ., Beograd, Srbija

Dr Miloš MARJANOVIĆ, dipl.inž.građ., Beograd, Srbija

Nikola ROMIĆ, dipl.inž.građ., Beograd, Srbija

Marko PRICA, dipl.inž.geol., Beograd, Srbija

**PROGRAMSKI ODBOR (*PROGRAMME COMMITTEE*):**

Prof. emeritus Radomir FOLIĆ, Srbija - PREDSEDNIK

Prof. dr Petar ANAGNOSTI, Srbija – POTPREDSIEDNIK

Prof. dr Mirjana VUKIĆEVIĆ, Srbija - POTPREDSIEDNIK

Dr Nenad ŠUŠIĆ, Srbija

Prof. dr Heinz BRANDL, TU Wien, Austria

Prof. dr Slobodan ČORIĆ, Srbija

Predrag POPOVIĆ, PE. SAD

Akad. prof. dr Miha TOMAŽEVIČ, Slovenija

Prof. dr Ivan VRKLJAN, Hrvatska

Prof. dr Vojkan JOVIČIĆ, Slovenija

Prof. dr Vlatko ŠEŠOV, Severna Makedonija

Prof. dr Milorad JOVANOVSKI, Severna Makedonija  
Prof. dr Jovan PAPIĆ, Severna Makedonija  
Dr Radan IVANOV, Bugarska  
Acad. prof. dr Nedo ĐURIC, Bosna i Hercegovina  
Prof. dr Stanko BRČIĆ, Srbija  
Prof. dr Đorđe LAĐINOVIĆ, Srbija  
Prof. dr Doncho PARTOV, Bugarska  
Prof. dr Mustafa HRASNICA, Bosna i Hercegovina  
Prof. dr Arian LAKO, Albanija  
Prof. dr Josip ATALIĆ, Hrvatska  
Prof. dr Lena MIHOVA, Bugarska  
Prof. dr Mato ULJAREVIĆ, Bosna i Hercegovina  
Prof. dr Adnan IBRAHIMOVIĆ, Bosna i Hercegovina  
Prof. dr Tatjana ISAKOVIĆ, Slovenija  
Prof. dr Asterios LIOLIOS, Grčka  
V.prof. dr Slobodan ŽIVALJEVIĆ, Crna Gora  
Doc. dr Nenad FRIC, Srbija  
V. prof. Mario UROŠ, Hrvatska  
V.prof. dr Igor PEŠEVSKI, Severna Makedonija  
V.prof. dr Julijana BOJADŽIJEVA, Severna Makedonija  
V.prof. dr Elefterija ZLATANOVIĆ, Srbija  
Prof. dr Mitar ĐOGO, Srbija  
Prof. dr Petar SANTRAC, Srbija  
Prof. dr Gordana HADŽI NIKOVIĆ, Srbija  
Prof. dr Dragoslav RAKIĆ, Srbija  
Prof. dr Zoran BONIĆ, Srbija  
Dr Anrey TOTSEV, Bugarska  
Dr Nikolay MILEV, Bugarska  
Prof. dr Zoran BRUJIĆ, Srbija  
Prof. dr Anamarija FEIER, Rumunija  
Dr Mladen ĆOSIĆ, Srbija  
Doc. dr Jelena PEJOVIĆ, Crna Gora  
Doc. dr Predrag PETRONIJEVIĆ, Srbija  
Doc. dr Sanja JOCKOVIĆ, Srbija  
Vladimir FILIPOVIĆ, dipl.inž.geol., Srbija

Vrnjačka Banja, 01. - 03. novembar 2023.



GEOTEHNIČKI ASPEKTI GRAĐEVINARSTVA I ZEMLJOTRESNO  
INŽENJERSTVO - Vrnjačka Banja, 01-03. novembar 2023.

Zoran Berisavljević<sup>1</sup>, Miloš Marjanović<sup>1</sup>, Uroš Đurić<sup>2</sup>

GEOTEHNIČKI ASPEKTI IZGRADNJE VISEĆEG PEŠAČKOG MOSTA U  
STAROM GRADU U UŽICU

**Rezime:** U radu su prikazani rezultati geotehničkih istraživanja za potrebe izgradnje visećeg pešačkog mosta preko klisure reke Đetinje u Užicu. Predviđeno je da most, sistema prednapregnute trake, omogući prelaz pešacima sa desne dolinske strane na stranu Starog grada, koja je opasana strmom liticom (cca. 40 m visine). Za potrebe formiranja geotehničkog modela i strukturnog sklopa krečnjačke stenske mase korišćen je postupak fotogrametrijskog snimanja dronom. Predviđeno je da se zatežuća sila (od oko 30 MN), koju most prenosi na obalni stub, prihvati i prenese na stensku masu sistemom prednapregnutih anкера. U tom pogledu izvršena su ispitivanja nosivosti dva sidra, koja su ugrađena u subhorizontalne bušotine. Rezultati numeričkih analiza i uspešan test nosivosti sidara pokazuju da je stenska masa u stanju da izdrži sile zatezanja od mostovske konstrukcije. Pomeranja obalnog stuba su nekoliko mm u slučaju pretpostavke o kontinualnoj stenskoj masi. Kada se eksplicitno u analizu uvedu pukotine pomeranja su oko 6 cm. Ovi rezultati se morju verifikovati kroz odgovarajući monitoring tokom izgradnje mosta.

