

# IZAZOVI GEOTEHNIČKOGA ISTRAŽIVANJA KLIZIŠTA U OBUHVATU GRAĐEVINA KULTURNE BAŠTINE - PRIMJER GROBLJA U BEDEKOVČINI

JASMIN JUG<sup>1</sup>, STJEPAN STRELEC<sup>1</sup>, KRISTIJAN GRABAR<sup>2</sup>, ANJA BEK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, Hrvatska

<sup>2</sup> SPP d.o.o., Koprivnička ulica 47, Varaždin, Hrvatska

## Sažetak

Na području Sjeverne Hrvatske, gdje su građevine kulturne baštine nerijetko izgrađene na područjima sklonima klizanju terena, plitka klizišta vrlo su česta pojava. Pristup bilo kakvim radovima, pa tako i terenskim istraživanjima, na području ili u blizini povijesnih građevina i sakralnih spomenika vrlo je specifičan i izazovan pa mogući negativan utjecaj treba spriječiti. U ovom radu je prikazan primjer provedenih geotehničkih istraživanja na groblju u Bedekovčini, gdje je aktivirano i istraživanjima detektirano više zasebnih klizišta. Multidisciplinarnim pristupom istraživanjima, uz primjenu geotehničkih, geofizičkih i inženjerskogeoloških metoda, dobiven je uvid u sastav i geotehničke značajke tla na prostoru manifestiranih klizišta. Izvedba navedenih terenskih radova bila je poprilično izazovna jer su se djelomično odvijali na samom groblju. Interpretacijom svih rezultata istraživanja utvrđeni su uzroci klizanja povezani s infiltracijom oborinske vode u glinovito tlo niske posmične čvrstoće. Geotehničkim analizama utvrđeno je kako će se aktivnim snižavanjem razina podzemnih voda i izgradnjom drenažnih sustava djelovati na uzrok klizanja pa je u skladu s time predloženo sanacijsko rješenje, a propisano je i geotehničko opažanje padine mrežom inklinometara postavljenih u sklopu istražnog bušenja.

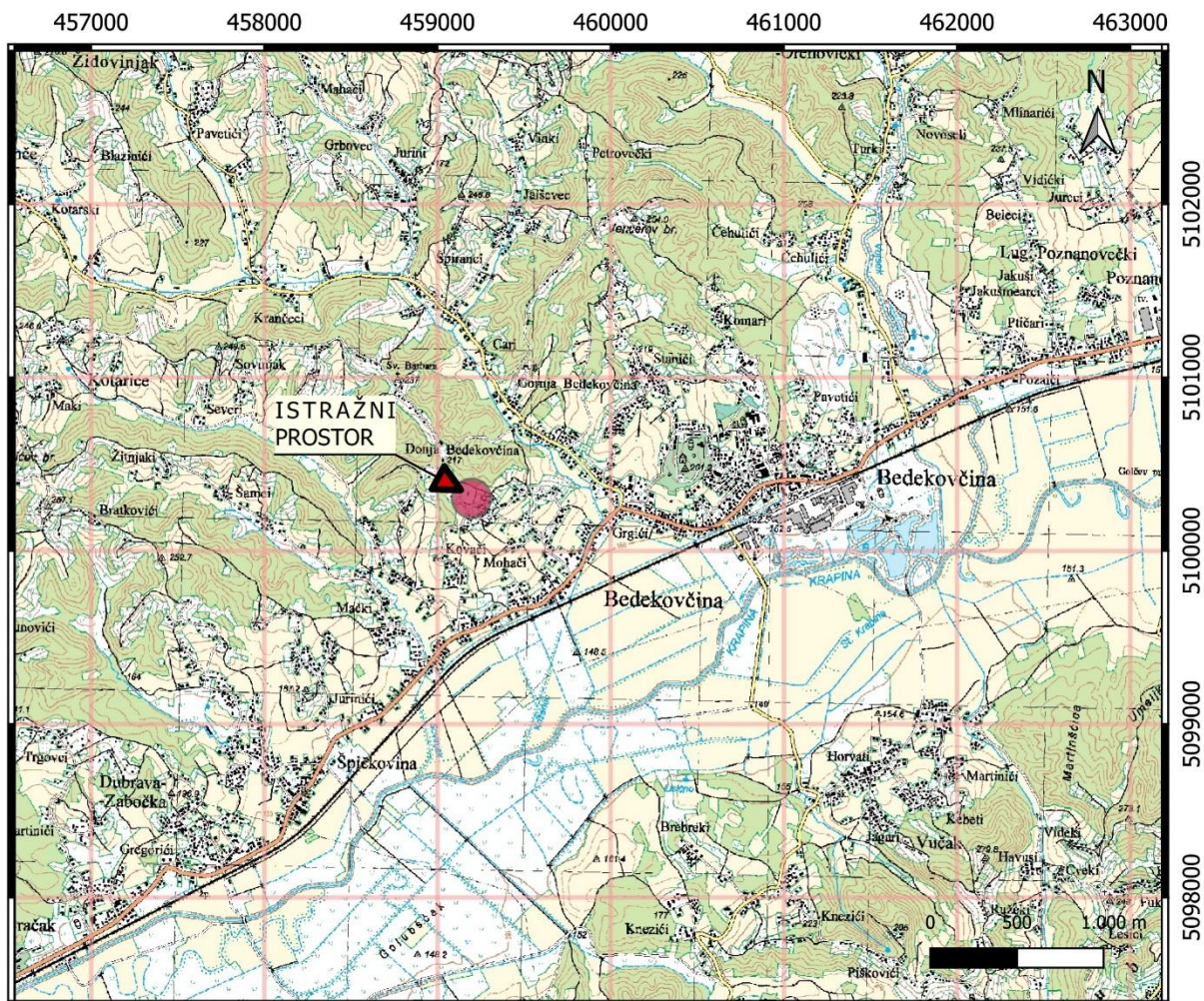
## Ključne riječi

Klizište, izazovna geotehnička istraživanja, groblje, Bedekovčina, infiltracija vode, drenažni sustav, monitoring pomaka tla.

