

Implementacija terenskih istraživanja u svrhu određivanja 2D modela klizišta

Bek, Anja

Master's thesis / Diplomski rad

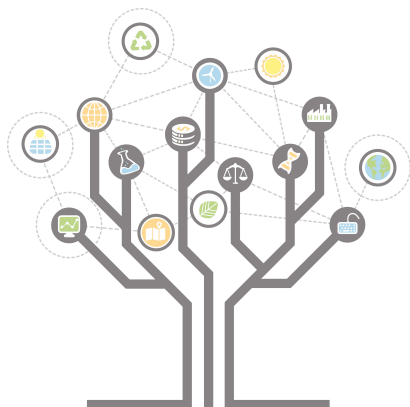
2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:281217>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANJA BEK

IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU
ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2022.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva
za 14.07.2022. u 9:00 h sa
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu
Varaždin, 30.06.2022.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

zv. prof. dr. sc. Sanja Korac

Članovi povjerenstva

- 1) Prof. dr. sc. Stjepan Strdelc
- 2) Doc. dr. sc. Jasmin Jug
- 3) zv. prof. dr. sc. Boris Klavžar

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANJA BEK

IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU
ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

Anja Bek

Bek

MENTOR:

Prof. dr. sc. Stjepan Strelec

KOMENTOR:

Doc. dr. sc. Jasmin Jug

VARAŽDIN, 2022.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

Implementacija terenskih istraživanja u svrhu određivanja 2D modela klizišta

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof.dr.sc. Stjepana Streleca** i komentorstvom **doc.dr.sc. Jasmina Juga**. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 13.06.2022.

Anja Bek
(Ime i prezime)



(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

Implementacija terenskih istraživanja u svrhu određivanja 2D modela klizišta

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20 %, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5 %.

U Varaždinu, 13. 06. 2022 .

Prof.dr.sc. Stjepan Strelec

(Mentor)



(Vlastoručni potpis)

Zahvala

Posebno zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Stjepanu Strelecu i komentoru, doc. dr. sc. Jasminu Jugu, na pomoći, mnogim savjetima i smjernicama pruženim tijekom izrade ovog diplomskog rada. Veliku zahvalu dugujem firmi SPP d.o.o. na mogućnosti obavljanja stručne prakse i stečenom iskustvu u terenskim istraživanjima koja su mi bila od velikog značaja tijekom pisanja diplomskog rada. Hvala mojoj obitelji, dečku i prijateljima za razumijevanje, ljubav i potporu u teškim trenucima.

SAŽETAK

IME I PREZIME AUTORA: Anja Bek

NASLOV RADA: Implementacija terenskih istraživanja u svrhu određivanja 2D modela klizišta

Klizište se definira kao dio kosine na kojoj je zbog poremećaja stabilnosti došlo do klizanja i premještanja mase tla ili stijene iz nestabilnog položaja u stabilan. Glavnim uzrokom klizanja smatra se voda (saturiranost pora u tlu vodom). Klizišta predstavljaju vrlo ozbiljan problem današnjice pa su stoga adekvatna terenska istraživanja od velike važnosti za određivanje uzroka klizanja i sanacijskog rješenja. U ovom radu opisani su, prezentirani i interpretirani rezultati terenskih istraživanja klizišta na dvije lokacije, i to na području Samarice i Petrovskog. Od geofizičkih metoda izvedena je geoelektrična tomografija, višekanalna analiza površinskih valova i seizmička refrakcija. Geotehnički istražni radovi obuhvaćali su statičko sondiranje konusnim penetrometrom i dilatometrom te dinamičko sondiranje teškom i lakom udarnom sondom. Analiza je pokazala izvrsno nadopunjavanje i preklapanje rezultata geofizičkih i geotehničkih metoda. Iako istražno bušenje predstavlja najizraavniju metodu istraživanja, vrlo je skupo i dugotrajno, te se dobivaju samo točkasti podaci. Rezultati istražnog bušenja na području klizišta Samarica pokazali su dobru korelaciju s rezultatima ostalih geofizičkih i geotehničkih metoda. Terenski istražni radovi bez primjene sondažnog bušenja na području klizišta Petrovsko pokazali su se vrlo uspješnim u detektiranju dubine klizne plohe. Nakon provedenih istraživanja predložena su sanacijska rješenja. Uspješnost sanacijskog rješenja provjerila se analizom stabilnosti prema Bishop-u, pri čemu faktor sigurnosti definira stabilnost kosine. Za slučaj stabilne kosine faktor sigurnosti mora biti veći od 1.

KLJUČNE RIJEČI: klizna ploha, geofizičke i geotehničke metode istraživanja, analiza stabilnosti kosine, sanacija klizišta.

