

USPOREDNA ANALIZA PROJEKTNIH RJEŠENJA REHABILITACIJE KLIZIŠTA NA DESNOJ OBALI RIJEKE KUPE

KRISTINA VULIĆ¹, STJEPAN MATIĆ¹, DANIJELA JURIĆ KAČUNIĆ¹, MLADEN CVETKOVIĆ¹

¹ University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Croatia

Sažetak

Područje Karlovačke županije bogato je vodnim izvorima, rijekama, potocima i hidrološkim oblicima što doprinosi učestaloj pojavi klizišta. Ostvarena klizišta pojavljuju se uz obalu rijeka, uz prometnu infrastrukturu te stambene i gospodarske objekte pri čemu često nedostaju ili su nedostatne mjere stabilizacije pokosa. Za odabir optimalnog rješenja sanacije potrebno je detaljno poznavanje geoloških, hidrogeoloških i okolišnih čimbenika koji utječu na pojavu klizišta. Ovim radom prikazani su provedeni istražni radovi te dva projektna rješenja sanacije niza klizišta uz desnu obalu rijeke Kupe u mjestu Polje Ozaljsko. Predmetna lokacija obuhvaća niz klizišta na potezu od oko 700 m, a u radu je prikazana usporedba sanacije tri klizišta armiranobetonskom pilotnom stijenom u odnosu na izvedbu trajnog zida od čeličnih talpi sa zamjenom materijala, odnosno uređenjem obaloutvrde. Uvažavajući prostorna ograničenja zahvata i imovinsko pravne odnose i izostanak alternativnog prometnog pravca tijekom izvođenja sanacijskih radova, provedeni su opsežni istražni radovi. U radu su prikazani rezultati istražnih radova te analiza stabilnosti klizištem zahvaćenih pokosa za različite proračunske situacije u statičkim i potresnim uvjetima rezultirajući faktorom sigurnosti te provođenje naponsko deformacijskih analiza. Uvažavajući rezultate geotehničkog proračuna, tehnologiju izvedbe i ekonomske aspekte odabrano je optimalno rješenje izvedbom zida od čeličnih talpi.

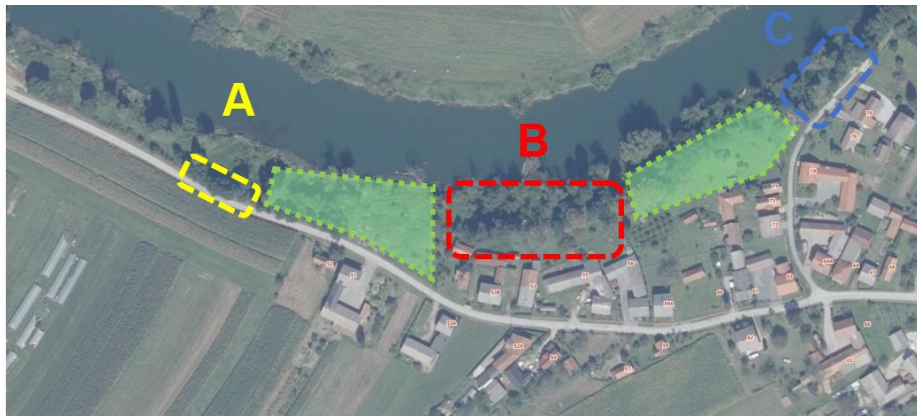
Ključne riječi

Klizište, istražni radovi, prometna infrastruktura, mjere sanacije, pilotna stijena, talpe

1 Uvod

Karlovačka županija nalazi se u kontinentalnom dijelu Hrvatske, a omeđena je Slovenijom na sjevero-zapadnoj strani te Bosnom i Hercegovinom na jugo-istočnoj strani. Županija je prožeta većim brojem rijeka, rječica i potoka u odnosu na druge dijelove Hrvatske te je velik broj stambenih objekata, i dijelovi infrastrukture, građen uz ili u blizini obale rijeka. Prirodni i antropološki utjecaji značajno doprinose učestaloj pojavi klizišta na navedenom području. Vremenski uvjeti i infiltrirana voda mogu značajno promijeniti geometriju pokosa i oslabiti parametre čvrstoće materijala što potencijalno može uzrokovati pojavu klizišta (Kim et al., 2018). Sanacija aktivnog klizišta predstavlja proces koji zahtjeva vrlo opsežne istražne radove i izradu projektnog rješenja, oboje s potencijalno brojnim izazovima. Kako bi se izradilo optimalno projektno rješenje potrebno je, među ostalim, poznavanje geoloških, hidroloških i meteoroloških čimbenika koji utječu na globalnu i lokalnu stabilnost pokosa. Ovim radom prikazat će se usporedna analiza dva projektna rješenja sanacije klizišta uz desnu obalu rijeke Kupe u naselju Polje Ozaljsko. Bit će dan uvid u provedene istražne radove i dobivene rezultate te odabir optimalnog projektnog rješenja analizirajući dva različita sustava potpore tla sa svrhom osiguravanja stabilnosti. Na desnoj obali rijeke Kupe uočene su pojave nestabilnosti, na potezu duljine oko 700 metara, u vidu serije klizišta i odrona. Na dijelu navedenog poteza od 700 m otvorilo se aktivno klizište zahvaćajući postojeće gospodarske i stambene objekte koji mogu biti dodatno ugroženi daljnjim napredovanjem klizišta. Zahvat se nalazi u dionici rijeke Kupe u konkavnoj krivini gdje je dubina korita oko 11 metara. Na slici 1. prikazana je lokacije klizišta gdje je vidljiva pojava niza klizišta od kojih će se sanirati

oni od velike hitnosti zbog blizine stambenih objekata i infrastrukture. Kako je vidljivo na slici, sanirat će se sljedeća tri klizišta; klizište A, B i C. Predmetno područje nalazi se u naselju Polje Ozaljsko, točnije klizišta A i C nalaze se na županijskoj cesti Ž3143 Ozalj - Zorkovac na Kupi - Gornje Pokuplje, dok je klizište B uz pokos obale rijeke Kupe. Zelene zone između klizišta nisu označene kao prioritete u 1. fazi sanacije zbog značajne udaljenosti potencijalnog klizišta od stambenih objekata i infrastrukture, ali su u tim zonama ugrađeni inklinometri s ciljem kontinuiranog praćenja pomaka kako bi se detektiralo eventualno aktivno klizanje terena prema koritu rijeke Kupe što bi označavalo potrebu za sanacijom navedenih zona.