**Ključne reči:** fotogrametrija, stabilnost kosina, pukotine, prednapregnuta sidra, test granične nosivosti, Paker (Ližonov) test

GEOTECHNICAL ASPECTS OF CONSTRUCTION OF STRESSED RIBBON  
BRIDGE IN UŽICE OLD TOWN

**Summary:** This study shows the results of geotechnical investigations performed for the construction of pedestrian suspension bridge, crossing the Đetinja river in the town of Užice. The prestressed ribbon type bridge should connect the right bank of the river with the the vertical cliff (approx. 40 m high) where the Old town is located. Geotechnical model of the limestone rock mass and joint network model are formed by utilization of drone photogrammetry. The tensile force (approx. 30 MN) induced on the bridge pillar should be accepted and transfered to the rock mass by the system of prestressed anchors. Two investigation test were performed on anchors installed in sub-horizontal boreholes. Successful anchor load test and numerical analysis showed that the rock mass is capable of sustaining tensile force induced by the bridge structure. Displacements of the bridge abutment are approx. several mm for an assumption of isotropic rock mass behaviour. If joints are applied explicitly the displacements are in the order of 6 cm. These findings have to be confirmed by monitoring during the construction stage.

**Keywords:** photogrammetry, slope stability, discontinuities, pre-stressed anchors, investigation test, Packer (Lugeon) test

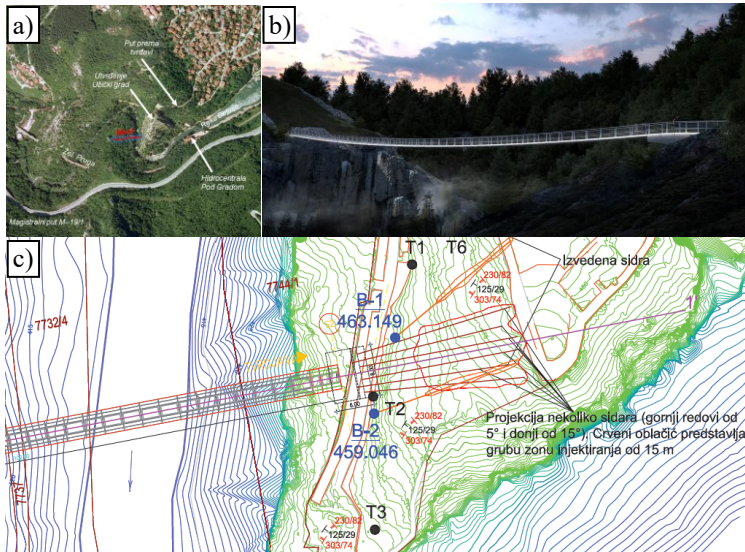
<sup>1</sup> dr, doc., Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Đušina 7, Beograd, [z.berisavljevic@rgf.bg.ac.rs](mailto:z.berisavljevic@rgf.bg.ac.rs)

<sup>1</sup> dr, van. prof., Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Đušina 7, Beograd, [m.marjanovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:m.marjanovic@rgf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> dr, doc., Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bul. Kralja Aleksandra 73, Beograd, [u.duric@rgf.bg.ac.rs](mailto:u.duric@rgf.bg.ac.rs)

## 1. UVOD

U radu su prikazani rezultati geotehničkih istraživanja i numeričkih analiza za potrebe izgradnje visećeg pešačkog mosta preko klisure reke Đetinje kod Starog grada u Užicu. Rasponska konstrukcija mosta je statičkog sistema prednapregnute trake - tzv. "stress ribbon". Sastoji se od podužnih ovešenih čeličnih kablova koji nose kolovoznu ploču male debljine. Kolovozna ploča je formirana od montažnih armirano-betonskih elemenata, ojačanih sa kablovima za prednaprezanje. Konstrukcija prati oblik katenarnog luka (lančanica). Na slici 1 prikazan je izgled budućeg mosta i njegov položaj.



Slika 1. a) Položaj mosta u zoni Starog grada, b) Izgled budućeg mosta - vizuelizacija, c) Situacija sa položajem istražnih radova u zoni Starog grada

Istražni radovi počeli su transportom bušaće garniture iz delova na veoma nepristupačnu lokaciju i pripremu radilišta i skele za izvođenje dve subhorizontalne bušotine u zoni obalnog stuba na strani Starog grada. Za to vreme je na suprotnoj strani (desna dolinska strana reke Đetinje) napravljen pristupni put kako bi se mogle izvesti još dve bušotine u zoni drugog obalnog stuba (istraživanja na suprotnoj strani nisu predmet ovog rada). Istraživanja su vršena u veoma teškim vremenskim uslovima (niske temperature i česte padavine). Kartiranje jezgra vršeno je paralelno sa bušenjem, a uzorci za laboratorijska ispitivanja uzimani su pri svakom dolasku na gradilište. Paralelno sa kartiranjem jezgra vršeno je i inženjerskogeološko kartiranje terena, na osnovu koga su prikupljeni podaci o karakteristikama pukotina i stenske mase. Pored toga, kosina je snimljena dronom, što je omogućilo da se formira 3D model terena i da se izvrši analiza strukturnog sklopa stenske mase šireg područja.

Tokom izvođenja bušotina u zoni starog grada rađeni su i testovi vodopropusnosti (VDP) kako bi se utvrdila ispucalost stenske mase i procenili trošci injekcione mase.

Nakon izvođenja, bušotine su proširene na prečnik Ø146mm, što je omogućio da se sidra nesmetano postave u bušotinu. Zidovi bušotina su sve vreme bili stabilni.



