

Primljen / Received: 20.6.2014.

Ispravljen / Corrected: 16.1.2015.

Prihvaćen / Accepted: 30.1.2015.

Dostupno online / Available online: 10.2.2015.

Izvođenje i osiguranje dubokih iskopa u flišnim stijenama pri složenim geotehničkim uvjetima

Autori:



Prof.dr.sc. **Radojica Lapčević**, dipl.ing.geol.
Sveučilište u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet
lapcevic@rgf.bg.ac.rs



Bogdan Vojnović, dipl.ing.građ.
Geosonda - Konsolidacija AD
Beograd, Srbija
vojnovicbogdan@gmail.com



Dr.sc. **Petar Lokin**, dipl.ing.geol. (prof. u mirovini)
Sveučilište u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet
petarlokin@gmail.com



Snežana Bogdanović, dipl.ing.geol.
Sveučilište u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet
snezana.zecevic@rgf.bg.ac.rs

Stručni rad

Radojica Lapčević, Bogdan Vojnović, Petar Lokin, Snežana Bogdanović

Izvođenje i osiguranje dubokih iskopa u flišnim stijenama pri složenim geotehničkim uvjetima

U specifičnim uvjetima izvođenja, neposredno ispod objekata magistralne prometnice, u djelomično degradiranim, tanko uslojenim vulkanogeno-sedimentnim stijenama, na osnovu rezultata istraživanja i provedenih analiza, izvršen je izbor tehnologije iskopa, vrste i opsega zaštitnih mjera nužnih za osiguranje stabilnosti kosina. Za izvođenje i osiguranje stabilnosti dubokog i širokog temeljnog iskopa primijenjena je metoda, prikazana u ovom radu, koja je osigurala stabilnost postojećih objekata i sigurnost rada, u svakoj fazi iskopa, i pri tom vrlo kratak rok i nisku cijenu radova.

Ključne riječi:

kosina, stabilnost, iskop, osiguranje, sigurnost, mikropiloti

Professional paper

Radojica Lapčević, Bogdan Vojnović, Petar Lokin, Snežana Bogdanović

Realization and protection of deep flysch excavations in complex geotechnical conditions

The excavation technology, and the type and scope of slope protection measures, were selected based on preliminary analyses and investigation results, in specific construction conditions, immediately below some major road facilities, in partly degraded thinly layered volcanogenic sedimentary rocks. The realization and protection of a deep and wide foundation pit was made according to the method presented in this paper, which effectively ensured stability of the existing structures and full safety of work in every phase of excavation, all this under a very tight schedule and at low cost of construction work.

Key words:

slope, stability, excavation, protection, safety, micropiles

Fachbericht

Radojica Lapčević, Bogdan Vojnović, Petar Lokin, Snežana Bogdanović

Dürre, standardisierter Niederschlagsindex, Dezil-Methode, Normalprozentsatz, Index der Niederschlagsanomalie, Schrittverfahren

Aufgrund der Ergebnisse durchgeführter Untersuchungen und Analysen sind Aushub-Technologie, sowie Art und Umfang der erforderlichen Maßnahmen zur Baugrubensicherung für spezifische Ausführungsverhältnisse, direkt unter der Konstruktion einer Magistralen-Straße in teilweise abgebautem, dünn-schichtigem Sedimentgestein vulkanischen Ursprungs, bestimmt worden. Die beschriebene Methode ist zur Ausführung und Stabilitätssicherung der tiefen Baugrube angewandt worden, so dass die Stabilität bestehender Objekte sowie eine gefahrlose Arbeitsabwicklung, trotz kurzer Fristen und niedriger Kosten, versichert werden konnten.

Schlüsselwörter:

Hang, Stabilität, Aushub, Sicherung, Sicherheit, Wurzelpfähle

1. Uvod

Nestabilnosti na kosinama iskopa u stijenama javljaju se u praksi najčešće kao posljedica nekih neadekvatno izvedenih radova. Neke od mjera za stabilizaciju kosina primjenjuju se kao preventivne, prije i tijekom izvođenja iskopa. U nekim slučajevima, nakon pojave nestabilnosti primjenjuju se interventne sanacijske mjere. Mjere koje se primjenjuju za osiguranje stabilnosti kosina, preventivne i interventne, u svom konstrukcijskom smislu su suštinski identične i svode se na dio konstrukcije koji treba izravno prihvatiti stijensku masu (armaturne mreže, mlazni beton, AB rebra, AB platna ili slični elementi) i dio konstrukcije koji treba te utjecaje, prihvaćene sile, prenijeti u dublje i stabilne dijelove stijenske mase u zaleđu kosine (sidra). Proces sanacije povezan je s radom u zoni povećanog rizika, jer sve dok se ne izvedu projektirane mjere, postoji opasnost od pokretanja potencijalno stabilnih blokova, ili čak i nestabilnih zona, ako je prije toga bilo nemoguće, ili neracionalno, njihovo uklanjanje kavanjem ili miniranjem. S druge strane, proces stabilizacije kosine zasniva se na koncepciji rada u stabilnim uvjetima. Svaka faza iskopa i primjene projektiranih mjera uvjetovana je prethodnim dokazom stabilnosti radnog prostora i postojećih okolnih objekata. Upravo potreba da se radovi izvode u sigurnim uvjetima, u svakoj njihovoj fazi, prilično je ograničavajuća pri izvođenju radova na stabilizaciji iskopa u stijenama. Izbor tehnologije iskopa, vrste i opsega mjera za osiguranje privremene i trajne stabilnosti visokih kosina, prije svega, uvjetovan je geometrijom kosina, svojstvima stijenskih masa, morfologijom terena i pristupačnošću lokaciji na kojoj se iskop izvodi. U ovom radu dan je prikaz takvog slučaja, uz analizu svih njegovih specifičnosti [1, 2]. Položaj izvedenog iskopa prikazan je na slici 1.