ABSTRACT

NAME AND SURNAME of the AUTHOR: Anja Bek

TITLE: The implementation of field studies for the purpose of determining a 2D landslide model

Landslide is defined as the part of the slope on which, due to stability disturbances, landslides and displacements of soil or rock have occurred from an unstable position to a stable one. The main cause of sliding is considered to be water (saturation of pores in the soil with water). Landslides are a very serious and current problem today. Therefore, adequate field research is of great importance for determining the cause of landslides and remediation solution. This paper describes, presents and interprets the results of field research of landslides at two locations, in the area of Samarica and Petrovsko. Geoelectric tomography, multichannel analysis of surface waves and seismic refraction were performed from geophysical methods. Geotechnical investigations included static sounding with a conical penetrometer and dilatometer and dynamic sounding with a heavy and light impact probe. The analysis showed excellent complementarity and overlap of the results of geophysical and geotechnical methods. Although exploratory drilling is the most direct research method, it is very expensive and time consuming, and only point data are obtained. The results of exploratory drilling in the area of the Samarica landslide show a good correlation with the results of other geophysical and geotechnical methods. Field exploration works without the use of sounding drilling in the area of the landslide Petrovsko proved to be very successful in detecting the depth of the sliding surface. After the research, remedial solutions were proposed. The success of the remediation solution is checked by stability analysis according to Bishop, where the safety factor defines the stability of the slope. In the case of a stable slope, the safety factor must be greater than 1.

KEYWORDS: sliding surface, geophysical and geotechnical research methods, slope stability analysis, landslide remediation.

SADRŽAJ

| | | |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | UVOD | 1 |
| 2. | OPĆENITO O KLIZIŠTIMA I STABILNOSTI KOSINA | 2 |
| 2.1. | Klizišta | 2 |
| 2.1.1. | Uzroci klizanja | 2 |
| 2.1.2. | Dijelovi i podjela klizišta | 3 |
| 2.2. | Analiza stabilnosti kosina | 4 |
| 2.2.1. | Metode proračuna stabilnosti kosina..... | 5 |
| 3. | GEOFIZIČKE METODE ISTRAŽIVANJA NA KLIZIŠTIMA | 10 |
| 3.1. | Geoelektrične metode | 10 |
| 3.1.1. | Geoelektrična tomografija..... | 11 |
| 3.2. | Seizmičke metode | 12 |
| 3.2.1. | Seizmička refrakcija..... | 13 |
| 3.2.2. | Višekanalna analiza površinskih valova | 14 |
| 4. | GEOTEHNIČKE METODE ISTRAŽIVANJA NA KLIZIŠTIMA | 15 |
| 4.1. | Statički konusni penetrometar | 15 |
| 4.2. | Dilatometar | 19 |
| 4.3. | Teška i laka udarna sonda..... | 22 |
| 5. | PRIMJER IMPLEMENTACIJE TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | 23 |
| 5.1. | Metodologija istraživanja | 24 |
| 5.1.1. | Inženjersko-geološka prospekcija terena | 24 |
| 5.1.2. | Geofizička istraživanja..... | 24 |
| 5.1.3. | Geotehnička istraživanja | 25 |
| 5.1.4. | Proračun stabilnosti kosine prema metodi Bishopa | 27 |
| 5.2. | Rezultati istraživanja i interpretacija | 27 |
| 5.3. | Vizualna identifikacija klizišta | 27 |
| 5.3.1. | Litološke značajke lokacija | 29 |

| | | |
|---------|--------------------------------------------------------|----|
| 5.3.2. | ERT istraživanje..... | 29 |
| 5.3.3. | MASW i SRS istraživanje..... | 33 |
| 5.3.4. | CPTu istraživanje | 36 |
| 5.3.5. | DMT istraživanje | 38 |
| 5.3.6. | DPL i DPH istraživanje..... | 41 |
| 5.3.7. | Istražno bušenje i laboratorijska ispitivanja..... | 43 |
| 5.3.8. | Litološki sastav tla..... | 44 |
| 5.3.9. | Geotehničke značajke temeljnog tla..... | 45 |
| 5.3.10. | Hidrološki uvjeti u tlu..... | 46 |
| 5.3.11. | Glavni razlozi pojave nestabilnosti | 47 |
| 5.3.12. | Analiza stabilnosti kosine prema metodi Bishop-a | 51 |
| 5.3.13. | Prijedlog sanacijskog rješenja | 57 |
| 6. | ZAKLJUČAK | 59 |
| 7. | LITERATURA..... | 61 |
| 8. | POPIS SLIKA | 65 |
| 9. | POPIS TABLICA..... | 67 |
| 10. | POPIS I OBJAŠNJENJE KORIŠTENIH KRATICA..... | 68 |

1. UVOD

Klizišta se smatraju ozbiljnim problemom današnjice u cijelom svijetu jer uzrokuju velike štete i gubitke. Republika Hrvatska se suočava s čestim pojavama klizišta. Tijekom zime i proljeća 2013. godine, zbog ekstremnih vremenskih uvjeta, (re)aktiviralo se više od 900 plitkih klizišta (Mihalić Arbanas i dr., 2017.). U susjednim zemljama, Sloveniji i Italiji, također se javljaju problemi aktiviranja klizišta (Jordanova i dr., 2020., Corsini i Borgatti, 2019., Tofani i dr., 2017.). Zbog navedenog, istraživanje klizišta predstavlja vrlo aktualnu i čestu temu, posebno u ovom dijelu Europe.