Slika 1 Prikaz predmetne lokacije niza klizišta iz zraka; klizište A (žuto), klizište B (crveno), klizište C (plavo)

Klizište A nalazi se na županijskoj cesti u blagom zavoju prometnice te je prometnica na nadmorskoj visini od 118 m, pruža se smjerom sjeverozapad – jugoistok na padini koja je položena u smjeru sjeveroistoka pod nagibom od oko 25° i visine 4 metra, nakon čega se prostire plato duljine 13 metara te pokos nastavlja dalje u blagom padu do korita rijeke Kupe. Nestabilnost klizišta A uočena je kao blago ulegnuće prometnice uz pojavu vlačne pukotine na kolniku u duljini od oko 25 metara. Prometnica je izvedena u nasipu debljine oko 4 m izgrađenog od dobropropusnih šljunkovitih naslaga uz proslojke koherentnog tla slabe vodopropusnosti. Upravo taj kontakt različitih slojeva tla u hidrogeološki nepovoljnim uvjetima predstavlja potencijalnu kliznu plohu. Nagib prometnice prema padini i nepostojanje sustava odvodnje prometnice uvjetuju slijevanje oborinske vode po pokosu, što uz već aktivno klizište može uzrokovati dodatno ispiranje materijala padine te dovesti do dodatnog klizanja i ugrožavanja sigurnog odvijanja prometa.

Klizište B nalazi se uz pokos obale rijeke Kupe kao najkritičnija zona s približnim tlocrtnim dimenzijama od 75x35 metara obuhvaćajući 4 parcele na kojima se nalaze 3 domaćinstva sa stambenim i gospodarskim objektima. Padina je položena u smjeru sjevera, nagiba oko 25° , visine oko 4 metra, nakon čega slijedi pad nagiba do korita rijeke. Odvodnja prometnice nije izvedena, a u nožici pokosa zabilježeni su manji izvori vode koji izvire na kontaktu dobropropusnih i slabopropusnih slojeva tla. Naslage različitih slojeva tla imaju različite hidrogeološke karakteristike te se infiltracija oborinske vode događa kroz krupnozrnate materijale naslaga odvođeci vodu do slabopropusnih naslaga. Saturirajući koherentni sloj tla dolazi do povećanja pronažnog pritiska što posljedično može dovesti do gubitka posmične čvrstoće i sloma tla. Kontakt navedenih različitih inženjerskogeoloških jedinica predstavlja potencijalnu kliznu plohu. Na promatranj kliznoj plohi nalaze se gospodarske zgrade koje su se odvojile od susjednog stambenog objekta uz kojeg su građene. Klizna ploha potonula je za oko pola metra te se pomaknula prema rijeci Kupi za 50-100 cm zbog čega prijeti opasnost od urušavanja objekta. Na čelu pokosa nalazi se i nabacani kameni materijal i građevinski otpad što dodatno opterećuje pokos te ga destabilizira.

Klizište C, uz prometnu infrastrukturu, nalazi se na dijelu prometnice na nadmorskoj visini od 117 metara, u ravni je i pruža se smjerom sjeveroistok – jugozapad na padini koja je položena u smjeru sjeverozapada, ujednačenog nagiba od 10° do 15° do korita rijeke Kupe. Iz smjera jugozapada prema sjeveroistoku u zoni sanacije prometnica je djelomično asfaltirana (širine oko 2,5 m) nakon čega se nastavlja makadamski put.

Odvodnja prometnice nije ni kod klizišta C izvedena. Na poziciji klizanja tla došlo je do odrona materijala s vrha pokosa te je čelo klizišta zahvatilo i prometnicu te je kontura klizne plohe jasno vidljiva, slika 2. Kao što je navedeno, i kod klizišta C klizanje je ostvareno kao kombinacija prirodnih uvjeta i antropogenog utjecaja. Izdvajaju se litološke karakteristike materijala padine, hidrološki i hidrogeološki uvjeti, odnosno količina oborina infiltrirana u tijelo pokosa te morfologija terena, kao glavni uvjeti nastanka klizišta. Također je uočeno istjecanje vode na licu pokosa što pridonosi destabilizaciji navedene padine. Teren je građen od koherentnih i nekoherentnih naslaga materijala s različitim hidrogeološkim obilježjima te se njihovi varijeteti izmjenjuju vertikalno i lateralno, a upravo kontakti takvih hidrogeološki različitih materijala predstavljaju potencijalnu kliznu plohu.



Slika 2 Prikaz klizišta C iz zraka (lijevo); konture klizne plohe na čelu klizišta (desno)

Uzimajući navedeno u obzir i činjenicu da je riječ o aktivnom klizanju terena, kako bi se spriječilo daljnje napredovanje klizišta i zaštitila lokalna prometnica i stambeni objekti, kao jedno od rješenja na sva tri klizišta odabrana je zaštita pokosa izvedbom pilotne stijene na vrhu pokosa. Uz sustav pilotne stijene planirana je i izvedba zamjene materijala pokosa na lokaciji klizišta B i C uz uređenje pokosa do korita rijeke Kupe, slika 3. Kao alternativno projektno rješenje planirana je izvedba sustava zabijanih čeličnih talpi s antikorozivnom zaštitom. Dva navedena projektna rješenja biti će numerički analizirana te uspoređena kako bi se procijenilo optimalno rješenje za navedeni niz klizišta. U poglavlju 2. detaljno će biti prikazani provedeni istražni radovi i njihovi rezultati te metodologija provedenog geotehničkog proračuna, dok će u poglavlju 3 biti obrađeni rezultati numeričkih analiza provedenih na konstitutivnim modelima programa GeoStudio.