## 1 Uvod

Brežuljkasta topografija terena, sklona klizanju, prevladava na području Sjeverne Hrvatske (Mihalić Arbanas i sur., 2023). Na tom su području građevine kulturne baštine nerijetko izgrađene na dominantnim uzvisinama brežuljkastog reljefa radi obrane, kontrole prostora i izbjegavanja poplavnih područja (Krmpotić, 2018). Navedene građevine, kao što su dvorci, utvrde, sakralni spomenici i sl. tako mogu biti oštećene kao posljedica aktiviranja klizišta. Preventivne mjere (npr. planiranje, stabilizacija padina, kontrola zemljišta) rijetko se provode u skladu s preporukama geotehničara (Maes i sur., 2017) pa je aktiviranje klizišta, pogotovo plitkih, vrlo česta pojava na predmetnom području Hrvatske. Ugroze ovakvog tipa potrebno je sanirati i kontrolirati, što nije moguće bez prethodno provedenih istraživanja klizišta. Kombiniranje standardnih geotehničkih tehnika istraživanja tla (istražno bušenje, uzorkovanje i laboratorijsko ispitivanje), geofizičkih metoda, te suvremenih in situ geotehničkih ispitivanja pokazalo se vrlo uspješnim u detekciji dubine i oblika klizne plohe (Jug i sur., 2024). Međutim, pristup bilo kakvim radovima, pa tako i terenskim istraživanjima, na području ili u blizini povijesnih građevina i sakralnih spomenika (crkve, kapele, groblja) vrlo je specifičan i izazovan pa mogući negativan utjecaj treba spriječiti. Osim toga, prostor dostupan za provedbu terenskih istraživanja često je površinom ograničen.

U ovom radu je prikazan primjer geotehničkih istraživanja provedenih krajem 2020. godine na groblju u Bedekovčini (stari i novi dio). Gradsko groblje Bedekovčina nalazi se oko 1,2 km zapadno od grada, odnosno oko 1,5 km sjeverozapadno od korita rijeke Krapine, kao što je prikazano na Slici 1. Locirano je u morfološki brežuljkastom području koje pripada južnim obroncima Ivanšćice, na prelazu u dolinu rijeke Krapine. Sama lokacija groblja nalazi se na padini blago nagnutoj prema jugoistoku, na nadmorskoj visini između 208 i 220 m.

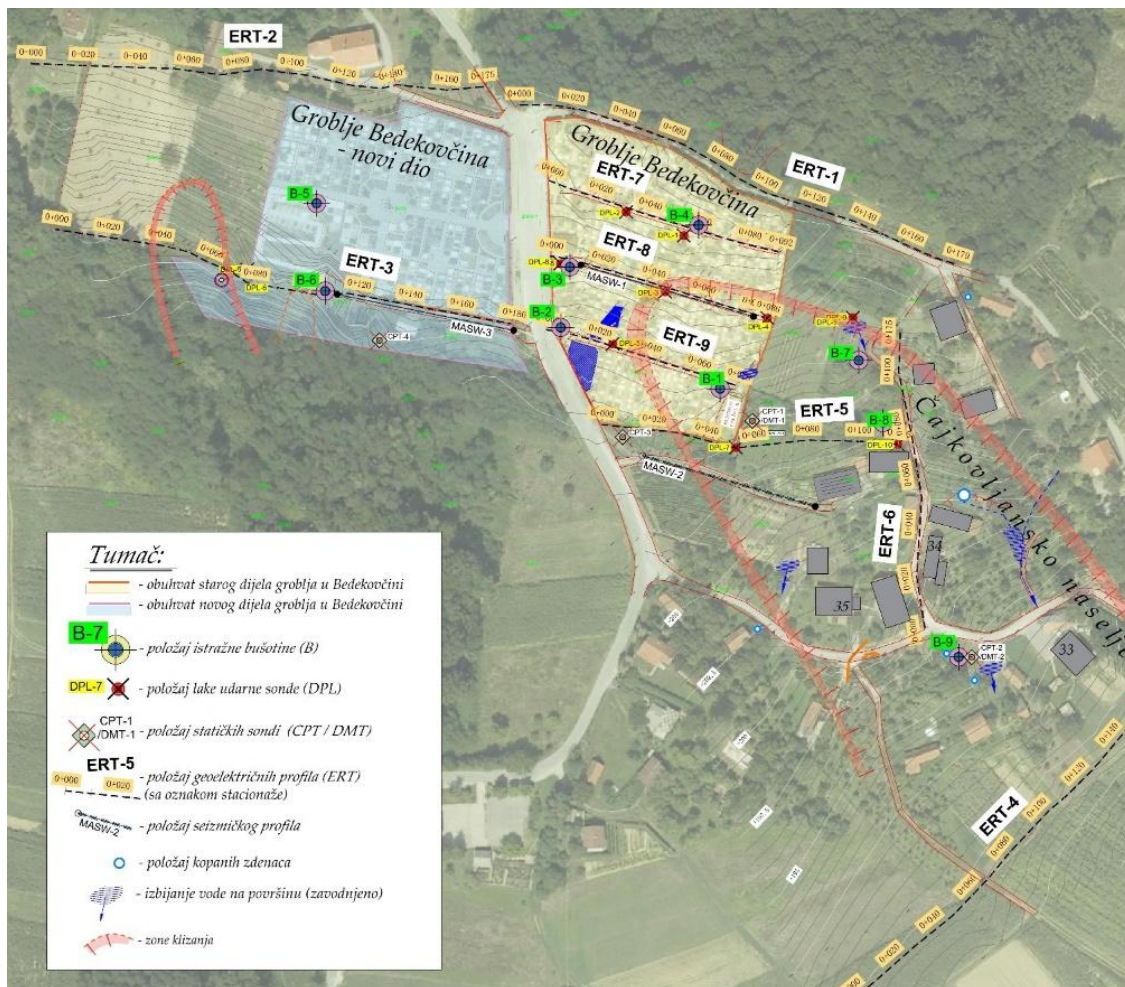


Slika 1. Lokacija istražnog prostora - groblje u Bedekovčini.