U ovom radu opisani su postupci implementacije geofizičkih i geotehničkih metoda za potrebe određivanja dubine klizne plohe na dvije različite lokacije klizišta. Istražni radovi dali su uvid u geotehničke karakteristike tla na prostoru klizišta, kao osnovu za projekt sanacije. Na klizištu Samarica, istražni radovi obuhvaćali su metode statičkog i dinamičkog sondiranja, te geofizičke seizmičke i geoelektrične metode. Također, provodilo se istražno bušenje s jezgrovanjem kao klasična i najizravnija metoda istraživanja.

Istražni radovi za dobivanje 2D modela klizišta općenito obuhvaćaju istražno bušenje čiji rezultati su, većinom, dobro korelirani s geofizičkim i geotehničkim metodama istraživanja (Strelec i dr., 2017). Bušenje je prilično skupo i dugotrajno te daje jednodimenzionalne informacije samo na lokaciji bušenja. Stoga su istraživanja klizišta u mjestu Petrovsko provedena bez istražnog bušenja kako bi se provjerila mogućnost dobivanja kvalitetnih podataka bez primjene te standardne metode geotehničkih istraživanja. Geotehničke metode istraživanja na klizištu Petrovsko uključivale su statičko sondiranje konusnim penetrometrom i dinamičko sondiranje lakom udarnom sondom. Od geofizičkih metoda, provodilo se seizmičko i geoelektrično snimanje.

Nakon provedenih istraživanja, obrade i interpretacije rezultata predložila su se sanacijska rješenja za svaku od istraživanih lokacija. Uspješnost sanacijskog rješenja provjeravana je analizom stabilnosti kosine prema Bishop-u. (Bishop, 1955). Pokazatelj uspješne sanacije je faktor sigurnosti, koji za slučaj stabilne kosine mora biti veći od 1.

2. OPĆENITO O KLIZIŠTIMA I STABILNOSTI KOSINA

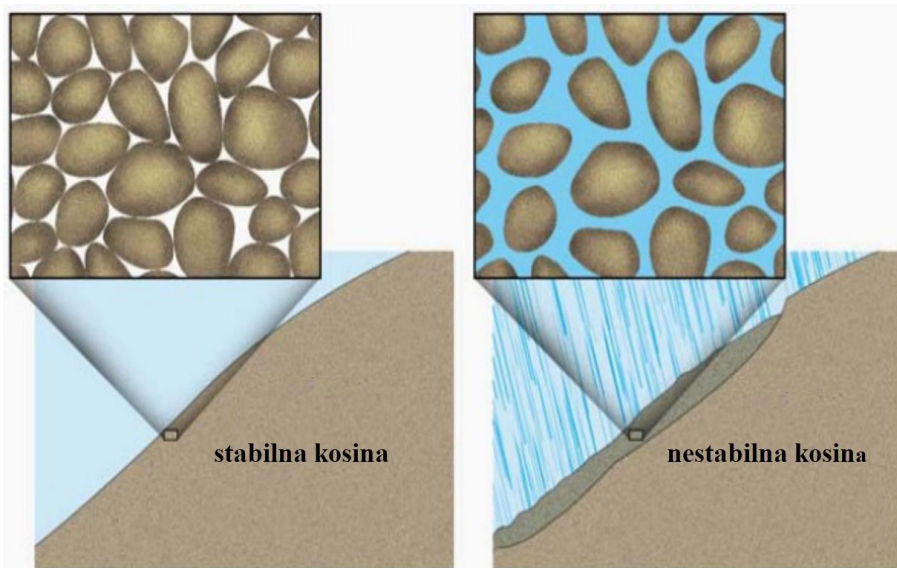
2.1. Klizišta

Klizište predstavlja dio padine (nagnutog terena) na kojem je, zbog poremećaja stabilnosti, došlo do klizanja i premještanja mase tla ili stijene iz nestabilnog položaja u stabilan. Prema Crudenu (1991) klizanje je gibanje mase stijena, debrisa ili tla niz kosinu. Time se misli na sve tipove gravitacijskih gibanja masa tla i stijena, od odronjavanja i prevrtanja stijena, rotacijskih i translacijskih klizanja, do tečenja različitih materijala. Kretanje mase dešava se, u većini slučajeva, po kružnoj ili ravninskoj kliznoj plohi, ali ponekad i po nejasno definiranoj kliznoj plohi. Klizanje može biti trenutno i razarajuće ili se formira kroz dugi niz godina. Do prestanka klizanja može doći zbog promjene naprezanja i oblika kosine te ponovne uspostave ravnoteže ili prestankom djelovanja utjecaja koji su izazvali klizanje.