2. Osnovne geomorfološke karakteristike terena i svojstava stijenskih masa

Predmetna lokacija nalazi se neposredno ispod trase Jadranske magistrale, na dionici Budva – Petrovac, lokalitet Rafailovići – Kamenovo. Radi poboljšanja prometnih uvjeta, na toj dionici provedena je rekonstrukcija, proširenje magistralne ceste, pri kojoj su poluobjekt i potporni zid locirani na granici građevinske parcele na kojoj je predviđen, a potom i izveden iskop.

Šire područje istraživanog terena pripada primorskom krškom i padinskom tipu reljefa. Abrazijski oblici reljefa se pojavljuju u vidu strmih stjenovitih segmenata visine i do 50 m, uz samu južnu granicu parcele, kao i potkapine nastale uslijed djelovanja vjetrova, koji se nalaze u podnožju odsjeka segmenta i imaju izgled olučastih udubljenja [3].

Dio terena na rtu Đevištenje, na kojemu se nalazi parcela, predstavlja strmo nagnutu padinu prema uvali Rafailovići. Sama parcela ima kote približno 35 m n.m. u svom jugozapadnom dijelu, do 55 m n.m. u jugoistočnom dijelu. Nagib padine na dijelu gdje se predviđa iskop u granicama je od 25° do 30°. Lokalno, uz postojeću prometnicu, u zoni tehnogenih aktivnosti, zbog odlaganja viška iskopanog stijenskog materijala, nagib je i do 40° [4].

Geološku građu terena čine tvorevine mezozojske trijasko starosti, a preko njih su rasprostranjene kvartarne naslage [5]. Vulkanogeno-sedimentni niz na toj lokaciji čine tufiti i rožnjaci, lapori, pješčenjaci i, u višim dijelovima, pločasti vapnenci. Svi se oni prema gore naizmjenično smjenjuju, a najzastupljeniji su tufiti, pješčenjaci, lapori i vapnenci. Cijeli je niz pločaste do tankouslojene teksture, a monoklino zaliježe prema jugoistoku.

Trijaski karbonatni niz sedimentata leži normalno preko sedimentno-vulkanogenog niza, a preko njega, također normalno,



Slika 1. Položaj kosine (lijevo) i izgled padine (desno) prije izvođenja radova [2]

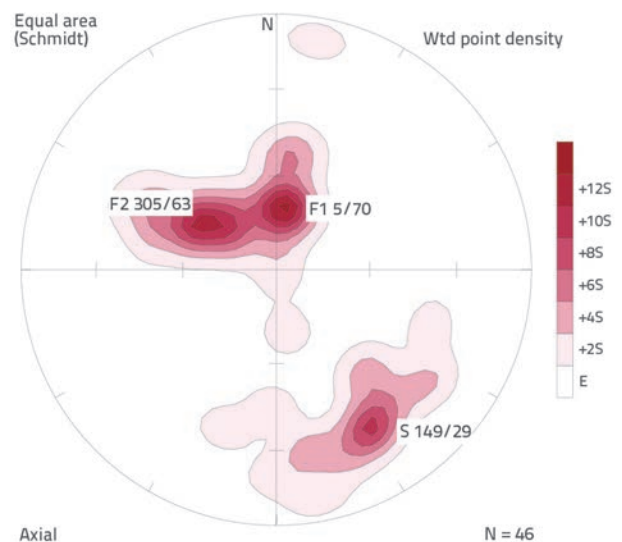


Slika 2. Stijenska masa na izdancima [4]

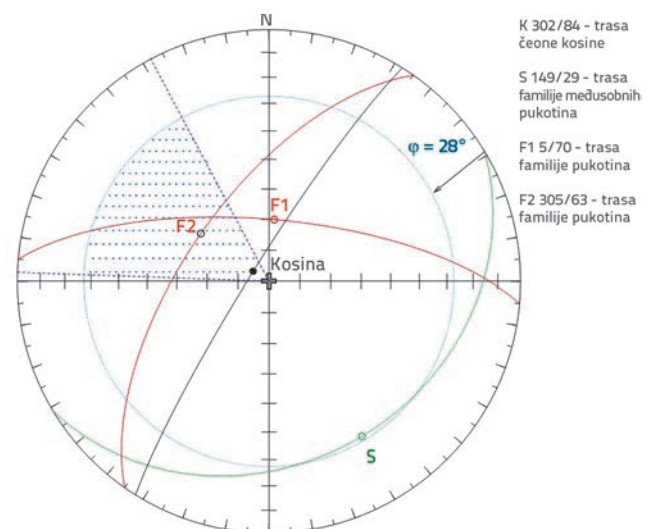
leže sedimenti jure. Na otkrivenom profilu iznad rta Đevištenje i magistralne prometnice jasno se izdvajaju, u donjem dijelu niza pločasti do tankoslojeviti vapnenci s rožnjacima crvenkaste boje, a u gornjim dijelovima debeloslojeviti do bankoviti vapnenci s proslojcima rožnjaka, koji padaju prema jugoistoku pod kutom od 25° do 30° (slika 2.).

U pripovršinskoj zoni, preko osnovne svježe stijenske mase, zapaža se tanja zona eluvijalnog trošnog materijala. Ispod je stijenska masa intenzivnije ispucala i djelimično izmijenjena fizikalno-kemijskim procesima, tj. procesima površinskog raspadanja. Granica između osnovne i djelimično izmijenjene stijenske mase je postupna i teško uočljiva. Na padini, preko osnovne stijenske mase kao kontinuirani pokrivač, zastupljene su deluvijalno-eluvijalne tvorevine i neplanski je odlagan stijenski materijal iz iskopa tijekom izgradnje i nedavne rekonstrukcije magistrale. One se sastoje od zaglinjenog prašinasto-pjeskovitog trošnog materijala s odlomcima matičnih čvršćih stijena, rožnjaca, vapnenaca i lapora. Zbog relativno male debljine, nemaju veće praktično značenje na uvjete osiguranja kosine, ali se njihova prisutnost mora uzeti u obzir.