Na groblju u Bedekovčini i obližnjem Čajkovljanskom naselju aktivirano je i istraživanjima detektirano više zasebnih klizišta, a najveće je površine preko 4 ha. Multidisciplinarnim pristupom istraživanjima, uz primjenu geotehničkih, geofizičkih i inženjerskogeoloških metoda, dobiven je uvid u sastav i geotehničke značajke tla na prostoru manifestiranih klizišta te su utvrđeni uzroci klizanja, iako su terenski radovi bili vrlo izazovni jer su se djelomično odvijali na samom groblju.

## 2 Metode

Prilikom planiranja i provedbe istraživanja u Bedekovčini težilo se multidisciplinarnosti, pa su kombinirane različite geotehničke, geofizičke i inženjerskogeološke metode istraživanja. Na Slici 2 nalazi se situacijski prikaz položaja svih izvedenih terenskih istraživanja, te opažanja prilikom inženjerskogeološke prospekcije šireg prostora istraživanja.



Slika 2. Situacijski prikaz položaja multidisciplinarnih istraživanja na širem području groblja u Bedekovčini

## 2.1 Inženjerskogeološke metode

Inženjerskogeološka istraživanja padina su važna, posebno ako postoji opasnost od klizanja na građevinskom području ili uz prometnicu (Greco i Oggeri, 2004). Geološko kartiranje počinje već u uredu. Moraju se pregledati sva dostupna geološka izvješća i podaci, uključujući satelitske fotografije, osnovne karte, topografske karte, karte administrativnih granica, itd. Vrlo su korisne i detaljne geodetske podloge, a iste su u ovom istraživanju bile prethodno snimljene kroz geodetske radove. Geološkim istraživanjima nastavljaju se prikupljati dodatni podaci na terenu, kroz inženjerskogeološku prospekciju. Podaci se na terenu prikupljaju u obliku fotografija, mjerenja i bilješki, a koristi se osnovna geološka oprema kao što su geološki kompasi i čekići. Konačni cilj detaljnog inženjerskogeološkog kartiranja je izrada inženjerskogeološke karte i specifičnih presjeka. Inženjerskogeološka prospekcija terena provedena je sukladno osnovnim principima predmetnih istraživanja (Price, 2009; Hoek, 2007). Sagledani su i registrirani svi inženjerskogeološki elementi vidljivi na površini, kao što su morfološka obilježja terena, litološki sastav stijene u podlozi, orijentacija diskontinuiteta u zasjecima, itd.

## 2.2 Geofizičke metode

Geofizička istraživanja uključivala su snimanje devet profila tomografije električne otpornosti (Electric Resistivity Tomography, ERT), te tri seizmička MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) profila. Trase geofizičkih presjeka trebalo je pomno isplanirati. Tako su korištene što ravnije linije koje omeđuju plohe na grobljima, kako se ne bi prelazilo preko grobnica, kao što je vidljivo na Slici 2.

ERT je geofizička tehnika koja se široko koristi za kartiranje lateralnih varijacija podzemnih slojeva tla i stijena, kontakata geoloških formacija i debljine površinskog materijala koji prekriva osnovnu stijenu, kao funkcije poroznosti geološkog materijala i razine zasićenosti vodom (Dimech i sur., 2022). Rezultati ERT-a su generirane 2D slike, a iste potom prikazuju distribuciju električnog otpora u podzemlju (Strelec i sur., 2017). Ova tehnika koristi niz elektroda međusobno povezanih višežilnim kablom za generiranje linearnog profila s dubinom, odnosno pseudo presjek varijacija električnog otpora duž istraživačke linije s različitim dubinama.

Seizmičku metodu za kartiranje podzemlja MASW, uveo je Park sa suradnicima (1999). MASW tehnika inicijalno detektira seizmičke Rayleighove površinske valove stvorene različitim seizmičkim izvorima, analizira brzine kojima se ti površinski valovi šire, a kasnije ukazuje na varijacije u brzini posmičnih valova ( $V_s$ ) ispod ispitivane zone u 2D prikazu. Za terenska seizmička istraživanja ovog tipa koriste se višekanalni geofizički sustavi, koji se standardno sastoje od centralne akvizicijske jedinice za primanje podataka, 24 geofonske jedinice (geofoni vlastite frekvencije 4.5 Hz) za registraciju seizmičkih valova, s pripadajućim softverom za provedbu mjerenja (Strelec i sur., 2024).

### 2.3 Geotehničke metode

Standardna geotehnička istraživanja tla provedena su kroz istražno bušenje, uzimanje neporemećenih i poremećenih uzoraka, te laboratorijska ispitivanja istih. Korištene su i suvremene in situ geotehničke penetracijske metode ispitivanja: statičko sondiranje CPTu (Cone Penetration Test) sondom, sondiranje DMT (Dilatometer Test) dilatometrom tipa Marchetti, te dinamičko sondiranje lakom udarnom sondom (Dynamic Penetration Light, DPL). Pozicioniranje penetracijskih ispitivanja bio je velik izazov kod ovog istraživanja. Tako su se za pristup bušaće garniture i penetracijske opreme te provedbu ispitivanja mogli koristiti samo pristupni putevi i staze na području groblja, kao što je vidljivo na Slici 2.