2.1.1. Uzroci klizanja

Uzroci klizanja dijele se na prirodne i umjetne (izazvane ljudskim aktivnostima). U prirodne uzroke ubrajaju se mineraloški sastav tla i stijena, njihove geotehničke karakteristike i nagib površine kosine. Ostali prirodni uzroci su voda, gravitacija, razgradnja, erozija, potresi, požari, tektonika i dr. Ljudi svojim nepravilnim korištenjem zemljišta imaju veliki utjecaj na nastanak klizišta. Ljudske aktivnosti kojima se inicira nastanak klizišta su npr. formiranje dodatnih opterećenja na vrhu padine, zasijecanje u padini, sniženje i porast podzemne i površinske vode, skretanje tokova, seizmička aktivnost, umjetne vibracije, sječa šuma, rudarenje, itd.

Zasićenost (saturiranost) tla vodom smatra se primarnim uzrokom aktivacije klizišta. Porastom razine podzemne vode povećavaju se porni tlakovi koji smanjuju efektivno naprezanje, a samim time i posmičnu čvrstoću. Kada je tlo suho, prisutno je veće trenje između čestica tla te je faktor sigurnosti veći u odnosu na kosinu saturiranu vodom (slika 2.1.a). Saturacijom tla vodom dolazi do razmicanja čestica i popunjavanja pora vodom što dovodi do tečenja tla (smanjuje se trenje između čestica) i nestabilnosti kosine (slika 2.1.b). Zbog toga se mnoga klizišta javljaju nakon obilnih oborina.



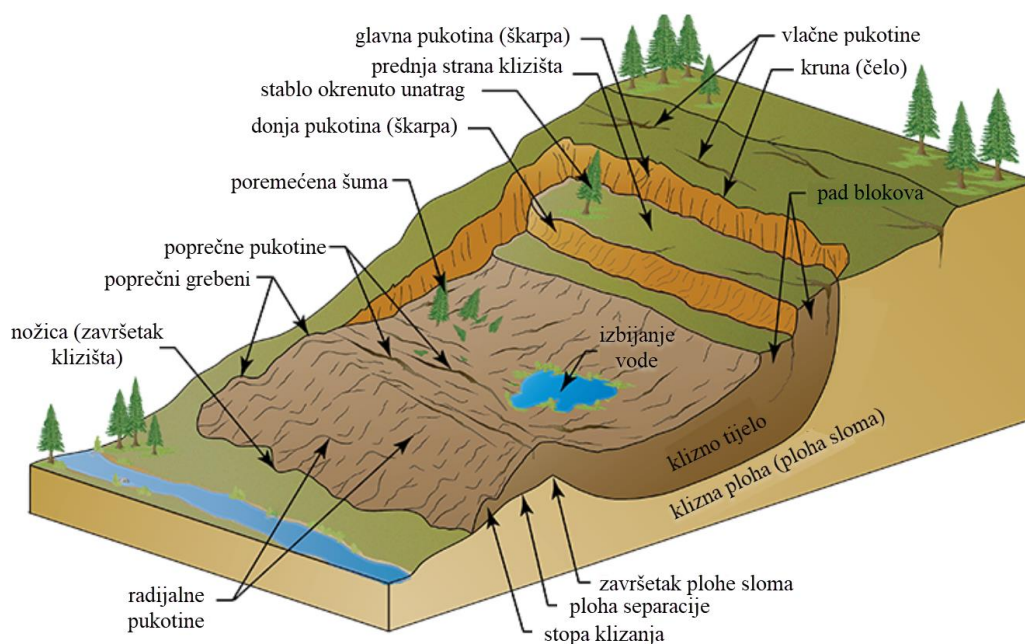
a) suho tlo - visoko trenje

b) saturirano tlo

Slika 2.1. Utjecaj saturiranosti tla vodom na stabilnost kosine (prema Nossa i District Landcare, 2018)

2.1.2. Dijelovi i podjela klizišta

Glavni dijelovi klizišta su čelo (kruna), klizno tijelo i klizna ploha. Na klizištima se često mogu pojaviti drugi elementi, poput različitih tipova pukotina (vlačne, radijalne, poprečne), izbijanja vode, nagnutih stabala, grebena i dr. Na slici 2.2. prikazani su dijelovi klizišta.



Slika 2.2. Dijelovi klizišta (prema Disas-SHARE)

Kod sitnozrnatih (koherentnih) tala vrlo česta pojava je otvaranje vlačne pukotine na vrhu (glavi) potencijalnog kliznog tijela i rani je pokazatelj nestabilnosti kosine. Vlačna pukotina nastaje zbog izraženih vlačnih naprezanja koja prekorače vrlo malu vlačnu čvrstoću tla, a to može inicirati nastanak nove klizne plohe.