Međuslojne površine predstavljaju najbolje izražene mehaničke diskontinuitete, i na izdancima su najbrojnije i najuočljivije pukotine. Osim međuslojnih površina, na konturnom dijagramu (slika 3.) jasno se uočavaju još dvije vrste pukotina, koje se međusobno znatno razlikuju po pružanju, dok im je po padu razlika neznatna [4]. Također, i prostiranje im je različito, po pravilu se prate unutar pojedinačnih debljih ili nekoliko tanjih slojeva. Najčešće su stisnute, bez ispune, a zidovi su im ravni [6]. Vjerojatno je riječ o vlačnim pukotinama koje su nastale u procesu dijageneze i ubiranja sedimenata. Međutim, imajući na umu azimut čeone kosine, za njenu stabilnost ove pukotine su značajne [7-9]. Naime, vlačne pukotine, jedne od vrsta, približno su paralelne s budućom kosinom pa, po kriterijima Paneta [7], postoji kinematička mogućnost za klizanje duž njih (slika 4.). Na dijelovima kosina uz magistralu mjestimično je i povremeno dolazilo do klizanja, tj. otkidanja i odronjavanja manjih blokova stijenske mase, pa se ovakve pojave mogu očekivati i na čeonj kosini iskopa, koja joj je po pružanju paralelna.



Slika 3. Konturni dijagram pukotina [4]



Slika 4. Analiza kinematskih mogućnosti smicanja duž pukotina na čeonj kosini temeljne jame [4]

Tablica 1. Parametri fizikalno-mehaničkih svojstava za geostatičke proračune [4]

Sredina	Parametar	Zapreminska težina γ [kN/m ³]	Kut unutrašnjeg trenja φ [°]	Kohezija c [MPa]	Jednoosna čvrstoća σ_{ci} [MPa]	GSI	m_i
GT-1. Deluvijalno-eluvijalna glinovita drobina		20,5	25	0,020	-	-	-
GT-2. Vapnenci i lapor		25,5	46 30*	0,180 0,045*	32	35	7
GT-3. Tufiti, pješčenjaci i lapor		24	39 28*	0,085 0,035*	18	20	9

Napomena: Vrijednosti s oznakom * parametri su čvrstoće na smicanje duž pukotina

Osim opisanih vrsta pukotina, registrirane su i druge slučajne pukotine koje dijele stijensku masu na monolite promjenjive veličine. Veličina monolita varira u intervalu od nekoliko cm³ u intenzivno ispućalim zonama i u pločastim do tanko uslojenim nizovima, a podređeno, od nekoliko dm³ u slojevitim nizovima vapnenaca.

Stijenske mase su bezvodne u zoni građevinskih aktivnosti, a formirani relativni vodonosnik podzemnih voda je duboko, na nivou mora [10]. Pri izradi geotehničkog modela, za potrebe proračuna stabilnosti i analiza naprezanja i deformacija kosine, duž iskopa su izdvojene tri geotehničke sredine za koje su usvojeni mjerodavni proračunski parametri:

GT-1. Deluvijalno-eluvijalni pokrivač, glinovite naslage i zaglinjena drobina od matičnih stijena.

GT-2. Karbonatni flišni kompleks - pločasti do slojeviti vapnenci, s rožnacima, u izmjeni s pločastim laporima. Međuslojne pukotine su jako izražene, i najčešće su s laporasto-glinovitom ispunom debljine i do 5 mm.

GT-3. Silikatno-laporasti flišni kompleks - tufiti, u proslojavanju s pješčenjacima i laporima, cijela serija je tanko uslojena do pločasta, a litološki članovi se nepravilno smjenjuju.

Izbor parametara fizikalno-mehaničkih svojstava mjerodavnih za geostatičke proračune, prikazanih u tablici 1., proveden je na osnovi:

- rezultata laboratorijskih ispitivanja uzoraka tla i stijena, po preporukama ISRM [11, 12], s predmetne lokacije i s obližnjih lokacija [13],
- ocjene intaktnih svojstava stijenskog masiva u blizini objekta, na osnovi njegovog litološkog sastava, stupnja raspadnutosti, stupnja ispućalosti, orijentacije i karakteristika pukotina, [6, 14, 15] i
- korištenja računalnog programa RocLab [16].

Za deluvijalno-eluvijalne tvorevine usvojene su prosječne vrijednosti parametara čvrstoće utvrđene laboratorijskim ispitivanjima uzoraka tla. Za Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće usvojen je kut trenja $\varphi = 25^\circ$, i kohezija $c = 20$ kN/m².

Za flišne stijene karbonatnog i silikatno-laporastog kompleks usvojeni su parametri za Hoek-Brownov kriterij čvrstoće. Prema Marinosu i Hoeku [15], karbonatne flišne stijene, vapnenci i lapor svrstani su u grupu C, a silikatno-laporaste stijene, tufiti

i pješčenjaci u grupu E. Radi proračuna uzeta je vrijednost GSI = 35 za karbonatne flišne stijene i GSI = 20 za flišne silikatno-laporaste stijene. Laboratorijskim ispitivanjima uzoraka određena je prosječna vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće za vapnence od 50,9 MPa, a za pješčenjake 28,2 MPa. Na uzorcima ostalih litoloških članova nisu ispitivanja provedena. Međutim, unutar izdvojenih flišnih kompleksa vapnenci i pješčenjaci predstavljaju najčvršće litološke članove, pa su za proračune usvojene manje vrijednosti za jednoosne čvrstoće, koje reprezentiraju kompleks u cjelini, sukladno preporukama Marinos i Hoeka [15]. Radi proračuna usvojena je vrijednost $\sigma_{ci} = 32$ MPa za karbonatne flišne stijene i $\sigma_{ci} = 18$ MPa za silikatno-laporaste stijene. Vrijednost parametra $m_i = 7$ usvojena je za flišne stijene karbonatnog kompleksa, što odgovara mikritnim vapnencima i laporima. Za flišne silikatno-laporaste stijene usvojena je vrijednost $m_i = 9$, što odgovara tufitima. Vrijednost faktora poremećenja stijenske mase uzeta je $D = 0$, jer je predviđen strojni iskop kosine, pa se ne očekuje oštećenje stijenske mase u zaleđu kosine.