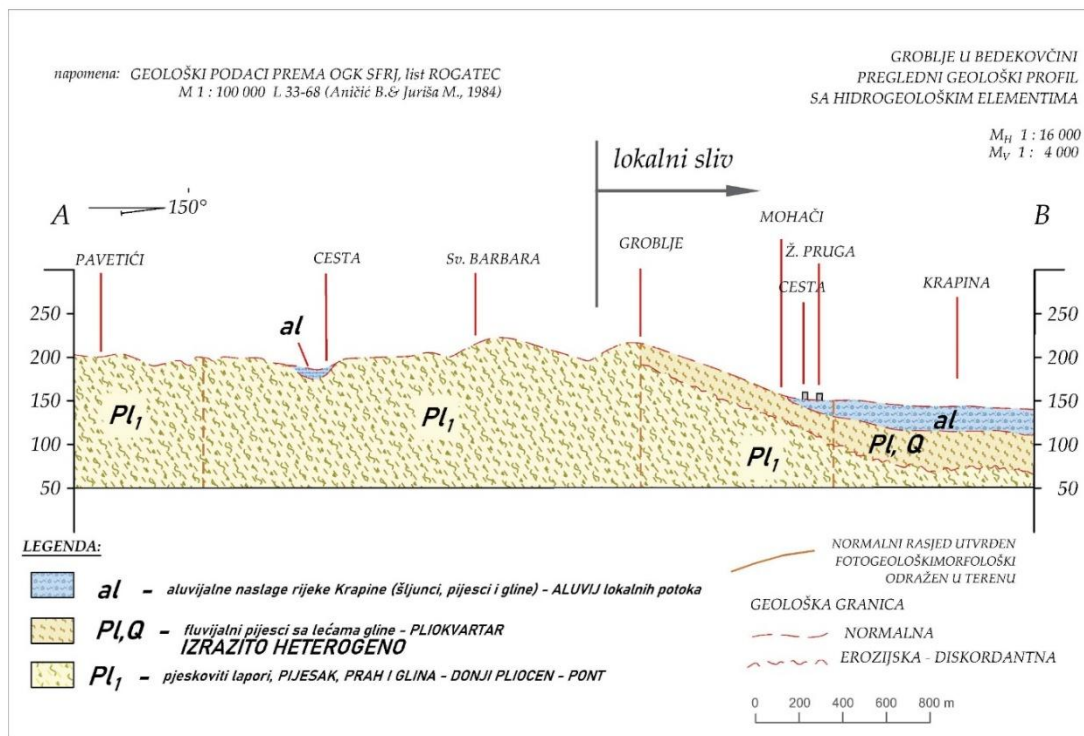
Istražno bušenje u Bedekovčini obuhvaćalo je devet bušotina dubine do 8 metara. Istražnim bušenjem se mehanički prodire u tlo zbog utvrđivanja rasporeda, debljine i svojstava slojeva tla na klizištu, te dobivanja uzoraka za laboratorijska ispitivanja. Rotacijsko bušenje se izvodi jezgrenom cijevi na čijem se kraju nalazi krana, a sve je pričvršćena na niz šupljih bušačkih šipki. Tijekom procesa bušenja u jezgrenu cijev ulazi nabušeni materijal (jezgra) koji se sprema u pripremljene sanduke. Za uzimanje neporemećenih uzoraka koriste se tankostijeni uzorkivači. U istražnim bušotinama izvodi se standardni penetracijski test (SPT) kojim se određuje relativna zbijenost tla. SPT istraživanjem dobiva se broj udaraca potreban da cilindar standardnih dimenzija prodre 30 cm u tlo. Preko broja udaraca potrebnog za prodiranje cilindra korelacijama se određuju čvrstoća i deformacijska svojstva tla (Strelec i sur., 2024). Važno je da laboratorijska ispitivanja koja se provode za karakterizaciju tla na klizištima uključuju određivanje vlažnosti, konzistencije, granulometrijskog sastava i posmične čvrstoće tla. Posmična čvrstoća je najvažnija mehanička karakteristika tla na klizištu. Definirana je kohezijom i kutom unutrašnjeg trenja, a određuje se pokusom direktnog smicanja ili troosnim pokusom. Nakon laboratorijskih ispitivanja uzoraka provedena je ESCS klasifikacija tla EN ISO 14688-2 (Kovačević i sur., 2018). Bušotine B-1, B-2, B-3, B-5, B-6 i B-9 opremljene su za inklinometarski monitoring. Kontinuirani penetracijski konusni test s mjerenjem pornog tlaka CPTu uključuje hidraulički pritisak na čelični stožasti penetrometar pri konstantnoj brzini za mjerenje ukupnog otpora na šiljku ( $q_t$ ), trenja po plaštu ( $R_f$ ) i tlaka porne vode ( $u$ ) (Lunne i sur., 1997). Procjena geotehničkih parametara temeljila se na dobivenim CPTu podacima, uz primjenu izraza Robertsona i Cabala (2012). DMT-om se određuju čvrstoća i deformacijska svojstva tla utiskivanjem čelične sonde koja se zaustavlja tijekom mjerenja na određenim dubinama kako bi se izmjerili specifični tlakovi (Marchetti, 1980). Dobivaju se vrijednosti mjerenih parametara kao što su indeks materijala ( $I_D$ ), indeks horizontalnog naprezanja ( $K_D$ ) i dilatometarski modul ( $E_D$ ) (Totani i sur., 2001). Ispitivanje tla DPL metodom izvodi se tako da se konusna sonda snažno zabija u tlo pomoću utega mase 10 kg, koji pada s visine od 50 cm. Otpor dinamičkog probijanja definiran je kao broj udaraca za probijanje od 10 cm (Strelec i sur., 2024).

### 3 Rezultati

#### 3.1 Rezultati terenskih i laboratorijskih istraživanja

Morfologija šireg istraživanih područja je razvedena brežuljkasta, blago nagnutih padina, koje su ispresijecane duboko usječenim jarugama strmih bokova s denivelacijama koje često prelaze 10 m. Teren je u cjelini pokriven produktima površinskog trošenja naslaga iz podloge, tako da izdanci nisu vidljivi (osim u rijetkim zasjecima). Opisana morfologija rezultat je litološkog sastava zastupljenih naslaga, tektonske aktivnosti te erozijskih procesa. Tektonske deformacije (rasjedi i bore) stvorili su inicijalne uvjete stvaranja erozijske mreže koja danas postoji. Erozijska mreža je nepravilna, sa nekoliko stalnih površinskih tokova koji dreniraju mrežu bočnih jaraka. Stalni površinski tokovi su generalno orijentirani pravcem sjeverozapad-jugoistok, s povremenom promjenom pravca u istok-zapad.

U litološkom smislu šire područje izgrađuju klastične naslage pliocena, zatim taložine na prelazu pliocena u stariji kvartar (pleistocen), kao i aluvijalne naslage u dolini toka rijeke Krapine. U hidrogeološkom smislu navedene klastične naslage pliocena i pliokvartara su generalno nepropusne, o čemu svjedoče duboko usječene jaruge i postojeća razvedena erozijska mreža. U ovim klastičnim naslagama redovito postoji površinski dio koji je vanjskim čimbenicima izmijenjen u odnosu na prirodno tlo, pa u tom dijelu dolazi do infiltracije oborinske vode koja pridonosi destabilizaciji trošnih naslaga na padini. Otežavajuća okolnost je činjenica da ove sitnozrnate naslage teško otpuštaju infiltriranu vodu. Otpuštanje je dugotrajno i difuzno što je uočeno tijekom detaljnog rekognosciranja terena. Izdvojeni su dijelovi terena na kojima voda izbija na površinu, a prikazani su na Slici 2, dok je pregledni geološki presjek s hidrogeološkim elementima na Slici 3.