U današnje vrijeme postoji mnogo različitih klasifikacija klizišta. Glavni razlog za to su složenost procesa klizanja i kretanja mase tla ili stijene. U tablici 2.1. dana je pregledna podjela klizišta prema karakteru pokreta i vrsti materijala.

Tablica 2.1. Podjela klizišta ovisno o vrsti materijala u kojem nastaju (prema Varnes, 1996)

| Vrsta gibanja | | Vrsta materijala | | |
|----------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------|---------------------|----------------|
| | | Stijena | Tlo | |
| | | | Pretežno zrnato | Pretežno fino |
| odroni | | odron stijene | odron krhotina | odron tla |
| prevrtanje | | prevrtanje stijene | prevrtanje krhotina | prevrtanje tla |
| klizanja | rotacijsko | klizanje stijene | klizanje kršja | klizanje tla |
| | translacijsko | | | |
| bočno širenje | | širenje stijene | širenje kršja | širenje tla |
| tokovi | | tok stijene | tok kršja | zemljani tok |
| | | | blatni tok | |
| | | puzanje | | |
| kompleksna klizanja-kombinacija dva ili više glavnih tipova klizanja | | | | |

2.2. Analiza stabilnosti kosina

Određivanje stabilnosti kosina predstavlja jednu od vrlo važnih i izazovnih djelatnosti u geotehničkoj praksi i zaštiti okoliša. Cilj analize stabilnosti je procjena sigurnosti kosina i uvjeta koji dovode do sloma. Najvažniji elementi u analizi su građa i svojstva tla te režim podzemne vode. Do sloma kosine dolazi zbog prekoračenja posmične čvrstoće, kada aktivne sile dostignu veću vrijednost od sila otpora (reaktivnih sila).

U aktivne sile ubrajaju se gravitacijska sila (uvijek prisutna), sila uzrokovana vodom, potresom i vanjskim opterećenjem (prisutne ovisno o aktivnosti i utjecajima). Djelovanju sile gravitacije pridonose materijal kosine, nagib kosine, klimatski uvjeti i dr.

Posmična i normalna sila na kliznoj plohi predstavljaju sile otpora. Otpor klizanju kosine ovisi o posmičnoj čvrstoći, koja je ovisna o trenju, te o vrsti materijala kosine. Poremećaj trenja na kosini dovodi do sloma kosine i klizanja.

FAKTOR SIGURNOSTI

Faktor sigurnosti mijenja se ovisno o posmičnoj čvrstoći tla, a posmična čvrstoća ovisi o vertikalnom efektivnom naprezanju. Faktor sigurnosti protiv sloma kosine određen je je jednadžbom 2.1.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\textit{sile otpora}}{\textit{aktivne sile}} \quad (2.1.)$$

Oznake u jednadžbi su:

F_s - faktor sigurnosti protiv sloma

τ_f - posmična čvrstoća na kliznoj plohi

τ - posmično naprezanje na kliznoj plohi

Ako je faktor sigurnosti veći od 1 ($F_s > 1$) neće doći do sloma tla, odnosno klizanja. U slučaju kada faktor sigurnosti poprima vrijednost manju od 1 dolazi do slom tla, odnosno klizanja po kliznoj plohi ($0 \leq F_s < 1$). Kada faktor sigurnosti iznosi $F_s = 1$ govorimo o labilnoj ravnoteži.

2.2.1. Metode proračuna stabilnosti kosina

Kod prvih proračuna stabilnosti kosine upotrebljavale su se grafičke metode ili se proračun provodio ručno. Razvojem računala, razvile su se mnoge složenije metode koje su danas u upotrebi. Prema Eberhardt (2003) opća podjela metoda je na:

- metode granične ravnoteže
- numeričke metode.

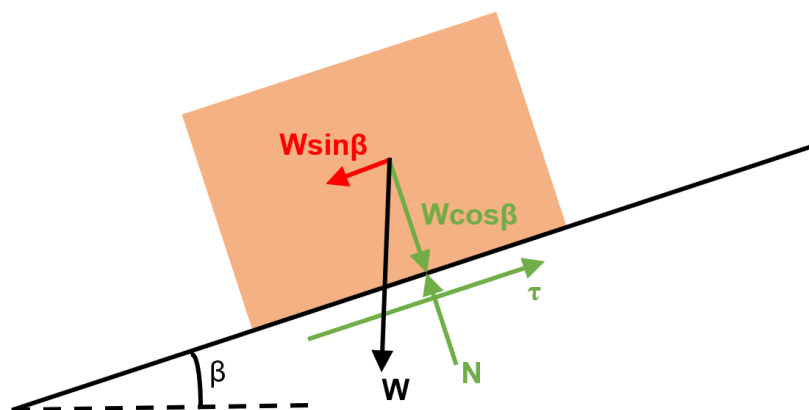
Metode granične ravnoteže koriste se za rješavanje jednostavnijih problema, a nisu primjenjive kod kompleksnijih proračuna s pojavama puzanja, likvefakcije i konsolidacije. Prije postupka proračuna treba odrediti ravnotežu sila i/ili momenata koji

djeluju na kosini, te je potrebno uravnotežiti aktivne i reaktivne sile. Na temelju njihove ravnoteže određuje se raspodjela i veličina naprezanja na kliznoj plohi. Metoda granične ravnoteže (metoda lamela) temelji se na statički određenom sustavu lamela čija se krutost zanemaruje. Klizno tijelo je kruti blok, a faktor sigurnosti je konstantan po cijeloj kliznoj plohi.