Slika 3 Tlocrtni prikaz planirane zamjene tla, odnosno uređenja obaloutvrde kod lokacije klizišta B i C

2 Metodologija istraživanja i projektiranja sanacije klizišta

Za stjecanje potpunog razumijevanja prostorne raspodjele inženjersko-geoloških sredina na predmetnoj

lokaciji kao i njihovih fizikalno-mehaničkih svojstava potrebno je provesti opsežne geotehničke istražne radove. Detaljna inženjersko-geološka istraživanja daju uvid u morfološke, geološke, hidrogeološke i inženjersko-geološke karakteristike promatrane lokacije, uključujući determiniranje mikro lokacije bušotina, vizualni pregled i uzorkovanje jezgre bušotina za laboratorijska ispitivanja. Uz inženjersko-geološku prospekciju vrlo bitan segment, pri dobivanju uvida u prostornu raspodjelu fizikalno-mehaničkih svojstava tla, predstavljaju geotehnički istražni radovi. Na predmetnoj lokaciji provedeni su opsežni geotehnički radovi koji se sastoje od standardnog penetracijskog pokusa, istražnog bušenja i laboratorijskog ispitivanja te su provedena i geofizička ispitivanja seizmičke refrakcije i geoelektrične topografije. U sklopu istražnog bušenja izvodi se identifikacija, inženjerski opis jezgre bušotina te uzimanje poremećenih uzoraka tla koji se dostavljaju u laboratorij te se provode ispitivanja određivanja prirodne vlažnosti tla, klasifikacijski pokusi te određivanje posmične čvrstoće tla pokusom izravnog smicanja i određivanje modula stišljivosti edometarskim pokusom. U nastavku poglavlja 2 detaljno će biti prikazane geološke i geotehničke karakteristike tla s pripadnim fizikalno-mehaničkim svojstvima te prikaz metodologije provedenog geotehničkog proračuna.

2.1 Geološke i geotehničke karakteristike lokacije

Geološki prikaz šireg područja temelji se na podacima Osnovne geološke karte M 1:100 000, list Karlovac (Benček i dr., 2014) i pripadajućeg tumača (Magaš i dr., 2014). Istraživano područje izgrađuju kvartarne aluvijalne naslage, a u podlozi dolaze pliokvartarne naslage. Aluvijalne naslage sastoje se od šljunka s manjim lećama i proslojcima pijeska i gline, s valuticama približno jednakog omjera: karbonati, kvarc, čert i druge stijene, dok vršni dijelovi aluvijalnih nanosa sadrže prahove različite debljine. Pliokvartarne naslage diskordantno leže na naslagama gornjeg ponta, djelomično su bočni ekvivalenti paludinskih naslaga, s definiranim donjim i djelomično neodređenim gornjim granicama. Litološki sastav ovisi o starijoj podlozi i uključuje pijeske od kvarca, feldspata, čestica stijena, listića muskovita i teških minerala (70–95% SiO₂). Ovisno o primjesama razlikuju se šljunkoviti, glinoviti, prahoviti i limonitizirani pijesci, kontaminirani organskim ostacima. Gline su prisutne kao proslojci ili leće u pijescima, a željezovita supstanca je raspršena u svim litološkim članovima pliokvartara. Pliokvartarne naslage gotovo u potpunosti nemaju makrofaunu.

Na sve tri lokacije klizišta provedeni su geotehnički istražni radovi na temelju kojih su, među ostalim, određeni parametri čvrstoće i krutosti tla, a koji uključuju izvedbu 10 bušotina, uzimanje uzoraka i provedbu laboratorijskih ispitivanja te provođenje ispitivanja seizmičke refrakcije i geoelektrične topografije. Na lokaciji klizišta A izvedene su bušotina B1 dubine 15 m i B2 dubine 10 m, na lokaciji klizišta B izvedeno je 5 bušotina B4-B8, dubine 15 m, 20 m, 10 m, 20 m te 10 m, dok su na lokaciji klizišta C izvedene dvije bušotine B11 dubine 15 m i B12 dubine 10 m. Ispitivanje seizmičke refrakcije i geoelektrične topografije izvedeno je na lokaciji klizišta B i C, po jedan profil za obje metode.

Provedenim istražnim radovima utvrđeno je da se na lokaciji klizišta A nalazi karakteristični geotehnički profil tla koji se sastoji od nasipa od glinovitog šljunka s pijeskom neposredno ispod prometnice te naizmjeničnih slojeva gline visoke plastičnosti i praha niske plastičnosti, nakon čega se prostire sloj glinovitog pijeska. Na lokaciji klizišta B karakteristični geotehnički profil tla građen je od slojeva koherentnih materijala (gline i prahovi visoke i niske plastičnosti) s proslojcima glinovitog pijeska i šljunka. Dok se na lokaciji klizišta C nalazi karakteristični geotehnički profil tla koji se sastoji od nasipa od glinovitog šljunka i glinovitog pijeska neposredno ispod prometnice te naizmjeničnih slojeva koherentnih materijala (gline i prahovi visoke i niske plastičnosti).