Za potrebe proračuna stabilnosti kosine provedena su i ispitivanja parametara čvrstoće na smicanje, i to izravnim smicanjem duž pukotina. Prosječni parametri vršne čvrstoće na smicanje duž pukotina, dobiveni ispitivanjima laboratorijskih uzoraka, prikazani su u tablici 1. Preliminarnim povratnim analizama stabilnosti klizanja blokova iz kosine uz magistralu, koja su se dogodila u neposrednoj blizini predmetne lokacije, dobivene su slične vrijednosti parametara čvrstoće na smicanje. Parametri za Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće, prikazani u tablici 1., za GT-2 i GT-3 sredine, korišteni su pri proračunima stabilnosti kosine za slučaj smicanja kroz stijensku masu. Oni su proračunani uz pomoć računalnog programa RocLab, a na osnovi ulaznih podataka kojima se definiraju i Hoek-Brownovi parametri čvrstoće.

3. Definiranje geotehničkih uvjeta izvođenja iskopa

Izgradnja objekata planirana je ispod postojeće prometnice na platou s približnom kotom od 39 m n.m. Radi formiranja platoa predviđeno je zasijecanje padine u dužini od 85 m, a u širini od 10 do 30 m. Da bi se maksimalno iskoristio raspoloživi zemljišni prostor, predviđeno je postavljanje objekata što bliže

Tablica 2. Faktori sigurnosti za karakteristične profile

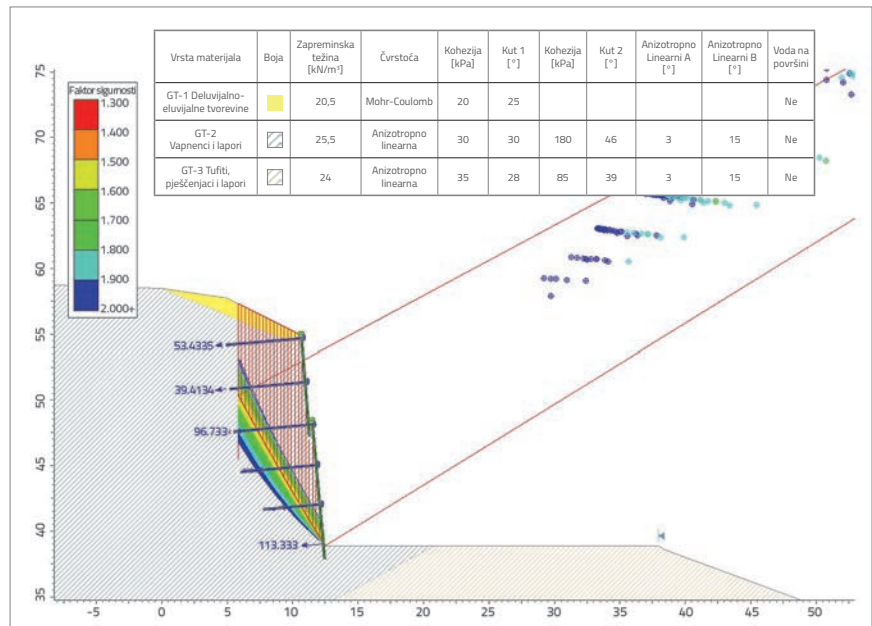
Faktori sigurnosti za moguće slučajeve	Faktor sigurnosti za blokovsko klizanje duž pukotina		
	Kosina u prirodnim uvjetima	Kosina osigurana vanjskom silom od $n \times t/m'$	Osigurana kosina s utjecajem potresa
Profil A - u zoni stupova poluobjekta	0,43	1,50 za 154 t/m'	1,31
Profil B - u zoni trafostanice	0,78	1,50 za 51 t/m'	1,33

magistrali, zbog potrebe osiguranja što većeg prostora za razne sadržaje između objekata i morske obale. Zbog toga je, poštujući navedeni zahtjev, predviđena subvertikalna kosina s čeonim nagibom 10:1 ($\approx 84^\circ$), visine oko 6 m u sjevernom dijelu, do 18 m u južnom dijelu iskopa temeljne jame.

Iskop je potrebno izvesti ispod postojećih objekata, trafostanice, poluobjekta i potpornog zida prometnice, pri čemu njihova sigurnost ne smije biti dovedena u pitanje tijekom i nakon izrade iskopa i izgradnje planiranih objekata na parceli. Teren je strm, skučen, nepristupačan i u zoni je intezivnog prometa, tako da je korištenje teže mehanizacije gotovo nemoguće.

Radi određivanja stabilnosti kosina temeljne jame, urađena je statistička analiza rupturnih elemenata sklopa na bazi terenskih mjerenja elemenata pada slojevitosti i pukotina. Na osnovi tih rezultata, i geometrijskih elemenata projektiranih kosina, provedene su analize i utvrđene kinematičke mogućnosti smicanja duž pukotina, kao što predlažu i preporučuju Panet [7], Hoek i Bray [8] te Yoon, Jeong i Kim [9].

Imajući na umu da do smicanja duž pukotina ne mora uvijek doći samo zato što postoji kinematička mogućnost, već da pritom moraju biti ispunjeni i granični uvjeti ravnoteže, razmatrana je stabilnost buduće kosine s potencijalno nestabilnim blokovima. Geostatičkim i pseudostatičkim analizama provjerena je stabilnost kosina temeljne jame, a provedene su prema klasičnim situacijama blokovskog klizanja duž jedne ili više pukotina uz pomoć programskog paketa RocPlane [17]. Probablističkom analizom, za smicanje duž postojećih pukotina s nepovoljnijim nagibom od 63° , definirani su najnepovoljniji položaji vlačnih pukotina, odnosno njihov razmak od kosine i nagibi. Proračuni su provedeni za ove slučajeve, pa su rezultati na strani tehničke sigurnosti. Na osnovi proračuna provedena je kontrola stabilnosti na profilu u zoni stupa poluobjekta (A), s dodatnim opterećenjem od poluobjekta i prometa. Također, proračuni stabilnosti su urađeni i za najnepovoljniji slučaj, profil



Slika 5. Geotehnički model kosine, s mjerama osiguranja na profilu B, za analizu stabilnosti

s najvećom visinom iskopa (B), u zoni trafostanice. Utjecaj seizmike je simuliran ekvivalentnim statičkim opterećenjem, horizontalnom silom od 0,1 W (težine kliznog bloka), u skladu s podacima seizmičke mikroregije [18], preporukama Seeda [19], Hynes-Griffin i Franklina [20] te sukladno Pravilniku [21]. Rezultati proračuna stabilnosti kosine bez mjera osiguranja, kao i proračunane veličine sila uz pomoć kojih se trebaju osigurati nužni faktori sigurnosti, prikazani su u tablici 2., za karakteristične profile dane na slici 8.