Slika 3. Pregledni geološki presjek šireg područja groblja u Bedekovčini (prema Aničić i Juriša, 1984).

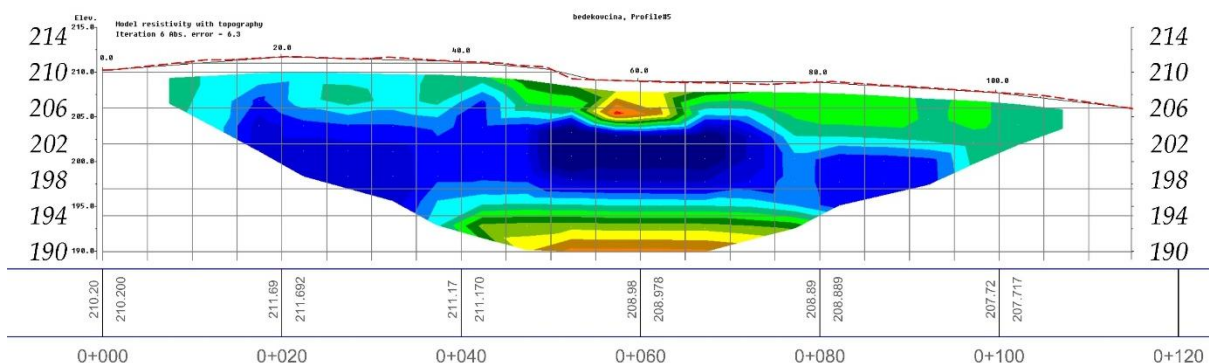
Na osnovi podataka ukupno 9 istražnih bušotina uočeno je da slijed naslaga počinje nasutim nekonsolidiranim pjeskovitim materijalom debljine od 0,3 do 0,8 m. To je dijelom nasuti materijal nastao ljudskom djelatnošću. Slijedi prašnasti pijesak do pjeskovita glina do dubine oko 3 m. Ovaj interval je slabo slojevit, kruto plastičnog konzistentnog stanja. Ispod od ovog intervala do dubine cca 6 m slijedi sloj gline vrlo visoke plastičnosti, pri

čemu plastičnost raste s dubinom. Ovaj je sloj na različitim dubinama registriran u svim bušotinama. Nakon ovih sedimenata, a do dna bušotina (8 m) nalaze se različite prašinsto-pjeskovite i glinovite klastične naslage. Kao primjer rezultata istražnog bušenja (sondažni profil i nabušena jezgra) u nastavku je Slika 4.



Slika 4. Rezultati istražnog bušenja bušotine B-1: a) sondažni profil; b) fotodokumentacija nabušene jezgre.

Iz ERT profila identificirano je da se klizna ploha formirala unutar glinovitih materijala. Jasno je vidljiva horizontalna izmjena "masnih" (nepropusnih) gline i prašinsto-pjeskovitih sedimenata. Na Slici 5 prikazan je primjer interpretiranog geoelektričnog presjeka ERT-5, na kojem su plavim nijansama prikazani spomenuti glinoviti materijali (električne otpornosti  $< 10 \Omega\text{m}$ ), zelenim nijansama pjeskoviti prahovi (električne otpornosti  $10 - 30 \Omega\text{m}$ ), a žuto-narančastim pijesci i pjeskoviti lapori (električne otpornosti  $30 - 100 \Omega\text{m}$ ). Iz mjerenih vrijednosti na terenu MASW metodom, proračunata je prosječna brzina posmičnih seizmičkih valova do dubine 30 m  $V_{s,30} = 240 \text{ m/s}$ , te je određeno da tlo na istražnoj lokaciji odgovara "C" kategoriji tla prema seizmičnosti prema Eurokodu 8 (HRN EN 1998-1:2011).



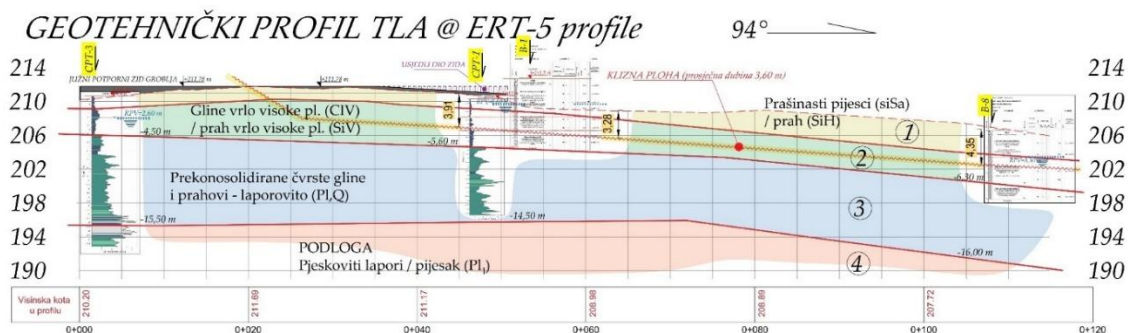
Slika 5. Model električne otpornosti u profilu električne tomografije "ERT-5 Bedekovčina".

Identifikacijom nabušene jezgre iz sondažnih bušotina, provedenih geotehničkih terenskih sondiranja (CPTu, DTM i DPL), geofizičkih istraživanja, te laboratorijskih ispitivanja uzoraka iz bušotina utvrđen je litološki sastav tla na istraživom području kako je prikazano u Tablici 1. Na Slici 6 prikazan je karakteristični geotehnički profil tla za istraživano područje, a kombinira rezultate bušenja istražnih bušotina B-1 i B-8, statičke penetracije CPT-1 i CPT-3, te geoelektričnog profiliranja ERT-5.