Karakteristične vrijednosti parametara tla određene su opreznom procjenom na temelju rezultata istražnih radova te uz primjenu korelacija dostupnih u literaturi, a u skladu sa proračunskim metodama i modelima tla. U tablici 1 prikazani su proračunski parametri tla usvojeni za svaki pojedini sloj tla te za materijal uređenja obaloutvrde. Vrijednosti parametara tla umanjene su parcijalnim faktorima sigurnosti prema EC7 projektnom pristupu 3. Za dinamičke analize korištene su nedrenirane karakteristične vrijednosti parametara.

Tablica 1 Proračunski parametri tla prema Eurokodu 7, projektni pristup 3

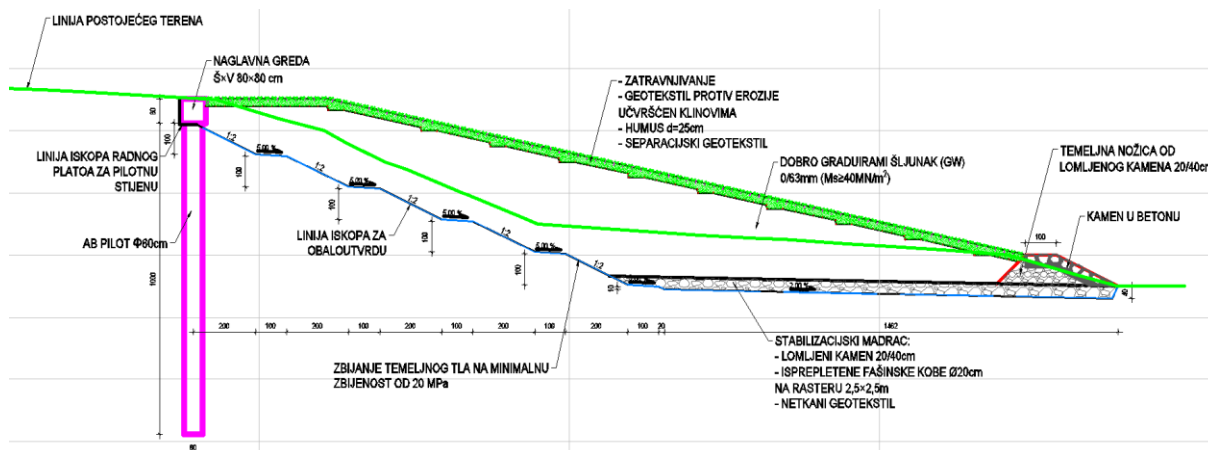
	Naziv	Efektivni Youngov modul Es, [kPa]	Youngov modul E, [kPa]	Kohezija [kPa]	Nedrenirana čvrstoća [kPa]	Phi [°]	Poissonov koef. [ν]	Zapr. Težina [kN/m ³]	
KLIZIŠTE A	ASFALT - E.P.	40.000	/	20		40	0,25	22	
	GS1 (GC/SC) - E.P.	7.170	/	0,6		25,1	0,32	19,5	
	GS2 (ML, gornja) - E.P. / GS2 (ML, gornja, nedr. karakt.) - E.P.	6.750	8.430	0,6	115	21	0,35	19	
	GS3 (CH) - E.P. / GS3 (CH, nedr.karakt.) - E.P.	3.640	4.550	4,7	78,5	14,7	0,4	18,6	
	GS4 (ML, donja) - E.P. / GS4 (ML, donja, nedr. karakt.) - E.P.	250	310	0	2	21,2	0,35	18	
	GS5 (SG/SC-SM) - E.P. / GS5 (SG/SC-SM, nedr. karakt.) - E.P.	4.780	5.980	4,4	173,7	17,9	0,38	20	
	NASIP CESTE - E.P.	40.000	/	1		40	0,25	20	
	GS1 (GC) - E.P.	7.170	/	0		25,1	0,32	20	
	GS2 (CL) - E.P. / GS2 (CL, nedr. karakt.) - E.P.	950	950	4	43,6	18,2	0,38	19,6	
KLIZIŠTE B	GS3 (MH) - E.P. / GS3 (MH, nedr. karakt.) - E.P.	3.230	3.230	1,2	13,8	19,3	0,36	19	
	GS4 (CH) - E.P. / GS4 (CH, nedr. karakt.) - E.P.	4.440	4.440	6,7	71,4	15,9	0,4	18,5	
	HUMUSIRANJE I ZATRAVNJIVANJE	3.000	/	5	/	20	0,35	18	
	KAMEN U BETONU	40.000	/	10	/	40	0,25	23	
	NASIP 8-63 mm	20.000	/	0,1	/	34	0,3	21	
	NOŽICA OD LOMLJENOG KAMENA	30.000	/	0	/	34	0,3	22	
	ASFALT	40.000	/	20	/	40	0,25	20	
	GS1 (GC/SC) - E.P.	7.940	/	0	/	25,1	0,32	19,5	
	GS2 (CL) - E.P. / GS2 (CL, nedr. karakt.) - E.P.	3.220	4.030	3,8	79,7	19	0,38	19	
KLIZIŠTE C	GS3 (MH/ML) - E.P. / GS3 (MH/ML, nedr. karakt.) - E.P.	2.280	2.850	1,3	8,2	20,4	0,36	18,5	
	GS4 (CH) - E.P. / GS4 (CH, nedr. karakt.) - E.P.	4.100	5.130	4,5	110	16,8	0,4	18,5	
	HUMUSIRANJE I ZATRAVNJIVANJE	3.000	/	5	/	20	0,35	18	
	KAMEN U BETONU	40.000	/	10	/	40	0,25	23	
	NASIP 8-63 mm	20.000	/	0	/	34	0,3	21	
	NASIP CESTE	40.000	/	0	/	40	0,25	20	
	NOŽICA OD LOMLJENOG KAMENA	30.000	/	0	/	34	0,3	22	
	(GS = geotehnička sredina)								