Izvođenjem stabilizacijskih mjera treba osigurati minimalni faktor sigurnosti 1,30 s utjecajem seizmičkog djelovanja, ili minimalni faktor sigurnosti 1,50 ako se seizmika ne uzima u obzir prilikom analiza. Imajući na umu veličine proračunanih nužnih sila i tehnokonomske razloge, za primarno osiguranje kosine predviđena je konstrukcija od mikropilota, mlaznog betona, veznih greda i sidara, prikazana na slici 8. Kontrolni proračuni stabilnosti kosine s mjerama osiguranja provedeni su uz pomoć programskog paketa Slide [22], metodama granične ravnoteže (Bishopa i Janbua). Da bi se što vjernije simulirala svojstva stijenskih masa, proračuni stabilnosti kosine su provedeni za anizotropnu sredinu. Polazilo se od pretpostavke da će doći do

formiranja klizne plohe djelomice duž postojećih pukotina, a djelomice kroz stijensku masu. U plohi, koja je pod nagibom od 63° , usvojene su vrijednosti parametara čvrstoće na smicanje duž pukotina. Za najnepovoljniji profil B, na slici 5., prikazana je proračunska situacija, dani su proračunski parametri, i naznačen je klizni blok s najmanjim faktorom sigurnosti, što je prema Bishopu $F_s = 1,52$, a prema Janbu $F_s = 1,49$.

4. Prikaz varijantnih rješenja stabilizacije kosine

Analizirano je više varijanti rješenja problema privremenog i trajnog osiguranja kosina iskopa, s objektima u zaleđu, i to:

- prvo rješenje: iskop u kampadama, pri čemu bi do postizanja privremene kote iskop bio nezaštićen, a nakon stabilizacijskih mjera izveo bi se potporni zid ili konstrukcija od mlaznog betona, AB rebara, veznih greda i sidara,
- drugo rešenje: primarno osiguranje iskopa ukliještenim armiranobetonskim pilotima ili dijafragmom,
- treće rešenje: primarno osiguranje iskopa armiranobetonskim pilotima ili dijafragmom sidrenim dublje u stijensku masu,
- četvrto rešenje: primarno osiguranje iskopa konstrukcijom od mikropilota, mlaznog betona, veznih greda i sidara.

Na osnovi geostatičkih proračuna i tehnokonomskih analiza usvojena je četvrta varijanta, jer su se ostale pokazale kao tehnokonomski neopravdane s obzirom na rok izvedbe i ukupnu cijenu. Prije svega:

- prva varijanta je odbačena jer bi u konkretnim uvjetima, s obzirom na prikazane niske vrijednosti faktora sigurnosti neosigurane kosine, moguća visina i širina radnog prostora bila znatno manja, a prekomjerni iskop znatno veći, u odnosu na usvojenu varijantu, što se direktno odražava na trajanje radova i njihovu cijenu,
- druga varijanta je odbačena kao konstrukcijski neracionalna i kao najskuplja u zadanim uvjetima. S obzirom na skučenost

i nepristupačnost terena, kao i nemogućnosti dobivanja dozvole za povremeni prekid prometa, bila bi i teško izvodljiva, - treća varijanta je odbačena kao skuplja u odnosu na usvojenu varijantu, iako konstrukcijski racionalnija u odnosu na drugu varijantu, i s tehničkog aspekta je nešto lakša za izvođenje.

5. Prikaz konstrukcije mikropilota

Ideja usvojenog rješenja, tj. konstrukcije od mikropilota, veznih greda, mlaznog betona i sidara zasniva se na dobivanju potrebnog prostora kontroliranim iskopom stijenskog materijala, bez upotrebe eksploziva i uz minimalne dinamičke utjecaje, naročito u zoni temelja postojećeg poluobjekta.

Naime, predviđeno je da se iskop radi s sukcesivnom zaštitom novoformirane kosine, tako što bi se ona primarno osiguravala mikropilotima, armiranobetonskim gredama i pasivnim sidrima. Potom bi se, tijekom napredovanja iskopa, sekundarno osigurala mlaznim betonom s armaturnom mrežom.

Analizom rezultata prikazanih u tablici 2., vidi se da na profilu A, poluobjekt s opterećenjem značajno utječe na nestabilnost iskopa, pa je predviđeno da se u zoni temelja poluobjekta izvedu armiranobetonska zidna platna i aktivna prednapeta sidra. Samo dimenzioniranje primarnih sanacijskih mjera (cijevna sidra - mikropiloti, pasivna i aktivna sidra i armiranobetonske grede i platna) imalo je cilj prihvaćanje svih geostatičkih utjecaja koji se javljaju pri iskopu temeljne jame, dok su sekundarne mjere (armaturna mreža i mlazni beton) imale cilj zaštititi novoformirano čelo iskopa od budućih egzogenih utjecaja. Radi sprječavanja agresivnog djelovanja atmosferskih i podzemnih voda, prednapeta sidra su elektroizolirana, pasivna sidra su pocinčana, a za mlazni beton i beton korišten je sulfatno otporni cement.