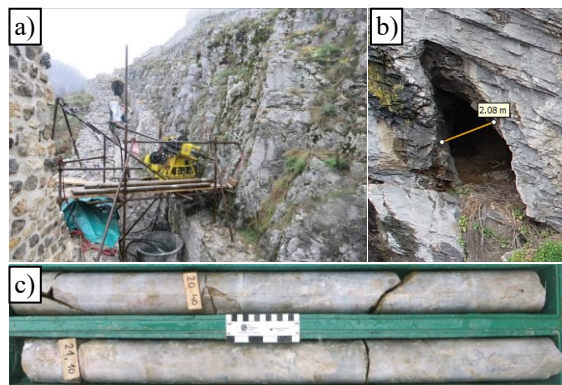
Nakon postavljanja sidara u bušotinu pristupilo se injektiranju. Injekciona masa je unošena u bušotinu sistemom creva predviđenih za tu namenu pod pritiskom od 5-10 bara. Nakon završenog injektiranja pristupilo se izradi oslonca za prenos opterećenja sa glave ankera na stensku masu. Testovi probnog opterećenja sidara izvedeni su nakon što je protekao vremenski period od 28 dana potrebnih za očvršćavanje injekcione mase u delu sidrišne deonice, od strane Insituta za ispitivanje materijala (IMS) iz Beograda.

Na osnovu svih rezultata istraživanja, napravljen je numerički model stenske mase i izvršeni su proračuni stabilnosti metodama granične ravnoteže i konačnih elemenata. Na ovaj način određen je faktor sigurnosti, kao i pomeranja konstrukcije.

## 2. GEOLOŠKA GRAĐA I ISTRAŽIVANJA TERENA

### 2.1. Strukturno-geološke karakteristike terena u zoni mosta

Geološku građu terena područja istraživanja čine slojeviti do bankoviti krečnjaci donjeg trijasa ( $T_1^2$  - kampilski podkat). Ovi krečnjaci su u celini veoma prekristalisali, sive boje. Prožeti su kalcitskim žilama, retko su žile i pukotine zapunjene crvenim gvožđevitim vezivom. Moguća pojava meke žute (prašinasto-glinovite) ispune. Pukotine su uglavnom umereno hrapave i umereno izmenjene, sa čestim pojavama fleka i skrama limonita, što ukazuje na intenzivnu cirkulaciju vode duž pukotina. Stisnute su ili sa zevom do nekoliko mm. U zoni neposredno ispod Starog grada subvertikalni krečnjački odsek je visine oko 40 m, što generalno ukazuje na dobre karakteristike stene. Primećena je česta pojava kaverni metarskih dimenzija. Stenska masa iznad obalnog stuba, u zoni Starog grada, je ispugalija i blažeg nagiba. Na slici 2, prikazani su tipični predstavnici krečnjaka na jezgru istražnih bušotina, na kosini i izgled kaverne (iz oblaka tačaka sa teksturom).

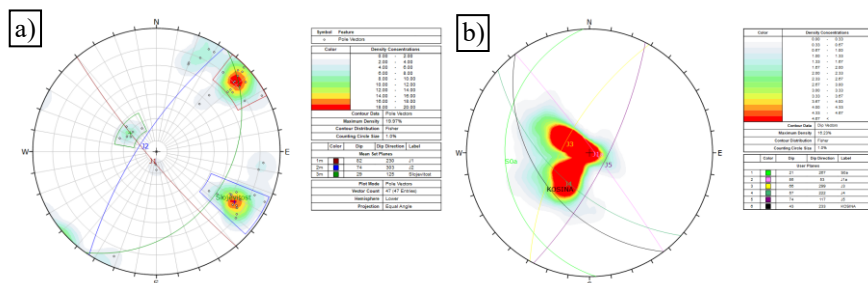


Slika 2. a) Izgled krečnjaka u zoni bušotine B1, b) Kaverna na vertikalnoj litici (prikaz iz oblaka tačaka sa teksturom) c) Tipičan izgled krečnjaka u bušotini B2

Inženjerskogeološkim kartiranjem prikupljeni su podaci o strukturnom sklopu stenske mase. Izmereni elementi pada prikazani su na strukturnom dijagramu na slici 3. Generalno se mogu izdvojiti 3 dominantne familije pukotina i pojedinačne pukotine. Dve strme (subvertikalne) familije konstatovane su u zoni svih tačaka na kojima je vršeno

kartiranje. One međusobno formiraju klin. Familija pukotina blagog nagiba (subhorizontalna) predstavlja međuslojne pukotine i njeno prisustvo je uočeno i na desnoj dolinskoj strani reke Đetinje. Metodologija kartiranja pukotinskog sklopa podrazumevala je da se na datoj lokaciji definišu familije pukotina, te da se za svaku odaberu najmanje dve karakteristične na kojima bi se izmerili profili hrapavosti, čvrstoća zidova (Šmitovim čekićem) i odredilo stanje diskontinuiteta. Zatim bi se na intaktnoj stenskoj masi odredila čvrstoća upotrebom Šmitovog čekića. Ovi podaci su kasnije upotrebljeni za definisanje Barton-Bandisovog (BB) kriterijuma loma. Pored toga, kartiranjem su određeni i ostali parametri neophodni za dobijanje RMR vrednosti.

Detaljna kinematska analiza urađena je u okviru interpretacije rezultata fotogrametrijskim postupkom.