2.2 Projektno rješenje sanacije klizišta i numerička analiza

Uzimajući u obzir znakove klizanja nizbriježne padine klizišta A, u vidu ulegnuća prometnice i pojave pukotina na asfaltu te činjenicu kako se od klizanja mora štiti županijska cesta te istodobno kod klizišta B i C potrebu za zaštitom stambenih i gospodarskih objekata na lokaciji, ali i lokalnu prometnicu te kako bi se presjekle dublje klizne plohe koje su dovele do slijezanja gospodarskih objekata i kako bi se zaustavila progresija njihovog slijezanja, kao jedno od rješenja odabrana je sanacija nestabilnih padina izvedbom potporne konstrukcije u vidu armiranobetonske pilotne stijene s naglavnom gredom te kao alternativno rješenje razmatrat će se sanacija nestabilnih padina ugradnjom zida od trajno zabijenih čeličnih talpi s antikorozivnom zaštitom uz zamjenu materijala pokosa na pojedinim mjestima.

Rješenje AB pilotne stijene planirano je izvedbom pilota promjera Ø60 cm i duljine 8 m (klizišta A i C) odnosno 10 m (klizište B) na uzdužnom razmaku od 100 cm s naglavnom gredom dimenzija 80 × 80 cm. Na lokaciji klizišta A planirana je izvedba pilota tako što su postavljeni uz nizbriježni rub u duljini 35 metara kako bi osigurali stabilnost prometnice. Kod

klizišta B i C uz navedenu pilotnu stijenu koja se izvodi tako da rub pilotne stijene štiti okolne objekte pozicionirajući ju uz nizbriježni rub prometnice, izvodi se i zamjena materijala i uređenje samog pokosa do korita rijeke Kupe, slika 4. Planirano je uređenje obaloutvrde u duljini oko 100 m kod klizišta B, odnosno 60 m kod klizišta C. Već spomenuto alternativno rješenje sastoji se od izvedbe trajnog zida od antikorozivnih čeličnih talpi duljine 12 metara, na potezu od 35 m kod klizišta A, odnosno 55 metara kod klizišta B i C. Kod klizišta A talpe se izvode uz nizbriježni rub prometnice, dok kod klizišta B i C na vrhu pokosa uz zamjenu materijala i uređenje pokosa do korita rijeke. Važnu stavku kod navedenih projektnih rješenja predstavlja izvedba sustava odvodnje oborinske vode s prometnice u vidu rubnjaka i monolitnog betonskog rigola širine 30 cm uz pilotnu stijenu/talpe te uređenog ispusta na početku i kraju zaštitne konstrukcije zajedno s postavljanjem betonskih kanalisa niz padinu kako bi se omogućila odvodnja vode van zone klizanja što dodatno osigurava povećanje faktora sigurnosti zbog manje infiltracije vode u tijelo pokosa.



Slika 4 Prikaz karakterističnog poprečnog presjeka (klizište B, profil 2); projektno rješenje pilotna stijena uz uređenje obaloutvrde

Geotehničkim proračunom provedena je kontrola graničnog stanja nosivosti, GSN, i graničnog stanja uporabivosti, GSU, sukladno smjernicama važećih normi za geotehnički projekt; HRNEN 1997_1:2012 te Eurokod 7: geotehničko projektiranje i Eurokod 8: projektiranje konstrukcija otpornih na potres. Analize stabilnosti nestabilnih padina u sklopu provjere GSN provedene su za različite proračunske situacije pod statičkim i kvazi-statičkim (potresnim) uvjetima kako bi se odredio faktor sigurnosti te omogućilo provođenje naponsko – deformacijske analize s ciljem dobivanja mjerodavnih pomaka i unutarnjih/reznih sila planirane potporne konstrukcije u sklopu GSN i GSU.

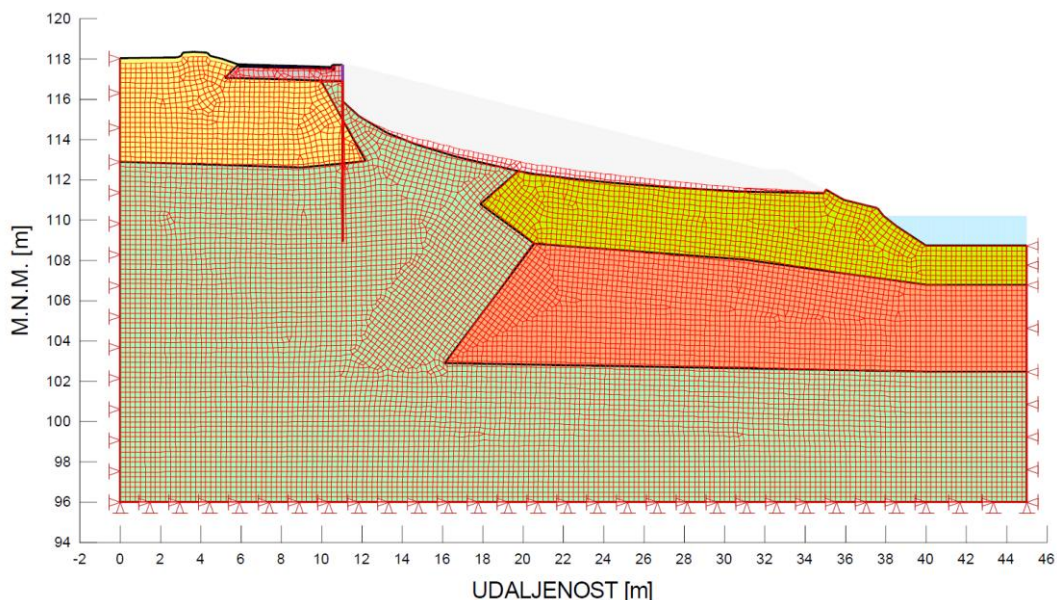
Pri provođenju analiza stabilnosti promatrane padine, klizno tijelo nije predodređeno već je potrebno determinirati kliznu plohu s najmanjim faktorom sigurnosti jer će upravo ona biti kritična klizna ploha za evaluaciju stabilnosti padine (Burman, 2015). Taj faktor sigurnosti mjerodavan je za cijeli promatrani pokos, odnosno predstavlja mjeru stabilnosti kosine. Praktična primjena metode granične ravnoteže uključuje pronalazak upravo te kritične klizne plohe s najmanjim faktorom sigurnosti (Burman, 2015). Za predmete lokacije niza klizišta pri provođenju analiza stabilnosti u modulu SLOPE/W iz programskog paketa GeoStudio, numerički su simulirane sljedeće projektne situacije: trenutno stanje prije sanacije klizišta, provjera globalne i lokalne stabilnosti pokosa nakon sanacije, analize s različitim visinama razine vode (srednje visoka i vrlo visoka razina vode) te kvazi statička analiza za potresne uvjete uz analizu kontakta geotekstila i postojećeg tla u situacijama gdje se izvodi zamjena materijala.