**Tablica 1.** Rezultati terenskih istraživanja i laboratorijskih ispitivanja tla područja groblja u Bedekovčini.

Interval (m)	Naziv sloja	Vrsta tla, ESCS klas.	Opis sloja tla	Geotehnički parametri tla
0,00 - 3,00	Površinsko tlo	Prah visoke plastičnosti (SiH/SiV) Prašinasti pijesak (siSa) Pjeskovita glina (saCiM)	Površinski dio sraslog tla iznimno je heterogenog sastava, pa nije moguće utvrditi generalni slijed površinskog tla (različit na svim bušotinama). Nepovoljna činjenica ovog je što su pjeskoviti sedimenti lateralno zarobljeni unutar nepropusnih gлина. U propusnijim dijelovima (otocima) moguća je vertikalna infiltracija u dublje tlo, no procjeđivanje je bočno spriječeno u materijalu glina, koje se nastavljaju lateralno.	$c_u = 25 - 40 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 18,0 \text{ kN/m}^3$ $c = 3 - 6 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 22^\circ$
3,00 - 6,00	Klizna ploha	Glina vrlo visoke plastičnosti (CIV)	Masne gline u razini formirane klizne plohe, žuto-smeđe boje proslojene sivom glinom, (CIV, $w_L=98 - 110\%$ ), kruto plastičnog konzistentnog stanja. Iz statičkih sondi dobivene su iznimno male vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće u zoni klizne plohe.	$\gamma = 16,5 - 17 \text{ kN/m}^3$ $c_u = 15 - 50 \text{ kN/m}^2$ $c = 9-20 \text{ kN/m}^2$ vršni $\phi = 18^\circ$ rezidualni $\phi = 7,5^\circ$ $V_s = 160 - 170 \text{ m/s}$ $q_{t(CPTu)} = 0,6 - 1,2 \text{ MPa}$
> 6,00	Dublji profil tla ispod klizne plohe	Prekonsolidirani prah vrlo visoke plastičnosti (SiV)	Dublji horizont na većini prostora gradi vrlo prekonsolidirani prah vrlo visoke plastičnosti (SiV). Ove formacije su iznimno nepropusne, izmjereni puni tlakovi prilikom statičkog sondiranja u ovim materijalima mjestimice prelaze $u_2 > 2000 \text{ kPa}$ . Ovaj sloj također je vrlo visokih plastičnosti no veće posmične čvrstoće od glinovitog nadsloja i u pravilu sadrže 5 do 10% udjela pijeska.	$c_u = 60 - 150 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 17,5 - 18,3 \text{ kN/m}^3$ $c = 5 - 15 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 22-25^\circ$ $q_{t(CPTu)} = 2,0 - 6,0 \text{ MPa}$

Značenje simbola:  $c$  - kohezija;  $\phi$  - kut unutrašnjeg trenja;  $\gamma$  - specifična težina tla;  $c_u$  - nedrenirana posmična čvrstoća;  $q_{t(CPTu)}$  - otpor prodiranju CPTu šiljka;  $V_s$  - brzina posmičnih valova.



**Slika 6.** Karakteristični geotehnički profil tla za područje groblja u Bedekovčini.

### 3.2 Rezultati analiza i geotehnička karakterizacija klizišta

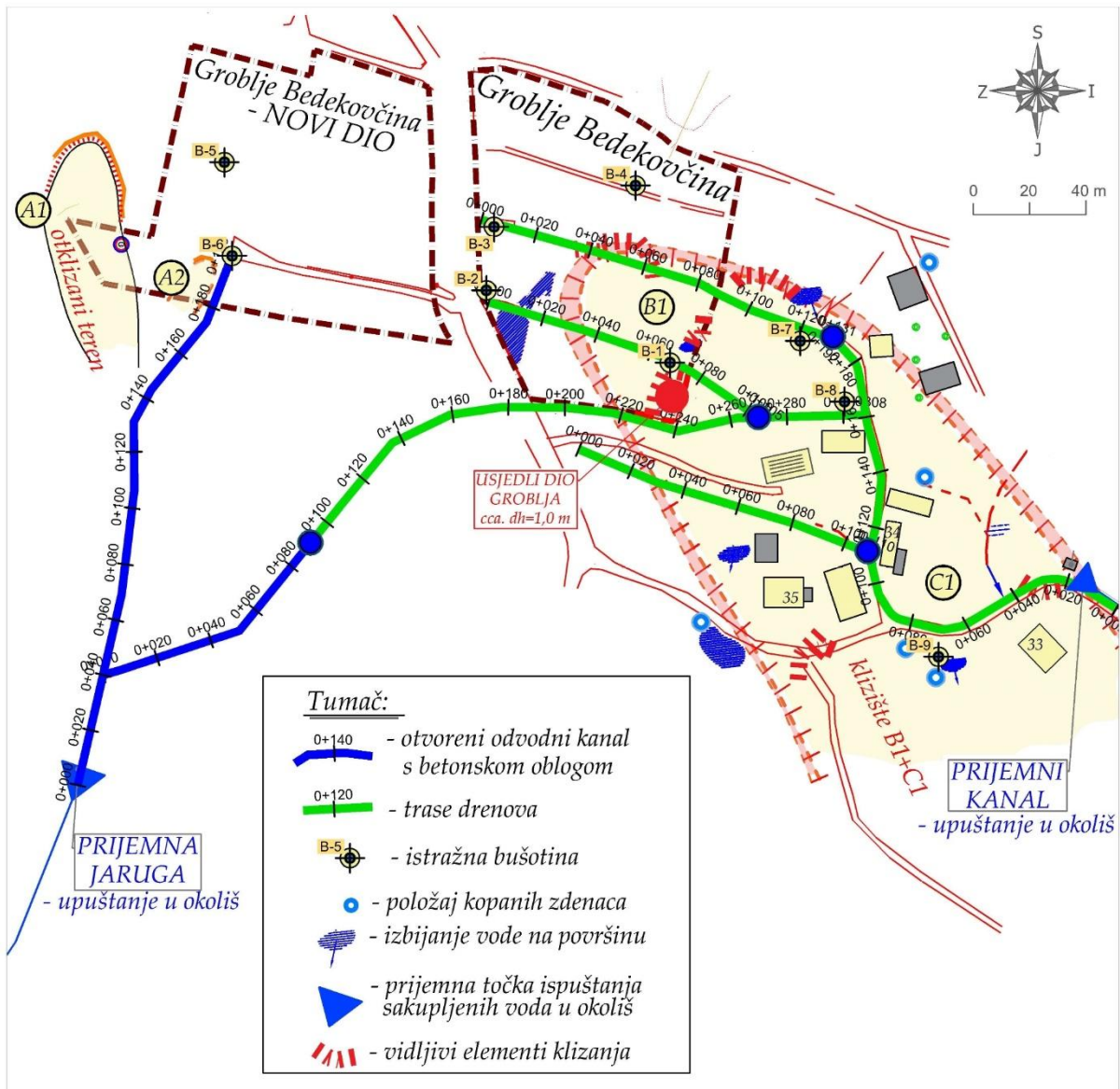
Proračun stabilnosti kosine proveden je Bishopovom metodom, uz primjenu računalnog programa Rocscience Inc., SLIDE 6.0. Analizirano je stanje s minimalnim parametrom posmične čvrstoće na kliznoj plohi u nedreniranim uvjetima  $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ , i to za dva slučaja: 1. suha padina i 2. saturirani površinski sloj sa piezometarskom linijom na površini terena. Ostvareni faktor sigurnost za suho stanje padine malo je veći od 1 ( $FS = 1,13$ ), što znači da za odabrane parametre modela vlada labilna stabilnost. U saturiranim uvjetima krovine (npr. nakon obilnih padalina) proračunati faktor sigurnosti je manji od 1 ( $FS = 0,93$ ). Iz provedene analize jasno je da se padina destabilizira nakon saturacije površinskog sloja, a u uvjetima velikih oborina, zbog toga što je površinsko otjecanje otežano i difuzno. Pri nagloj promjeni težine nadsloja (krovine) klizanje se unutar glina vrlo visoke plastičnosti (ClV) događa u nedreniranim uvjetima. Gline u kojima se formira klizna ploha malih su posmičnih čvrstoća, te procjedne vode ne trebaju nužno doći u kontakt sa ovim slojem kako bi mu dodatno smanjile posmičnu čvrstoću.