U današnje vrijeme, od metoda opće granične ravnoteže, najčešće su u primjeni metoda Felleniusa (Švedska), Bishopa, Janbua, Morgenster-Pricea i Spencera. U nastavku je prikazan proračun stabilnosti beskonačne kosine (model bloka) i kosine koja sadrži kružnu kliznu plohu, po metodama Felleniusa i Bishopa.

MODEL BLOKA NA BESKONAČKOJ KOSINI

U analizi planarnog sloma kosine (slom duž određenog geološkog diskontinuiteta), najjednostavniji model koji se koristi je model bloka na beskonačnoj kosini u graničnoj ravnoteži (slika 2.3.).



Slika 2.3. Blok na beskonačnoj kosini u graničnoj ravnoteži (prema Kliche, 2018)

Sile koje djeluju na blok opisane su izrazima 2.2. i 2.3. Kada se izraz 2.3. uvrsti u 2.2., dobiva se složeni oblik jednadžbe prikazan izrazom 2.4.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (2.2.)$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{W \cos \beta}{A} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.3.)$$

$$\tau = c + \frac{W \cos \beta}{A} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.4.)$$

$$M_{A1} = W \cdot x \quad (2.6.)$$

$$M_{A2} = P_w \cdot \left(h + \frac{2}{3} h_t \right) \quad (2.7.)$$

Sila P_w računa se kao površina pravokutnika sa stranicama h_t i $\gamma_w h_t$:

$$P_w = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot h_t^2 \quad (2.8.)$$

Ukupni moment aktivnih sila sada iznosi:

$$M_{A1} + M_{A2} = W \cdot x + \left(\frac{1}{2} \gamma_w \cdot h_t^2 \right) \left(h + \frac{2}{3} h_t \right) \quad (2.9.)$$

Moment sile otpora je sljedeći:

$$M_O = \tau \cdot \widehat{AB} \cdot R$$

$$M_O = c \cdot (R \cdot \alpha) \cdot R \quad (2.10.)$$

$$M_O = c \cdot R^2 \cdot \alpha$$

Faktor sigurnosti za kružnu kliznu plohu prema Švedskoj metodi računa se prema izrazu 2.11.

$$F_s = \frac{c \cdot R^2 \cdot \alpha}{W \cdot x + \left(\frac{1}{2} \gamma_w \cdot h_t^2 \right) \left(h + \frac{2}{3} h_t \right)} \quad (2.11.)$$

Oznake u navedenim jednadžbama su:

M_{A1}, M_{A2} - momenti aktivnih sila na kosini

W - težina kliznog tijela

x - krak na kojem djeluje težina kliznog tijela

P_w - sila aktivnog tlaka vode

γ_w - zapreminska težina vode

h - vertikalna udaljenost od površina tla do središta kružne plohe

M_O - moment sile otpora na kosini

\widehat{AB} - duljina klizne plohe

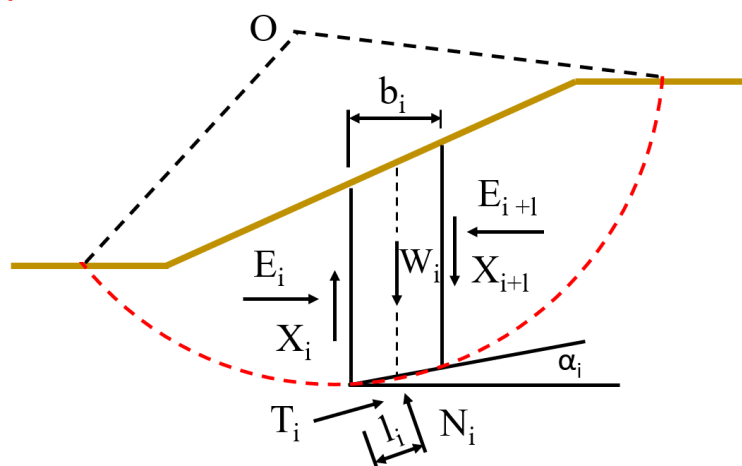
R - radijus klizne plohe

c - kohezija

α - kut između radijusa završetka klizne plohe i radijusa završetka vlačne pukotine

BISHOPOVA POJEDNOSTAVLJENA METODA

Bishopova metoda lamela vrlo se često koristi u proračunima stabilnosti kosina. Odnos između vertikalnih napreznja i posmične čvrstoće definiran je Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće. Mohr-Coulombov zakon detaljno su opisali Labuz i Zang (2012). Metoda se temelji na analizi momenta ravnoteže potencijalno nestabilnog segmenta tla (kliznog tijela) čija je klizna ploha kružnog oblika. Klizno tijelo podijeli se na vertikalne lamele približno jednakih površina. Na slici 2.5. vidljiv je prikaz sila koje djeluju na lamele. Posmična napreznja između pojedinih lamela označena su sa X_i , normalna napreznja s N_i , a oznaka l_i predstavlja duljinu baze lamele.