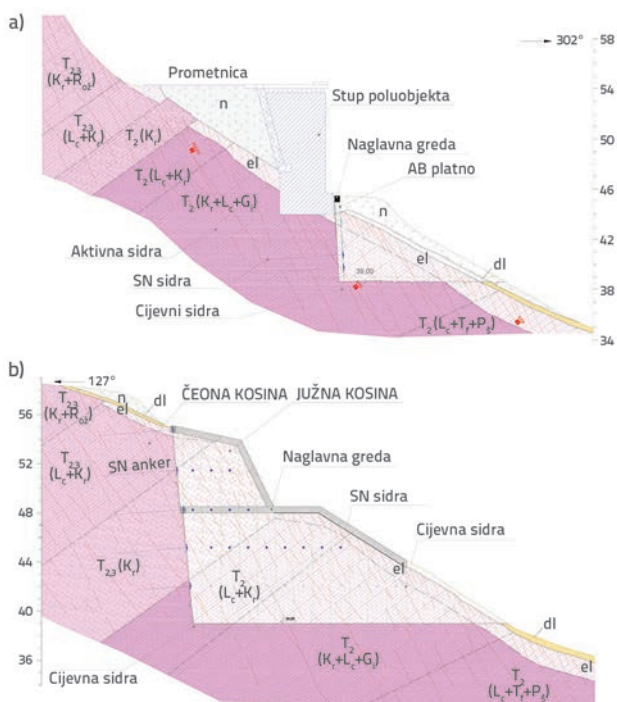
Prva faza rada obuhvaća izradu primarnog sustava zaštite iskopa ugradnjom mikropilota po obodu projektirane temeljne jame. Cijevna sidra - mikropiloti izvedu se ugradnjom čeličnih



Slika 6. Izrada mikropilota po obodu budućeg iskopa (lijevo) i formiranje naglavne grede (desno) [28]



Slika 7. Izgled i detalj iskopa na polovici projektirane dubine [28]



Slika 8. Mjere osiguranja iskopa na karakterističnim profilima A i B [1]



Slika 9. Detalj otkopanih mikropilota i AB zavjesa ispod temelja poluobjekta [28]

cijevi promjera 60,3/52,3 mm od čelika Č0361, u prethodno pripremljenu bušotinu dubine oko 12 m (slika 6.).

U drugoj fazi rada predviđen je iskop stijenskog materijala bez većih dinamičkih utjecaja - potresa, a naročito u blizini stupova poluobjekta i nove potporne konstrukcije (slika 7.). Kako je predviđen iskop u materijalu od III. do V. kategorije (po klasifikaciji GN 200), projektom je predloženo da se taj iskop izvodi hidrauličkim čekićima ugrađenim na bagere, a da se iskop u zonama bliskim osjetljivim konstrukcijskim elementima izvodi bez dinamičkih utjecaja, frezom, ili ručno pikamerima.

Predviđeno je da se, sukcesivno s odvijanjem radova druge faze i oslobađanjem cijevnih sidara, pristupi njihovom osiguranju, u prvom koraku izradom gornje vezne-naglavne grede i bočnih pasivnih sidara RA Ø 36 mm (slika 6.). U toj fazi veća dužina radnog prostora omogućava i cikličnost izvođenja betonskih radova, kako na izradi AB greda tako i na ugradnji mlaznog betona (slike 7. i 9.). Radovi na izradi bočnih pasivnih sidara odvijaju se s kote iskopa kako bi se kosina što brže osiguravala. U zoni najveće visine iskopa, u podnožju trafostanice, projektirana je manja berma u obliku armiranobetonske grede (slika 10.). Izrada berme utječe na povećanje stabilnosti kosine, a s druge strane omogućava da se cijevna sidra rade iz dva dijela, čime se izbjegavaju veća skretanja bušotina i njihov neželjeni ulazak u zonu iskopa, tj. smanjenje površine građevinske parcele.



Slika 10. Izgled osiguranog iskopa i detalj južnog dijela iskopa [28]



Slika 11. Izgled stabiliziranog iskopa nakon primjene tehničkog rješenja [28]

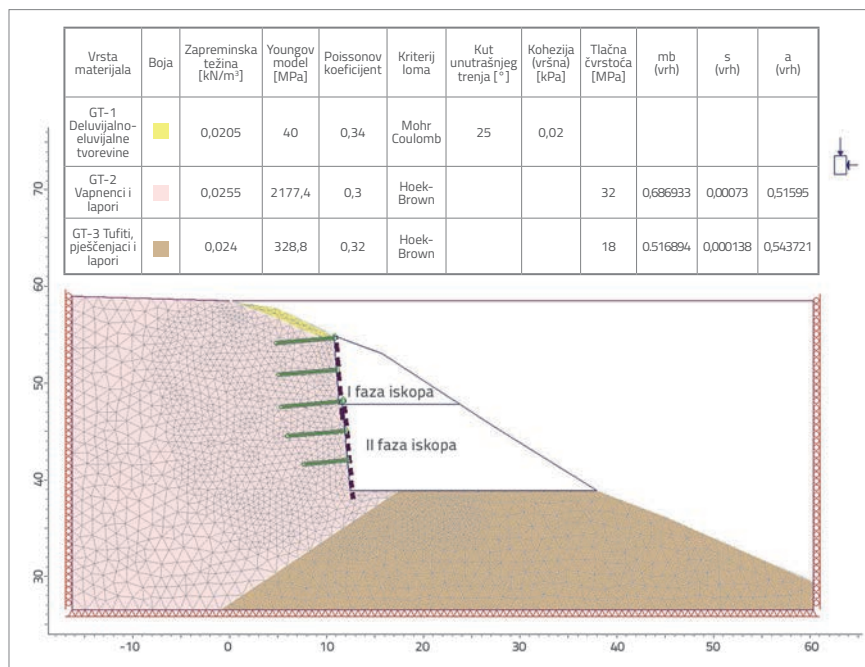
6. Geotehnička opažanja, mjerenja i ispitivanja