Naponsko-deformacijske analize provedene u sklopu GSN rezultiraju vrijednostima unutarnjih sila planirane konstrukcije, odnosno njenog strukturalnog elementa, dok se u sklopu provjere GSU definiraju pomaci konstruktivnih elemenata. Naponsko-deformacijska analiza bazirana je na metodi konačnih elemenata pomoću koje se analizira odnos između naprezanja i deformacija (Burman, 2015). Naponsko-deformacijska analiza predmetnih klizišta provedena je u modulu SIGMA/W programskog paketa GeoStudio implementacijom dva konstitutivna modela tla; linearno elastični i elasto-plastični modeli ponašanja tla. Linearno elastični model

korišten je za početno stanje naprezanja, dok je elasto-plastični model korišten u daljnjim analizama kako bi se vidjelo dolazi li u tlu do popuštanja, odnosno prekoračenja posmične čvrstoće. Kako bi se dobio cijelovit uvid u ponašanje tla i ugrađenih konstrukcija provedene su analize na sljedećim fazama izvedbe; Ugradnja potporne konstrukcije (piloti ili talpe), kraj gradnje uz uporabno opterećenje vozila, klizanje nizbriježne padine nakon izgradnje konstrukcije kao mogućnost te nametanje potresnog opterećenja, dok su kod klizišta B i C dodatno provjerene i faze iskopa za izvedbu zamjene tla te kontakt postojećeg tla i nasipanog materijala zamjene tla. U poglavlju 3 detaljnije će biti prikazana usporedba rezultata dva navedena projektna rješenja.

3 Rezultati i usporedba projektnih rješenja sanacije klizišta

Kako je već navedeno, dva analizirana projektna rješenja numerički su simulirana u programskom paketu GeoStudio, primjenom modula SLOPE/W i SIGMA/W, u sklopu provjere graničnog stanja nosivosti i graničnog stanja uporabivosti. Analiza stabilnosti provedena u modulu SLOPE/W za početno stanje naprezanja daje nešto veće vrijednosti faktora sigurnosti ($F_s = 1,12$), što ukazuje na djelomičnu stabilnost pokosa. Međutim, terenskim pregledom lokacije jasno su uočene konture klizne plohe i pomaci materijala pokosa, što ukazuje na moguće precjenjivanje stabilnosti u numeričkoj simulaciji. Budući da su istražni radovi provedeni u rujnu, nakon sušnog ljetnog razdoblja, može se pretpostaviti da razina podzemne vode može biti znatno viša od tada zabilježene. Povišena razina podzemne vode uzrokuje povećanje pornih tlakova te posljedično smanjenje stabilnosti pokosa. Stoga se preporučuje provedba dodatnih istražnih radova i numeričkih analiza uz primjenu rezidualnih parametara čvrstoće te pretpostavku povišene razine podzemne vode u početnom stanju naprezanja. Visoka razina vode nakon obilnih padalina, posebno nakon velike količine kiše, rezultira translacijskim klizanjima pokosa što je zabilježeno na mnogim lokacijama uz infrastrukturu i naseljena mjesta diljem svijeta; na planini Umveon u Japanu (Lee i Park, 2015), u istočnoj Liguriji i sjeverozapadnoj Toskani (Bartelletti i dr., 2017) te u Makedoniji (Peshevski i dr., 2017) zbog čega je nužno adekvatno rješenje ostvarenih klizišta. Na slici 5 prikazan je primjer modela na kojem su provedene numeričke analize, točnije prikazan je model za analizu dodatnog potencijalnog klizanja padine nakon izvedbe sanacije.



Slika 5 Numerički model klizišta C za situaciju potencijalnog klizanja nizbriježno nakon sanacije talpama

U Tablici 2 prikazani su rezultati analize stabilnosti, odnosno faktori sigurnosti za sva tri klizišta u različitim projektnim situacijama: od početnog stanja naprezanja, preko provjere globalne i lokalne stabilnosti pokosa u statičkim uvjetima, do dinamičke projektne situacije u potresnim uvjetima. Provjera lokalne stabilnosti ispod ugrađene konstrukcije odnosi se na potencijalno klizanje nizbriježnog dijela pokosa, pri čemu prometna

infrastruktura i stambeni objekti moraju zadržati stabilnost. U tom se slučaju provjerava sposobnost potporne konstrukcije da zadrži svoju funkciju u uvjetima gubitka bočnog pasivnog pritiska nizbriježne padine.