Slika 2.5. Grafički prikaz teoretskih postavki Bishopove pojednostavljene metode (Fine Ltd, 2014)

Faktor sigurnosti prema Bishopu izračunava se uzastopnom iteracijom izraza 2.12. (Fine Ltd, 2014).

$$F_s = \frac{1}{\sum_i W_i \sin \alpha_i} \sum_i \frac{c_i b_i + (W_i - u_i b_i) \operatorname{tg} \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_i}{F_s}} \quad (2.12.)$$

Oznake u izrazu 2.12. su sljedeće:

W_i - težina lamele

u_i - porni tlak koji djeluje na lamelu

c_i - kohezija pojedine lamele

φ_i - kut unutrašnjeg trenja pojedine lamele

α_i - nagib baze lamele prema horizontali

b_i - širina pojedine lamele $W_i \sin \alpha_i$

3. GEOFIZIČKE METODE ISTRAŽIVANJA NA KLIZIŠTIMA

U današnje vrijeme, razvitkom suvremenih tehnologija, primjena geofizičkih metoda postala je nezaobilazna u geotehnici, građevinarstvu i u zaštiti okoliša. Kod istraživanja klizišta geofizičke metode primjenjuju se sa ciljem dobivanja kvalitetne 2D interpretacije podpovršinske građe tla, a time i bolje razumijevanje procesa unutar klizišta (Strelec i dr., 2017). Geofizičkim metodama se indirektno (s površine zemlje) određuju geološko-strukturalna i fizikalna svojstva tla i stijena. Rezultati se mogu interpretirati u 2-D (najčešće) ili 3-D obliku. U primjeni su različite vrste geofizičkih metoda kao što su geoelektrične, seizmičke, magnetske, radioaktivne itd. Navedene metode se razlikuju u tome što se u svakoj pojedinoj metodi proučavaju druga svojstva tla.

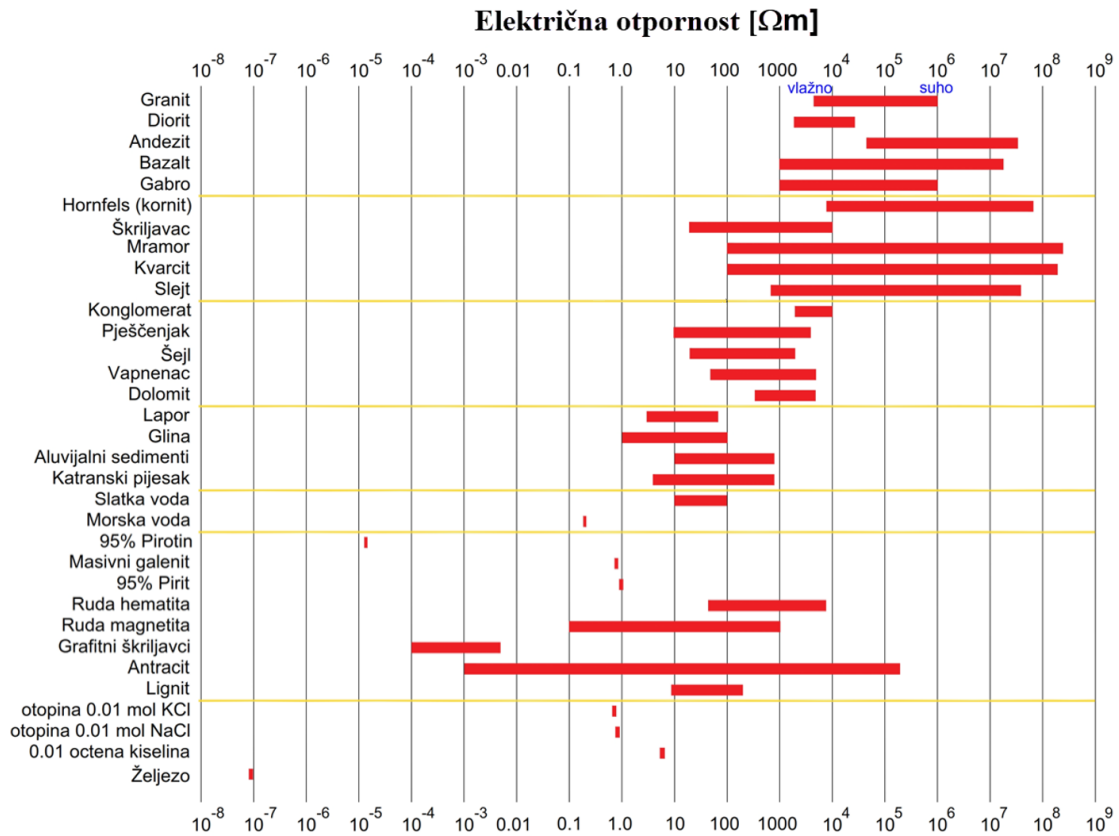
U sljedećim poglavljima ukratko su opisane geofizičke metode koje su korištene kod istraživanja klizišta u Petrovskom i Samarici.