Slika 3. Polovi planara na Šmitovoj mreži sa izdvojenim trasama pojedinih familija pukotina a) Terenska merenja, b) Na osnovu analize oblaka tačaka

## 2.2. Primena fotogrametrijskog postupka za analizu strukturnog sklopa

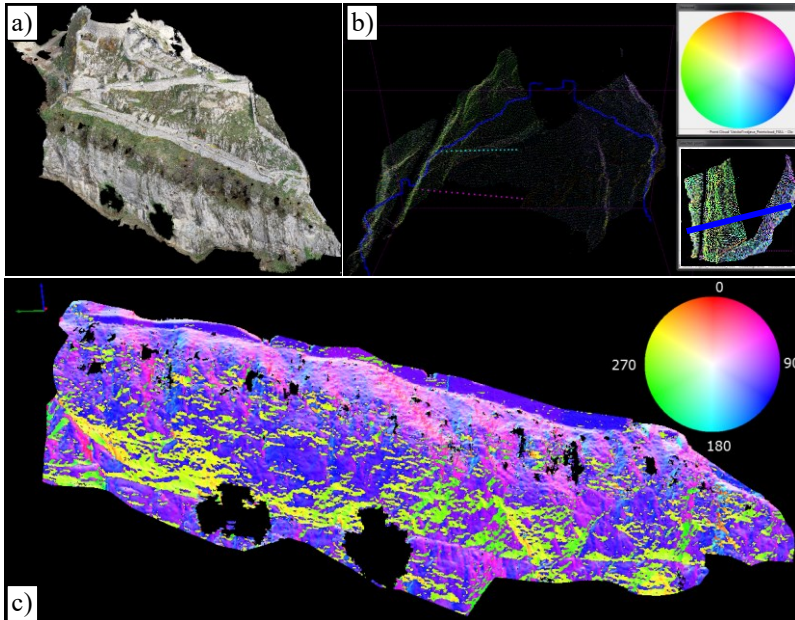
Snimanje je izvršeno sa letelicom DJI Phantom 4 PRO koja nosi kameru sa jednoničnim CMOS senzorom rezolucije 20Mpix, objektiv kamere sa žižnom daljinom od 24 mm (35 mm format ekvivalentnom), brzinom otvaranja  $f/2.8 - f/11$  i mehaničkim zatvaračem blende.

Izvršene su tri misije snimanja kako bi se što bolje pokrilo područje od interesa i sa što manje mrtvih uglova na generisanom modelu. U prvoj misiji napravljeno je 344 snimaka, u drugoj 242, a u trećoj 155. Snimanje je vršeno manuelno krećući se letelicom gore-dole po vertikalama na udaljenosti od 10-15 m od stene pri čemu je kamera bila nagnuta  $15^\circ$  od horizonta. Način snimanja je bio *freeflight*, pri čemu je podešeno da kamera okida na pređenih 2 m pri kretanju horizontalno i vertikalno kako bi se postigao dovoljan preklap od preko 80% između snimaka u svakom redu snimanja (podužni preklap) ili između redova snimanja (poprečni preklap).

Obeležavanje i merenje orijentacionih tačaka izvršeno je na terenu u cilju georeferenciranja modela. Osam orijentacionih tačaka je obeleženo na terenu crvenim sprejom sa oznakama odgovarajuće veličine kako bi bile jasno vidljive na snimcima. Koordinate tačaka u Državnom koordinatnom sistemu (projektovana Gaus-Kriggerova projekcija 7 zona) izmerene su sa GNSS prijemnikom za RTK pozicioniranje. Sve orijentacione tačke su izmerene na snimcima i apsolutno georeferenciranje modela postignuto je na orijentacionim tačkama sa srednjom kvadratnom greškom od 0.12 m.



Radi određivanja orijentacije i povezivanja snimaka preko veznih tačaka SIFT metodom generisan je redak oblak tačaka od ukupno 389.899 veznih tačaka. Gust oblak tačaka od oko 127 miliona tačaka generisan je sa SFM metodom sa kojim je dobijena i tekstura svake tačke na osnovu slika (slika 4a).



*Slika 4. Rezultati fotogrametrijskog snimanja a) gusti oblak tačaka Starog grada u Užicu, b) približna pozicija opitnih sidara u odnosu na liniju preseka (tamno plavo), c) oblak tačaka litice ispod Starog grada (boje predstavljaju orijentaciju polova ravni)*

Kasnija klasifikacija oblaka tačaka na stene i vegetaciju izvršena je jednim delom automatski, a većinom ručno, kako bi se izdvojile stene od interesa sa vrlo malo niske vegetacije (mahovine) i koje su potrebne za dalje analiziranje i projektovanje. Nakon klasifikacije konačni oblak tačaka koji pripada stenama imao je 125.88 miliona tačaka. Model oblaka tačaka sa odgovarajućom teksturom dobijen je na osnovu oblaka tačaka i snimaka. Model predstavlja mrežu nepravilnih trouglova sa ukupno 25 miliona trouglova.

U sledećim fazama, na osnovu oblaka tačaka izvršena je strukturna analiza i izdvajanje familija pukotina. Analiza je vršena manuelno i dobijeni rezultati su upoređeni sa terenskim merenjima za potrebe verifikacije. Na osnovu ovako generisanog oblaka tačaka, izrađeni su poprečni preseki terena koji su korišćeni za geotehničke proračune stabilnosti (slika 4b).