Naponsko deformacijska analiza simulirana u modulu SIGMA/W provodi se u vidu provjere graničnog stanja uporabivosti za određivanje pomaka konstrukcije te u vidu provjere graničnog stanja nosivosti čiji su rezultati mjerodavni za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata. Kao i u analizi stabilnosti, i u naponsko deformacijskoj analizi izrađen je model u kojem je dio pokosa „uklonjen“ kako bi numerički provjerili uvjete pomaka i odnos naprezanje-deformacija tijekom potencijalnog klizanja nizbriježnog pokosa.

Tablica 2 Faktori sigurnosti za klizišta A, B i C za različite projektne situacije

ANALIZA STABILNOSTI			
KLIZIŠTE	PROJEKTNJA SITUACIJA	FAKTOR SIGURNOSTI – PILOTNA STIJENA	FAKTOR SIGURNOSTI – TALPE
KLIZIŠTE A	TREKUTNO STANJE, statički uvjeti	1,12	1,06
	GLOBALNI FS NAKON UGRADNJE, statički uvjeti	1,38	1,81
	LOKALNI FS ISPOD UGRAĐENE KONSTRUKCIJE	1,08	1,08
	NAKON UGRADNJE SA SREDNJE VISOKOM RAZINOM PODZEMNE VODE	1,36	1,7
	NAKON UGRADNJE SA VRLO VISOKOM RAZINOM PODZEMNE VODE	1,53	1,95
	DINAMIČKI UVJETI – NAKON UGRADNJE U POTRESNOJ SITUACIJI	1,68	2,43
KLIZIŠTE B	TREKUTNO STANJE, STATIČKI UVJETI	1,12	1,12
	GLOBALNI FS, NAKON UGRADNJE, STATIČKI UVJETI	2,30	2,40
	LOKALNI FS ISPOD UGRAĐENE KONSTRUKCIJE	1,70	1,89
	KONTAKT GEOTEKSTILA I ZAMJENE TLA	1,41	1,41
	NAKON UGRADNJE SA SREDNJE VISOKOM RAZINOM PODZEMNE VODE	1,51	1,51
	NAKON UGRADNJE SA VRLO VISOKOM RAZINOM PODZEMNE VODE	1,66	1,66
	DINAMIČKI UVJETI – NAKON UGRADNJE U POTRESNOJ SITUACIJI	1,11	1,12
KLIZIŠTE C	TREKUTNO STANJE, STATIČKI UVJETI	1,18	1,18
	GLOBALNI FS, NAKON UGRADNJE, STATIČKI UVJETI	1,26	1,37
	LOKALNI FS ISPOD UGRAĐENE KONSTRUKCIJE	1,15	1,15
	KONTAKT GEOTEKSTILA I ZAMJENE TLA	1,28	1,28
	NAKON UGRADNJE SA SREDNJE VISOKOM RAZINOM PODZEMNE VODE	1,32	1,32
	NAKON UGRADNJE SA VRLO VISOKOM RAZINOM PODZEMNE VODE	1,45	1,45
	DINAMIČKI UVJETI – NAKON UGRADNJE U POTRESNOJ SITUACIJI	1,21	1,21

U tablici 3 i 4 prikazani su rezultati naponsko deformacijske analize za mjerodavne proračunske situacije. Tablica 3 prikazuje unutarnje sile konstruktivnih elemenata u vidu poprečne i uzdužne sile te momenta savijanja u pilotu, naglavnoj gredi i talpama, Prikazane su maksimalne vrijednosti za najnepovoljnije statičke uvjete tijekom gradnje i nakon završetka konstrukcije, statička situacija u ekstremnoj situaciji dodatnog

klizanja dijela nizbriježne padine nakon gradnje te za potresne uvjete nakon izgradnje zajedno s prometnim opterećenjem. Tablica 4, za iste projektne situacije kao u tablici 3, prikazuje očekivane maksimalne pomake pilota, odnosno talpi te se mogu smatrati prihvatljivima za sve provedene scenarije. Analizirajući rezultate primjećuje se kako su maksimalne vrijednosti unutarnjih sila i pomaka upravo za projektnu situaciju potencijalnog klizanja nizbriježnog dijela padine ispod potporne konstrukcije te su konstruktivni elementi dimenzionirani upravo na te vrijednosti sila i pomaka.

Tablica 3 Maksimalne vrijednosti unutarnjih sila za statičke i dinamičke uvjete konstruktivnih elemenata

KLIZIŠTE	KONSTRUKTIVNI ELEMENT	PRORAČUNSKA SITUACIJA	M_{max} [kNm/m']	V_{max} [kN/m']	N_{max} [kN/m']
KLIZIŠTE A	PILOTI	Statička situacija	21,79	-10,88	26,20
		Moguće klizanje nizbriježno	24,10	-18,49	39,58
		Dinamička situacija - potres	27,58	-12,19	28,19
	NAGLAVNA GREDA	Statička situacija	9,25	-13,99	14,88
		Moguće klizanje nizbriježno	10,06	-18,49	14,33
		Dinamička situacija - potres	5,10	-12,19	8,48
	TALPE	Statička situacija	21,79	-10,88	26,20
		Moguće klizanje nizbriježno	24,10	-18,49	39,58
		Dinamička situacija - potres	27,58	-12,19	28,19
KLIZIŠTE B	PILOTI	Statička situacija	-84,00	32,21	43,57
		Moguće klizanje nizbriježno	58,69	-18,21	30,83
		Dinamička situacija - potres	-86,92	31,71	41,11
	NAGLAVNA GREDA	Statička situacija	-7,49	17,02	31,46
		Moguće klizanje nizbriježno	10,27	-18,21	14,72
		Dinamička situacija - potres	-6,83	21,43	32,05
	TALPE	Statička situacija	-61,53	27,53	50,22
		Moguće klizanje nizbriježno	50,22	-18,39	33,34
		Dinamička situacija - potres	-64,19	27,15	45,41
KLIZIŠTE C	PILOTI	Statička situacija	-30,54	15,91	57,46
		Moguće klizanje nizbriježno	45,17	-20,26	33,97
		Dinamička situacija - potres	-19,47	-9,21	51,59
	NAGLAVNA GREDA	Statička situacija	1,84	-3,12	27,44
		Moguće klizanje nizbriježno	8,99	-20,26	10,92
		Dinamička situacija - potres	0,10	-0,65	24,67
	TALPE	Statička situacija	-27,73	12,77	81,63
		Moguće klizanje nizbriježno	75,30	-22,81	46,15
		Dinamička situacija - potres	-39,30	-12,37	61,84