Nestabilnosti tla utvrđene su na širem prostoru, a obuhvaćaju prostor novog i starog dijela groblja u Bedekovčini kao i obližnje naselje. Razmatrano kroz aspekt pomaka tla i utvrđenih nestabilnosti zasebno je razmatran prostor novog groblja, te objedinjeno prostor starog groblja zajedno s naseljem.

Na samom jugozapadnom rubu novog groblja formirala su se dva klizišta. Veće klizište, s oznakom A1 na Slici 7, je jasno obrubljeno vlačnom pukotinom u čelu klizišta. Također su jasno uočljivi i lateralni rubovi koji se pružaju uzduž prirodne depresije u šumski dio terena, a ukupno zahvaćena površina je oko  $2000 \text{ m}^2$ . Utvrđeno je i manje klizište u razvoju (A2), površine približno  $270 \text{ m}^2$ . Radi se o formiranoj vlačnoj pukotini sa zijevom, te denivelacijom u čelu od  $0,8 \text{ m}$ . Veće klizište izravno je posljedica ispuštanja vode na ispusnoj građevini, a manje klizište razdvajanja oborinske odvodne cijevi. Dakle, posljedica nepravilno izvedene odvodnje i izljeva vode na izljevnoj građevini je formiranje oba klizišta. Uz krunu (čelo) manjeg klizišta izbušena je istražna bušotina B-6 koja je dodatno opremljena s cijevima za potrebe inklinometarskih opažanja. Nastalo klizište izravno je ugrozilo dio novog groblja. Zato je preporučeno ne korištenje posljednjeg reda grobišta, dok se ne izvede interventno uređenje odvodnje, te utvrdi smirivanje klizišta (inklinometarskim opažanjem). U sklopu interventnih mjera sanacije potrebno je izgraditi odvodni kanal obložen nepropusnim materijalom sve do formirane jaruge kao sigurnog recipienta oborinskih voda, s time da trasa odvodnog kanala mora biti odabrana sukladno geomorfologiji terena, uz izbjegavanje nestabilnog dijela padine. U kasnijoj fazi može se ukazati i potreba za dodatnim rješavanjem stabilizacije jugozapadnog rubnog dijela novog groblja, odnosno možebitna potreba za tehničkom sanacijom aktiviranog klizišta, a sukladno rezultatima opažanja.

Klizište na prostoru starog groblja i Čajkovljanskog naselja je staro klizište. Granice klizišta uspješno su okonturene u čeonom dijelu koji se nalazi na prostoru starog dijela groblja. To je dio groblja na kojem je došlo do slijeganja ukopnog polja oko  $1 \text{ m}$ . Lateralne konture kao i konture nožice nisu potpuno jasno izražene, ali su približno određene na prostor Čajkovljanskog naselja. Procijenjena je veličina površine klizišta na cca.  $4 \text{ ha}$ . Uzrok klizanja saturacija je pokrovnog tla oborinskim vodama kao rezultat vertikalne infiltracije pjeskovitih sedimenata na dijelovima površine, te otežanog otjecanja zbog horizontalne izmjene pjeskovitih materijala sa gotovo nepropusnim glinama vrlo visoke plastičnosti. Uzrok klizanja je geološkog karaktera, odnosno nepovoljna orijentacija litološke izmjene pjeskovitih sedimenata i hidrauličkih barijera u obliku vrlo masnih, nepropusnih glina. Iz navedenog razloga, oborinama uzrokovana linija podzemne vode, kao posljedica spriječenoga procjeđivanja, postaje površina terena. Kod takvih uvjeta (razdoblje velikih oborina), pokreće se klizanje terena po sloju glina vrlo visoke plastičnosti (ClV, granice tečenja  $w_L \cong 100-110\%$ ), a čiji su parametri posmične čvrstoće niski. Prisutnost podzemne vode čimbenik je koji negativno utječe na stabilnost, kako je pokazala analiza stabilnosti padine. U tom smislu izvedba drenažnog sustava omogućila bi efikasniju odvodnju. Predložena je izgradnja sustava paralelnih drenova ("riblja kost"), širine  $1 \text{ m}$  i maksimalne dubine do  $4 \text{ m}$ . Ukupna mreža drenova trebala bi učinkovito djelovati na sprečavanje podizanja podzemnih voda u vrijeme intenzivnih oborina. Kako prikazuje Slika 7, planirano je da se većina drenova odvodi prema

postojećem odvodnom kanalu uz cestu na istoku istražnog prostora, dok je centralni dren najveće dužine dvostrano odvodnjen prema jarugi na zapadu. U sklopu istražnih radova i na ovom klizištu postavljena je mreža inklinometara za dugotrajno opažanje pomaka tla sa svrhom potvrde pravilnosti sanacijskog rješenja i smirivanja pomaka.