Na osnovu postojećeg oblaka tačaka moguće je raditi 3D rendere za potrebe prikazivanja i projektovanja. Pored segmentiranog tj. pročišćenog oblaka tačaka u .las formatu, sačuvan je i prvobitno klasifikovani oblak tačaka sa vegetacijom.

### 3. REZULTATI ISPITIVANJA

#### 3.1. Interpretacija testa vodopropusnosti (Lugeon-ova ili VDP metoda)

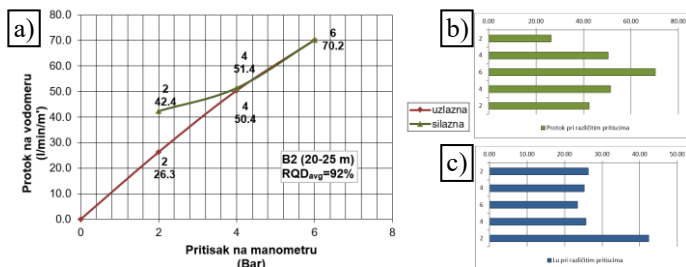
Ova metoda ispitivanja vodopropusnosti zasniva se na principu utiskivanja vode pod pritiskom u nezacevljenu bušotinu, na određenim izolovanim dužinama (etažama) u dva ciklusa. Prvi, tzv. uzlazni ciklus, podrazumeva stepnjevitno povećanje pritiska (do određene prethodno definisane veličine pritiska) i merenje protoka (u litrima) na manometru na svaki minut (u trajanju od 10 minuta ili dok se protok ne ustali). Silazni ciklus podrazumeva stepnjevitno snižavanje protoka (u istim koracima kao i u slučaju uzlaznog ciklusa) do neke minimalne vrednosti.

Lugeon-ova metoda (u jedinicama  $l/min/m'/1 MPa$ ) je inicijalno nastala za potrebe ispitivanja vodopropusnosti kod izgradnje injekcionih zavesa brana, ali je kasnije njena primena proširena na ispitivanje svojstava ispucale stenske mase i oceni kvaliteta injektiranja. Prema prvobitnoj zamisli Lugeon-ova metoda se na samom početku izvodila do pritiska od 10 bara (1 MPa), ali se u kasnijem razvoju pritisak injektiranja nije striktno vezivao za ovu vrednost, već on može biti niži ili viši, što je uslovljeno svojstvima sredine koja se ispituje.

U konkretnom slučaju primenjen je silazni način ispitivanja (sa jednim pakerom), pri čemu je zbog relativno male visine nadsloja, maksimalni pritisak ispitivanja usvojen od 6 bara. Ispitivanje je izvršeno na tri izolovane dužine u bušotinama B-1 i B-2 i to u zonama gde će se nalaziti sidrišna deonica prednapregnutih geotehničkih sidara.

Intervali (etaže) na kojima je vršeno ispitivanje su 5 m dužine, i to: 10 - 15 m, 15 - 20 m i 20 - 25 m. Ciklusi ispitivanja u bušotini B1 su izvedeni u 5 faza (pri čemu je svaka trajala od 5 do 12 min, tj. do ustaljenja protoka), i to sledećim redosledom: 0 - 2 - 4 - 6 - 4 - 2 bar. Ciklusi ispitivanja u bušotni B-2 izvedeni su u 3 faze i to sledećim redosledom: 0 - 2 - 3 - 2 bar.

U zavisnosti od izgleda dijagrama mogu se doneti određeni zaključci o karakteristikama pukotina i njihovom ponašanju pod pritiskom. Tako na primer, rezultati analiza u bušotini B-1, u intervalu od 10 - 15 m, ukazuju da je prilikom ispitivanja došlo do pojave ispiranja pukotina, slika 5.



Slika 5. Rezultati opita VDP-a za bušotinu B-1 u intervalu 10 - 15 m a) dijagram zavisnosti protoka i pritiska, b) protok u različitim ciklusima, c) Lugeon-ova jedinica (Lu) za različite cikluse

Vodopropusnost stenske mase (Lugeon-ova vrednost) postupno raste bez obzira na porast pritiska, što ukazuje da je prilikom ispitivanja došlo do ispiranja postojećih pukotina ili delimičnog pomeranja stenske mase. Za ocenu vodopropusnosti merodavna je najveća  $Lu$  vrednost, koja u ovom slučaju iznosi 21,14. Na osnovu svih rezultata

ispitivanja može se zaključiti da stenska masa pripada grupi sa ponekom otvorenom pukotinom, pri čemu je vrednost  $Lu$  na donjoj granici razmatanog intervala. Kartiranjem jezgra bušotina određene su prosečne  $RQD$  vrednosti u svim intervalima ispitivanja VDP-a i one su prilično uniformne, a kreću se u rasponu od 92 do 95%, što ukazuje na masivnu neispucalu stensku masu.

### 3.2. Kategorizacija stenske mase i odabir merodavnih geotehničkih parametara za projektovanje

Da bi se odredili geotehnički parametri za projektovanje potrebno je poznavati karakteristike intaktnih delova stenske mase i pukotina. Njihovom kombinacijom, a najčešće na osnovu primene klasifikacionih sistema, određuju se parametri stenske mase. Za ove potrebe korišćen je GSI klasifikacioni sistem i Hoek-Brown-ov (HB) kriterijum loma. GSI vrednost je određena na osnovu tzv. kvantifikovanog GSI dijagrama [3]. Da bi se na ovaj način odredila GSI vrednost potrebno je poznavati  $RQD$  vrednost i parametar za stanje pukotina iz RMR klasifikacije ( $J_{cond89}$ ), koji se dobija sabiranjem bodova za kontinualnost, zev, hrapavost, izmenu i ispunu.