Projektiranju i izvođenju konstrukcije za osiguranje stabilnosti kosina, u heterogenim stijenskim masama kao što je fliš, pristupilo se vrlo oprezno, metodološki slično kao što predlažu Brunčić, Jurić-Kačunić i Kovačević [23]. Zbog složenih geotehničkih uvjeta, na lokaciji neposredno okruženoj postojećim građevinama, i uz magistralnu prometnicu, bila je nužna stalna kontrola izvođenja radova. Rezultati geotehničkih opažanja i mjerenja, koja su kontinuirano izvođena tijekom iskopa i osiguranja kosine, slično kao što navodi Arbanas [24], poslužila su za provjere:

- pretpostavki usvojenih u tijeku projektiranja

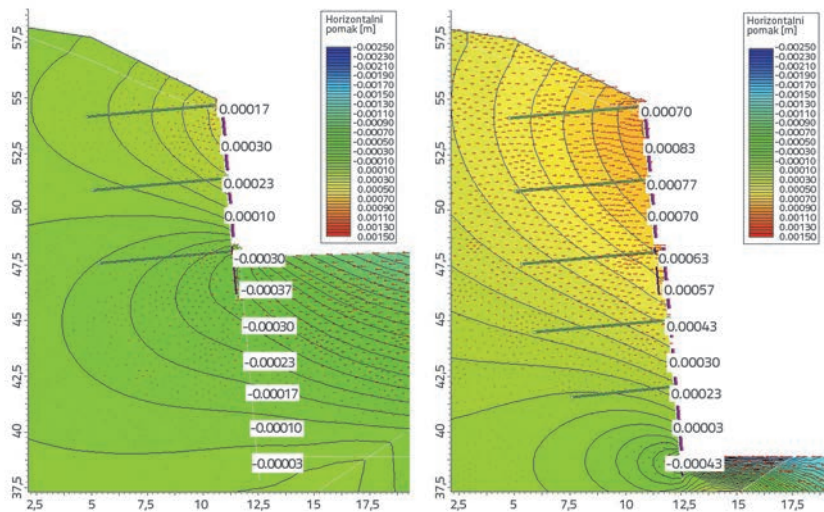
- ponašanja sustava podgradna konstrukcija-okolna stijenska masa, i
- kontrole kvalitete izvedenog podgradnog sustava.

U tijeku projektiranja verifikacija je podgradne konstrukcije za sve faze iskopa i podgrađivanja obavljena primjenom programskog paketa Phase2 [25] koji omogućava numeričku analizu na 2D modelima. Na slici 12. prikazan je proračunski model za profil B, odnosno datni su granični uvjeti i proračunski parametri, naznačene su faze iskopa i prikazani su elementi podgradne konstrukcije. Rezultati provedenih proračuna pokazali su da će, uslijed iskopa, doći do velikog rasterećenja naprezanja u horizontalnom pravcu oko čitavog iskopa, ali ne i duboko u stijensku masu. Jako izražena



Slika 12. Geotehnički model kosine, s mjerama osiguranja na profilu B, za analizu naprezanja i deformacija

preraspodjela naprezanja izazvat će plastifikaciju (latentni lom) u okolnoj stijenskoj masi. Zone plastifikacije neće biti značajne, debljine do približno metar u zonama nožica, pri iskopu prve faze i nakon konačnog iskopa kosine. Rezultati proračuna sila u sidrima pokazuju da su one znatne, unutar očekivanih zona plastifikacije, ali da neće biti prekoračene granične vrijednosti nosivosti sidra jer se očekuju sile od 0,05 do 0,1 MN. Također, rezultati proračuna normalnih sila i momenata, u mlaznom betonu i mikropilotima, pokazuju da su i one ispod graničnih vrijednosti, a najizraženije su u zoni vezne horizontalne grede na polovini kosine i u nožici kosine. Pri iskopu se očekuju najveći pomaci oko 0,3 mm u prvoj fazi iskopa, odnosno oko 0,9 mm nakon čitavog iskopa kosine. Proračunane vrijednosti pomaka u horizontalnom pravcu, za prvu i drugu fazu iskopa kosine, prikazane su na slici 13.



Slika 13. Proračunane vrijednosti horizontalnih pomaka nakon prve i druge faze iskopa kosine

Program opažanja obuhvatio je geodetsku mrežu repnih točki, postavljenih sukcesivno s izvođenjem radova, na naglavnim gredama i konstrukciji postojećeg poluobjekta, na ukupno devet kontrolnih geodetskih profila. Radi provjere kvalitete podgradnog sustava, posebna je pažnja usmjerena ispitivanju kvalitete ugrađenog mlaznog betona, mase za injektiranje sidara i nosivosti sidara na silu čupanja. Laboratorijska ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće σ_p injekcijske smjese provedena su prema odredbama JUS-a U.M8.022. iz 1984., a mlaznog betona prema JUS-u U.M8.022. Ispitivanja nosivosti pasivnih sidara izvedena su po preporuci ISRM [26], a dugačkih prednapetih sidara prema SIA V191 [27].

Geodetskim opažanjem repera registrirani su pomaci ± 2 mm, tj. veličine koje su bile u domeni pogreške mjerenja. Prihvate li se izmjereni pomaci kao točni, oni su za približno 2 do 3 puta veći od proračunanih u analizama naprezanja i deformacija. Ispitivanjima jednoosne čvrstoće injekcijske mase i mlaznog betona dobivene su vrijednosti od preko 30 i 35 MPa, koje su nešto veće od vrijednosti propisanih građevinskim projektom [1]. Provjerom nosivosti 5

pasivnih sidara konstatirano je da je sila čupanja veća od projektom zahtijevanih 200 kN. Također, rezultati ispitivanja 2 aktivna prednapeta sidra su pokazala da oni ispunjavaju kriterij u pogledu puzanja, odnosno koeficijent je $k < 1$ prema normi SIA V 191. Kako su rezultati geotehničkih opažanja, mjerenja i ispitivanja bili u skladu s pretpostavkama usvojenim tijekom projektiranja, iskop i osiguranje kosina temeljne jame izvedeni su u potpunosti prema projektom rješenju.