Tablica 4 Maksimalni pomaci konstruktivnih elemenata za statičke i dinamičke uvjete

KLIZIŠTE	KONSTRUKTIVNI ELEMENT	STATIČKI UVJETI	DODATNO KLIZANJE PADINE	DINAMIČKI UVJETI- POTRES
A	PILOTI	0,68	1,43	0,70
	TALPE	0,68	1,43	0,70
B	PILOTI	3,82	6,08	3,85
	TALPE	4,09	5,97	4,76
C	PILOTI	1,43	5,67	2,64
	TALPE	1,35	5,86	2,37

4 Zaključak

Geotehničko istraživanje i projekt sanacije niza klizišta uz desnu obalu rijeke Kupe omogućili su sveobuhvatno razumijevanje stabilnosti terena i učinkovitosti predloženog rješenja. Provedene su detaljne geotehničke i inženjersko-geološke analize, uključujući bušenja, laboratorijska ispitivanja i procjene stabilnosti, koje su identificirale problematična područja i procijenile potencijalne rizike. Geotehnički istražni radovi pokazali su složenost podzemnog profila, a analiza stabilnosti kosina obuhvatila je postojeće stanje, uvjete tijekom iskopa i kritične scenarije nakon sanacije pod statičkim i dinamičkim opterećenjima. Za sanaciju tri klizišta, predložena su dva rješenja: pilotna stijena ili zid od sustava čeličnih talpi, uz zamjenu materijala na pojedinim mjestima. Analiza trenutnog stanja pokazala je faktor sigurnosti malo iznad 1, no uočene su deformacije pokosa i pukotine na prometnici te procjeđivanje vode kroz tijelo pokosa, što potvrđuje pojavu klizanja terena i potrebu za sanacijom. Oba predložena rješenja povećavaju faktor sigurnosti na prihvatljive razine tijekom izgradnje i nakon sanacije, uključujući statička i dinamička opterećenja. Analizom stabilnosti identificirana je potencijalna klizna ploha nizbriježno s nižim faktorom sigurnosti, zahtijevajući dodatnu provjeru unutarnjih sila i pomaka kako bi se spriječila oštećenja zbog potencijalnog plitkog klizanja. Konačni projekt sanacije uključuje mjere koje osiguravaju stabilnost i otpornost izvedenog rješenja, čime se područje održava sigurnim i funkcionalnim. Integracija geoloških, hidrogeoloških i geotehničkih analiza, konstruktivnog projektnog rješenja uz strategiju izvedbe sanacije, učinkovito smanjuje rizike klizišta. Oba predložena projektna rješenja zadovoljavaju uvjete osiguranja stabilnosti u svim projektnim situacijama, također smanjuju pomake, odnosno klizanje terena, zbog čega je pri odabiru potrebno uzeti u obzir i tehnologiju izvedbe te ekonomske aspekte kako bi se osigurao odabir optimalnog rješenja sanacije klizišta. Na navedenim lokacijama kao mjerodavno rješenje (zbog tehnologije izvedbe i ekonomskih uvjeta projekta) odabrana je izvedba zida sustavom čeličnih talpi uz zamjenu materijala pokosa, odnosno uređenje obaloutvrde rijeke Kupe. Interdisciplinarnost geologije, hidrotehnike i geotehnike omogućuje osiguranje mitigacije rizika povezanih s pojavom klizišta dajući snažan okvir za odabir optimalnog rješenja održavajući stabilnost i sigurnost pokosa prometne infrastrukture te stambenih objekata.

Literatura

- Bartelletti C, Giannecchini R, D'Amato Avanzi G, Galanti Y, Mazzali A, *The influence of geological–morphological and land use settings on shallow landslides in the Pogliaschina T. basin (northern Apennines, Italy)*, Journal of Maps, 2017, 13(2): 142-152.
- Benček, Đ., Bukovac, J., Magaš, N. & Šimunić, An. (2014): *Osnovna geološka karta Republike Hrvatske 1:100.000*, List Karlovac L33-92. – Hrvatski geološki institut, Zagreb.
- Burman, A., Acharya, S.P., Sahay, R.R., Maity, D., *A comparative study of slope stability analysis using traditional limit equilibrium method and finite element method*, Asian journal of civil engineering, 2015., vol. 16, no. 4, pp 467-492
- Kim MS, Onda Y, Uchida T, Kwan Kim J, Song YS, *Effect of seepage on shallow landslides in consideration of changes in topography: Case study including an experimental sandy slope with artificial rainfall*, 2018, Catena, vol. 161, pp 50-62
- Lee JH, Park HJ, *Assessment of shallow landslide susceptibility using the transient infiltration flow model and GIS-based probabilistic approach*, Landslides, 2016, 13: 885-903.
- Magaš, N., Bukovac, J., Benček, Đ. (2014): *Osnovna geološka karta Republike Hrvatske 1:100.000*, Tumač za list Karlovac L33-92. – Hrvatski geološki institut, Zagreb, 71 str.
- Peshevski I, Peternel T, Jovanovski M, *Urgent need for application of integrated landslide risk management strategies for the Polog region in R. of Macedonia*, Proceedings of 4th World Landslide Forum, 29 May – 02 June 2017, Ljubljana, Slovenia. pp. 135-145