Parametri za stanje pukotina određeni su inženerskogeološkim kartiranjem izdanaka stenske mase i jezgra bušotina, pri čemu je korišćena najnepovoljnija situacija, tj. slučaj najgoreg stanja diskontinuiteta. Za datu stensku masu okolnosti su takve da su sve familije pukotina sličnih karakteristika. RMR vrednost određena je na jezgru za intervale od 3 m dužine, kao i na otvorenim izdancima. Da bi se definisao HB kriterijum loma, pored GSI vrednosti, potrebno je odrediti konstantu  $m_i$  i jednoaksijalnu čvrstoću na pritisak. Ove vrednosti su određene na osnovu laboratorijskih triaksijalnih i jednoaksijalnih opita. Vrednost konstante  $m_i$  određena je fitovanjem nelinearne HB jednačine za 5 tačaka dobijenih ispitivanjima probnih tela u Hoek-ovoj triaksijalnoj ćeliji za različite nivoe bočnog napona. U zavisnosti od tehnike fitovanja konstanta  $m_i$  za krečnjak ima vrednost od 10 do 12, slika 6. Kao merodavan parametar usvojena je vrednost od  $m_i=12$ . Ova vrednost je u saglasnosti sa preporukama iz literature. Pored toga, na slici 6 prikazani su i uzorci injekcione mase i krečnjaka pre i nakon ispitivanja.

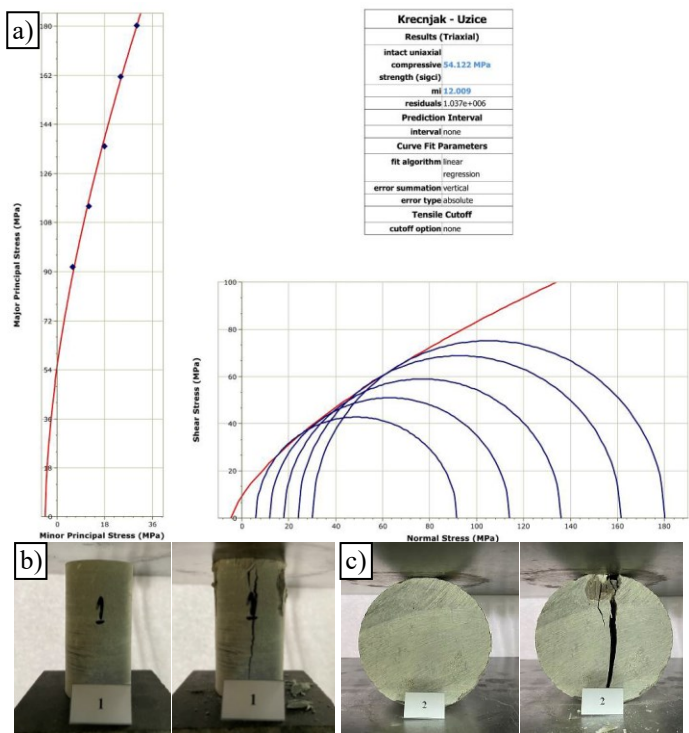
Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak krečnjaka usvojena je kao prosečna vrednost svih ispitivanja za pojedine sredine. U obzir su uzete i vrednosti jednoaksijalne čvrstoće dobijene na osnovu opita tačkastog opterećenja (ispitivanjima je dokazano da koeficijent korelacije između indeksa tačkastog opterećenja i jednoaksijalne čvrstoće iznosi  $k=17$ ). Jednoaksijalna čvrstoća injekcione mase se kreće oko 30 MPa.

Modul deformacije stenske mase određen je na osnovu HB kriterijuma na osnovu jednačine koju su predložili Hoek i Diederichs (2006) [2]. Za ove potrebe usvojene su vrednosti konstante  $MR$  (modulnog broja, koji predstavlja odnos intaktnog modula elastičnosti i intaktne jednoaksijalne čvrstoće) od 400 za krečnjake.

Ovako dobijeni HB parametri iskorišćeni su da se za date nivoe napona odrede ekvivalentni Mohr-Coulomb-ovi parametri.

Smičuća čvrstoća pukotina definisana je na osnovu Barton-Bandisovog (BB) kriterijuma loma, za koji su podaci dobijeni prema proceduri opisanoj u poglavlju 2.1. Veličine rezidualnog ugla trenja ( $\phi_r$ ) i Poisson-ovog koeficijenta ( $\nu$ ) su procenjene na osnovu literaturnih podataka.

Napominjemo da je zbog potrebe za procenom nosivosti na kontaktu stenska masa - injekciona masa izvršeno zasebno određivanje parametara stenske mase u delu sidrišne deonice. Faktor oštećenja stenske mase je usvojen konzervativno kao  $D=0.7$  za čitavu stensku masu.



Slika 6. Rezultati laboratorijskih ispitivanja a) triaksijalni opit, b) uzorak U-1 injekcione mase (UCS=29MPa), c) uzorak krečnjaka u opitu indirektnog zatezanja (Brazilijanski opit)

## 4. GEOTEHNIČKI PRORAČUN

### 4.1. Karakteristike prednapregnutih geotehničkih sidara

Programom radova predviđena je ugradnja i ispitivanje (investigation test) dva testna sidra u zoni opraca mosta na strani Starog grada.