Slika 7. Predložena shema sustava dreniranja prostora klizišta.

#### 4 Zaključak

Infiltracija oborinske vode u glinovita tla česti je "okidač" plitkih klizišta na padinama. No, kako bi se utvrdio točan uzrok klizanja, kretanje podzemnih voda i kreiralo rješenja sanacije, potrebno je provesti detaljna geotehnička, geofizička i geološka istraživanja. Izvedba navedenih radova može biti poprilično izazovna ako je klizište u obuhvatu građevina kulturne baštine. No, detaljnim planiranjima te profesionalnim i pažljivim radom na terenu mogu se izvesti detaljna istraživanja i pri tome dobiti vrlo kvalitetni rezultati, što je prikazano primjerom iz ovog rada. Naime, rezultati predmetnog istraživanja potvrđuju više poznatih činjenica iz geotehničkog inženjerstva, ali nude i neka specifična saznanja. Tako je na ovom primjeru utvrđeno da procjedne vode ne moraju nužno doći u kontakt s glinama male posmične čvrstoće kako bi se formirala klizna

ploha i aktiviralo klizište. Aktivnim snižavanjem razina podzemnih voda i izgradnjom drenažnih sustava moguće je djelovati na uzrok klizanja, te su sanacijska rješenja koja obuhvaćaju odvodnju vrlo prihvatljiva. U slučaju predmetnog tipa geohazarda poželjna je uspostava stalnog monitoringa pomaka tla sa svrhom potvrde efikasnosti sanacijskog rješenja.

## Zahvala

Analiza istraživanja prikazanog u ovom radu provedena je u sklopu Institucionalnog projekta Sveučilišta u Zagrebu Geotehničkog fakulteta pod nazivom “Metode istraživanja i sanacije plitkih klizišta na području građevina kulturne baštine - KLI-MET-KUL (GFV-IP-001/2025)”, financiranog sredstvima Europske unije (NextGenerationEU), odnosno iz izvora 581 – Mehanizam za oporavak i otpornost (Nacionalni plan oporavka i otpornosti 2021.-2026., NPOO).

## Literatura

- Aničić, B. and Juriša, M. (1984) *Osnovna geološka karta SFRJ M 1:100 000, list Rogatec (L 33-68)*. Karta i Tumač, Savezni geološki zavod, Beograd.
- Dimech, A., Cheng, L., Chouteau, M. et al. (2022) ‘A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years’, *Perspectives for Mining Waste Monitoring. Surv Geophys*, 43, pp. 1699–1759. doi: <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>
- Greco, O. Del and Oggeri, C. (2004) ‘Reinforcement design and control of rock slopes above tunnel portals in northern Italy’, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences - INT J ROCK MECH MINING SCI*, 41 (3), 515-515. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2003.12.094>
- Hoek, E. (2007) *Practical Rock Engineering: RocScience*. Dostupno na: [www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf](http://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf). (Preuzeto 04. rujna 2020).
- Jug, J., Grabar, K., Bek, A. and Strelec, S. (2024) ‘Stabilization of Shallow Landslides Induced by Rainwater Infiltration - A Case Study from Northern Croatia’, *Geotechnics*, 4 (1), pp. 242-263. doi: <https://doi.org/10.3390/geotechnics4010013>
- Kovačević, M.S., Jurić-Kačunić, D., Librić, L. and Ivoš, G. (2018) ‘Engineering soil classification according to EN ISO 14688-2:2018’, *GRAĐEVINAR*, 70 (10), pp. 873-879, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2437.2018>
- Krmpotić, I. (2018) *Srednjovjekovni utvrđeni gradovi kontinentalne Hrvatske kao potencijal za razvoj turizma*. Diplomski rad (sveučilišni). Sveučilište u Zagrebu Fakultet hrvatskih studija, Odsjek za kroatologiju, Zagreb, Hrvatska.
- Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M. (1997) *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Spon Press: London, UK; Taylor and Francis Group: New York, USA.
- Maes, J., Kervyn, M., de Hontheim, A., Dewitte, O., Jacobs, L., Mertens, K., Vanmaercke, M., Vranken, L. and Poesen, J. (2017) ‘Landslide risk reduction measures: A review of practices and challenges for the tropics’, *Progress in Physical Geography*, 41 (2). doi: <https://doi.org/10.1177/0309133316689344>
- Marchetti, S. (1980) ‘In situ tests by flat dilatometer’, *J. Geotech. Eng. Div.*, 106, pp. 299–321.
- Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž., Bernat Gazibara, S., Ljubičić, G., Krkač, M. and Jagodnik, P. (2023): *Smjernice za primjenu karata klizišta u Republici Hrvatskoj*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 32 str.
- Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1999) ‘Multichannel analysis of surface waves’, *Geophysics*, 64, pp. 800-808.
- Price, D.G. (2009) *Engineering Geology - Principles and Practice*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- Robertson, P.K. and Cabal, K.L. (2012) *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th ed., Benicia, CA, USA.

Strelec, S. Jug, J. and Grabar, K. (2024) *Geotehnička i geofizička terenska istraživanja*. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet.

Strelec, S., Mesec, J., Grabar, K. and Jug, J. (2017) 'Implementation of in-situ and geophysical investigation methods (ERT & MASW) with the purpose to determine 2D profile of landslide', *Acta montanistica Slovaca*, 22 (4), pp. 345-358.

Totani, G., Marchetti, S., Monaco, P. and Calabrese, M. (2001) 'Use of the Flat Dilatometer Test (DMT) in geotechnical design', *In situ, University of L'Aquila, Faculty of Engineering, L'Aquila, Italy*.