7. Zaključak

Radovi su u potpunosti realizirani po prikazanom rješenju početkom 2008. godine, (slika 11.), potvrđujući opravdanost usvojenog rješenja,

dinamikom izvođenja i troškovima realizacije. Tijekom samih radova, opremom koja je korištena i primijenjenom tehnologijom, omogućena je izrada konstrukcije s minimalnim zauzećem površine građevinske parcele, omogućena je sigurnost rada, sigurnost odvijanja prometa na inače prilično opterećenom cestovnom pravcu, kao i stabilnost okolnih građevina.

Prikazana metoda osiguranja dubokog i širokog temeljnog iskopa može se primijeniti na većem dijelu jadranskog priobalja, unutar starih gradskih jezgri u skućenim radnim uvjetima, ili po obodima naseljenih mjesta, dakle na dijelovima koji su slični lokaciji prikazanoj u ovom radu u pogledu geomorfoloških karakteristika terena i svojstava stijenskih masa.

Zahvala

Ovaj rad je rezultat projekta TR 36009 koji je financiralo Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Vojnović, B., Lapčević, R.: Glavni građevinski projekat obezbeđenja temeljne jame i zaštite kosina za stambene objekte na lokaciji kat.parcela 1429, 1431/4 (dio) i 1433 k.o. Bečići. *Tehnička dokumentacija* / Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2007.
- [2] Lapčević, R., Vojnović, B., Lokin, P.: Obezbeđenje stabilnosti iskopa primenom konstrukcije s mikro šipovima, *XIV Simpozijum iz inženjerske geologije i geotehnike*, Društvo geoloških inženjera i tehničara Srbije Komitet za inženjersku geologiju i geotehniku, Beograd, str. 427-436, 2012.
- [3] Đerković, B., Grujić P.: *Osnovne hidrogeološke karte primorskog pojasa, u razmeri 1: 25.000*; 1959.
- [4] Lapčević, R., Lokin P.: Elaborat o geotehničkim uslovima iskopa temeljne jame i zaštite kosina za stambene objekte na lokaciji kat.parcela 1429, 1431/4(dio) i 1433 k.o. Bečići. *Tehnička dokumentacija* / Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2007.
- [5] Antonijević, R. i dr.: *Osnovna geološka karta, 1:100.000 i odgovarajući tumač listova Kotor i Budva*, Savezni geološki zavod, 1973.

- [6] ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test: ISRM Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15 (1978) 6, pp.319-368, 1978.
- [7] Panet, M.: Discussion on "Graphical stability analysis of slopes in jointed rock." By K.W. John. *J. Soil Mech. Found. Div., Proc. ASCE.* 95 (SM2), pp.685- 686, 1969.
- [8] Hoek, E., Bray, J.W.: *Rock Slope Engineering Institution of Mining and Metallurgy*, London, 1981.
- [9] Yoon, W.S., Jeong, U.J., Kim, J.H.: Kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes, *Engineering Geology* 67, pp.51-61, 2002., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00144-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00144-8)
- [10] Radulović, M.: *Hidrogeološka karta Crne Gore, podloga za P.P. Republike*, 1981.
- [11] ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test: ISRM Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16 (1979) 2, pp. 135-144, 1979.
- [12] ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test: ISRM Suggested Methods for Determining Point Load Strength, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 22 (1985) 2, pp. 51-60, 1985.
- [13] Radulović, M., Lapčević, R.: Elaborat o geotehničkim istraživanjima za potrebe izrade Generalnog građevinskog projekta rekonstrukcije puta Budva – Bar, Lokalizacija: Rafailovići – Kamenovo od km 910+000 do km 911+600, Građevinski fakultet-Podgorica i Rudarsko-geološki fakultet-Beograd, 2005.
- [14] Hoek, E., Brown, E.T.: Empirical strength criterion for rock masses. *J Geotech Eng Div, ASCE*;106(9):1013-35, 1980
- [15] Marinos, P., Hoek, E.: Estimating the Geotechnical Properties of Heterogeneous Rock Masses Such as Flysch, *Bull. Eng. Geol. Env.* 60, pp. 85-92, 2001., doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s100640000090>
- [16] RocLab: Rock mass strength analysis using the Hoek-Brown failure criterion, User's Guide, *Rocscience Inc.*, 2007
- [17] RocPlane: Planar sliding stability analysis for rock slopes, Theory Manual, *Rocscience Inc.*, 2001
- [18] Seizmogeološke podloge i seizmička mikrojeonizacija urbanog područja Budve, Fond JU Republički zavod za geološka istraživanja Crne Gore, Podgorica, 1980-1981;
- [19] Seed, H.B.: Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams, *Geotechnique*; 29 (3): pp. 215-63, 1979., doi: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1979.29.3.215>
- [20] Hynes-Griffin, M.R., Franklin, A.G.: Rationalizing the seismic coefficient method. Vicksburg: *US Army Corps of Engineers*; pp. 50, 1984.
- [21] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima, Službeni list SFRJ br. 31/81, 49/82, 29/83, 21/88 i 52/90.
- [22] Slide v.5: Computer software. *Rocscience Inc.*, Canada
- [23] Brunčić, A., Jurić-Kačunić, D., Kovačević, M.S.: Projektiranje i izvedba zasjeka u flišnoj stijenskoj masi, *GRAĐEVINAR* 62, 1, pp. 13-23, 2010.
- [24] Arbanas, Ž.: Izvedba građevne jame "Zagrad" u Rijeci, *GRAĐEVINAR* 55 (2003) 10, pp. 591-597, 2003.
- [25] Phase2 v.7: Computer software. *Rocscience Inc.*, Canada
- [26] ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test: Suggested methods for rockbolt testing, part 1: suggested method for determining the strength of a rockbolt anchor (pull test), final draft: march 1974.
- [27] *SIA V191 Recommendation Edition de 1995*, Remplace la norme SIA 191(1977), Tirants d'ancrage precontraints, Zurich, 1996.
- [28] Lapčević, R.: Fotodokumentacija: obezbeđenje temeljne jame i zaštite kosina za stambene objekte na lokaciji kat.parcela 1429, 1431/4 (dio) i 1433 k.o. Bečići. *Tehnička dokumentacija / Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu*, Beograd, 2008.