Bušotine B-1 i B-2 su naknadno proširene na prečnik  $\varnothing 146\text{mm}$ , kako bi moglo da se ugradi sidro sa 12 sajli, čiji je maksimalni prečnik ograničen prečnikom spoljašnjih distancera i silikonskih prstenova ( $\varnothing 135\text{-}139\text{mm}$ ).

Na gradilište su donešena dva sidra sledećih karakteristika:  $12 \times 15,7\text{mm}$  - Y1860 S7;  $F_{pk}=279\text{kN}$ ,  $F_{p0,1k}=246\text{kN}$ ,  $S_0=150\text{mm}^2$ ;  $L_g=26,50\text{m}$  (od čega je  $1,50\text{m}$  za hvatanje presom);  $L_b=15\text{m}$  (dužina sidrišne deonice); Crevo za injektiranje  $13 \times 2\text{mm}$  sa otvorima na svakih  $1,0\text{m}$  u sidrenoj op, povratno i sekundarno crevo. Glava privremeno geotehničkog sidra tip  $12 \times 0,62''$ , se sastoji od: podložne ploče  $340/340/50$  h. $\varnothing 136\text{mm}$ ; ankerne čaure; 12 klinova i 12 PE prstenova.

Sidra su privremenog karaktera, tj. nemaju dodatnu antikorozivnu zaštitu potrebnu da bi vršila funkciju trajnih sidara. Izgled sidara na gradilištu i u toku ispitivanja prikazan je na slici 7. Položaj sidara prikazan je na situacionom planu, slika 1c. Testno sidro 1 je nagnuto pod uglom od 15° stepeni u odnosu na horizontalu, sa azimutom od 50°. Testno sidro 2 se nalazi u zoni oporca mosta i nagnuto je pod uglom od 17°, sa azimutom od 70°.

Oslonac glave sidra je dimenzionisan prema ideji izvođača radova u varijanti sa SikaGrout-314RS komponentom (Visokokvalitetni, cementni, ekspandirajući, samorazlivajući malter sa kompenzovanim skupljanjem) i ankersnom pločom.

Institut IMS iz Beograda je dostavio specifikaciju injekcione mase (uz izveštaj o dokazu kvaliteta) i metodologiju ispitivanja ankera, pri čemu je i izvršio kontrolna ispitivanja (test granične nosivosti) ankera (prema SIA normama). Kao maksimalna sila testiranja usvojena je vrednost od  $P=2678$  kN. Ispitivanje je vršeno u osam prirasta od po  $\Delta P=291$  kN (641, 932, 1223, 1514, 1805, 2096, 2387, 2678 kN). Kod početne sile ispitivanja ( $P_a=350$  kN) izmerena je početna deformacija, nakon čega je sidro napregnuto na sledeći nivo opterećenja. Na svakom stupnju opterećenja merene su defomracije u periodu od 15 min (u vremenskim intervalima od 1, 2, 5, 10 i 15 min). Nakon toga vršeno je rasterećenje na početnu silu od 350 kN. Za silu testiranja od 2678 kN opterećenje je trajalo 60 min. Pri svakom nivou opterećenja kontrolisana je granična nosivost i kriterijum puzanja.

Proračun geotehničkih sidara i rezultati nosivosti su sastavni deo elaborata [1] i ovde neće biti prikazani.



Slika 7. Izgled sidara na gradilištu a) prelaz sa slobodne na sidrišnu deonicu, b) izgled distancera i unutrašnjeg raspoređivača, c) donošenje sidra na gradilište, d) trenutak ispitivanja sidra br. 2

## 4.2. Analize stabilnosti

Kako bi se procenila stabilnost obalnih stubova usled dejstva sile tzv. prednapregnute trake (stress ribbon) izvršena je naponsko-deformacijska analiza metodom konačnih elemenata (MKE). Prilikom proračuna korišćen je program RS2 [4] koji je namenjen za geotehničke proračune. Analize su urađene pod pretpostavkom 2D ravnog stanja deformacija. S obzirom da je stenska masa ispucala sredina u analizu su

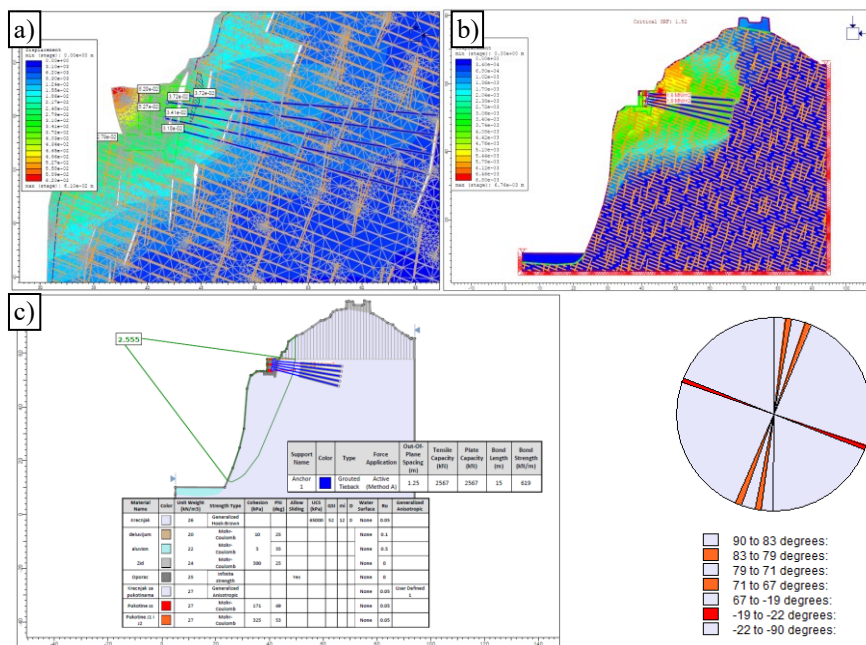
uključeni kontaktni (interface) elementi kako bi se oponašao uticaj pukotina. Intaktni delovi stenske mase predstavljeni su kao Hoek-Brown-ov materijal, dok je rastojanje između pukotina (zbog numeričke stabilnosti) usvojeno od 1,0 m za međuslojne i 3,0 m za dve subvertikalne familije. Kontinualnost međuslojnih pukotina procenjena je da iznosi 80% (20% : 80% = materijalni mostovi : pukotine), pri čemu su njihove dužine 5 m. Dužine subvertikalnih pukotina su 5 m, a kontinualnost je 50%. Svi parametri koji su korišćeni pri naponsko-deformacijskoj analizi prikazani su u okviru proračuna stabilnosti.

Geotehnička prednapregnuta sidra su predstavljena opcijom “tieback” gde se mogu uneti sve karakteristike geotehničkog sidra (vezivna čvrstoća, prečnik bušotine, zatezna čvrstoća užadi, dužina sidiršne deonice, sila prednaprezanja itd.).

Proračuni su izvršeni u nekoliko faza: generisanje inicijalnog naponskog stanja (pretpostavljeno je da su horizontalni i vertikalni naponi jednaki, tj.  $K_0=1.0$ ); Iskop za izgradnju obalnih stubova; Formiranje stubova; Ugradnja geotehničkih sidara i prednaprezanje; dodavanje sile od prednapregnute trake u vidu jednakopodeljenog opterećenja.

Za svaku od navedenih faza dobijena su pomeranja i faktor sigurnosti, a ovde će biti prikazani samo rezultati poslednje faze, slika 8a.

Da bi se odredila veličina faktora sigurnosti u proračunu metodom konačnih elemenata korišćen je postupak redukcije čvrstoće (SSR), slika 8b.



Slika 8. Rezultati proračuna stabilnosti a) faktor sigurnosti prema MKE, b) pomeranja u zoni stuba, c) faktor sigurnosti prema MGR i anizotropni model krečnjaka

Nakon prihvatanja sile od prednapregnute trake pomeranja su cca. 6,20 cm. Usled zatezanja dolazi do otvaranja pukotina, što značajno utiče na pomeranja. Ovde se napominje da na veličinu otvaranja pukotina značajnu ulogu ima njihova krutost (normalna i smičuća). Napominjemo da su analize urađene i za varijantu bez pukotina,



kada je stenska masa predstavljena kao ekvivalentni kontinuum (HB materijal). Ukupna pomeranja su tada značajno manja i iznose nekoliko mm.

Radi provere i upoređivanja rezultata analize stabilnosti urađene su i metodom granične ravnoteže (MGR) u programskom paketu Slide2 [5]. Prilikom proračuna stenska masa je predstavljena generalizovanim anizotropnim modelom sa tri familije pukotina, pri čemu su parametri usvajani kao ponderisane vrednosti u odnosu na procenutalno učešće materijalnih mostova i pukotina, slike 8c i 8d. Kako bi se eliminisalo zatezanje i potporna linija međulamelarnih sila održala u ravnoteži u analizu je uvedena pukotina zatezanja.

Na osnovu prikazanih analiza može se zaključiti da globalna stabilnost kosina nije ugrožena. Veličine faktora sigurnosti između MKE i MGR su različite i posledica su različitih pretpostavki i formulacije samih metoda, a što se najviše odnosi na način na koji su pukotine tretirane u jednom i u drugom slučaju.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati geotehničkih istraživanja i proračuna za potrebe izgradnje pešačkog mosta, sistema prednapregnute trake, preko klisure reke Đetinje u Starom gradu u Užicu. Zatežuću silu od 30MN potrebno je prihvatiti sistemom prednapregnutih anкера. Pored klasičnih ispitivanja, u bušotinama su izvedeni i opiti vodopropusnosti pod pritiskom (VDP), nakon čega su izvršena ispitivanja nosivosti sidara.

Model terena formiran je postupkom fotogrametrijskog snimanja.

Geostatičkim proračunima stabilnosti u obzir je uzet eksplicitni uticaj pukotina na veličinu faktora sigurnosti i pomeranja konstrukcije.

Rezultati numeričkih analiza prema MKE i MGR pokazuju da su pomeranja i faktori sigurnosti u zadovoljavajućim granicama.

## 6. REFERENCE

- [1] Berisavljević i sar. (2022) Geotehnički elaborat o izvođenju geomehničkih i geotehničkih istražnih radova za potrebe izgradnje mosta na starom gradu. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [2] Hoek, E., Diederichs, M.S. (2006) Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203-215 <https://doi:10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
- [3] Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S. (2013) Quantification of the Geological Strength Index Chart 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco
- [4] Rocscience Inc. 2022a. RS2-2D finite element analysis of geotechnical structures, version 11.013. Toronto
- [5] Rocscience Inc. 2022b. SLIDE-2D limit equilibrium analysis of slope stability, version 9.020. Toronto