3.1. Geoelektrične metode

Geoelektričnim metodama određuje se otpornost materijala prema protjecanju električne struje. Određivanjem i interpretacijom otpornosti mogu se dobiti informacije o sastavu i geološkoj građi terena. Geološke sredine su pretežito heterogene pa otpor (prividni) ima neku prosječnu vrijednost. Otpornost tla i stijena posljedica je različitih svojstava, od kojih su najvažnija litologija terena, kompaktnost, raspucalost, šupljikavost, svojstva vode (mineralizacija, zaslanjenost) i stupanj saturacije vodom (Šumanovac, 2007).

Različite vrste materijala imaju različite otpornosti kao što je prikazano na slici 3.1. Eruptivne i metamorfne stijene imaju visoke vrijednosti električne otpornosti. Sedimentne stijene, koje karakterizira veća poroznost i sadržaj vode, imaju manju vrijednost električne otpornosti. Otpornost podzemne vode kreće se u rasponu od 10 do 100 Ωm , a morske vode oko 0,2 Ωm (vrlo niska električna otpornost). Najpoznatije geoelektrične metode otpornosti su električno sondiranje, električno profiliranje i električna tomografija. Podaci koji se dobivaju geoelektričnim istraživanjima mogu biti

vrlo pouzdani ako se verificiraju sa strukturnim bušenjima ili nekim drugim geotehničkim metodama istraživanja. Od velike je važnosti da interpretaciju rezultata mjerenja provodi iskusan geofizičar.



Slika 3.1. Električna otpornost nekih stijena, tla i minerala (prema Loke, 2021)

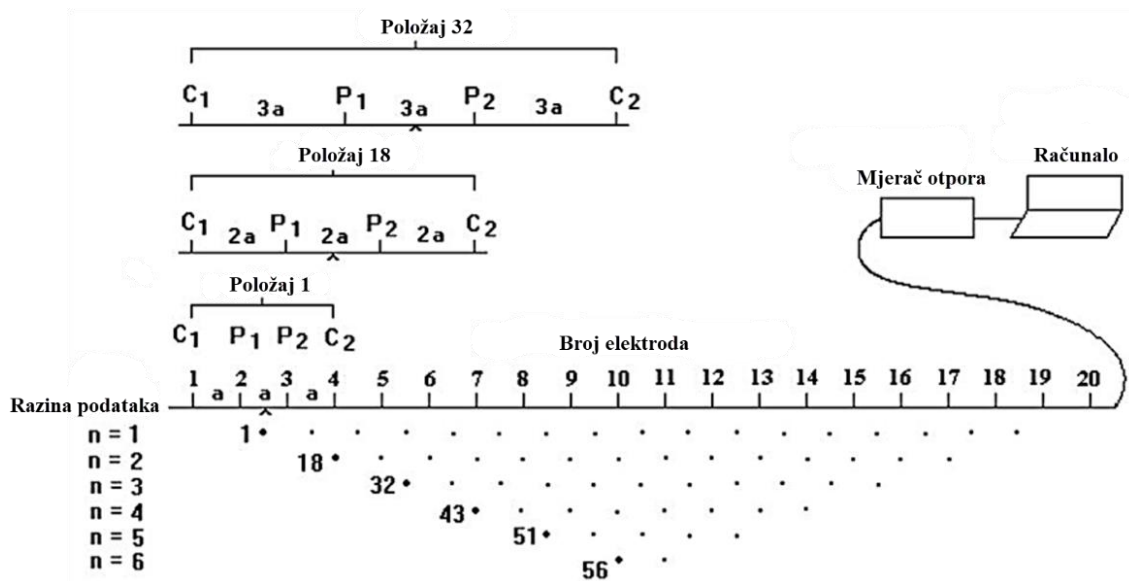
3.1.1. Geoelektrična tomografija

2-D električna tomografija (engl. Electrical Resistivity Tomography, ERT) je površinska geoelektrična metoda kojom se mjere električne otpornosti geomedija. Zbog mogućnosti mjerenja otpornosti u okomitom i uzdužnom smjeru, geoelektrična tomografija daje dobre rezultate u istraživanju krškog područja te u kartiranju područja u kojem su se odvijali složeni geološki procesi. Za dobivanje preciznije slike o raspodjeli otpornosti u podzemlju, potrebno je napraviti postupak inverzije na mjerenim podacima tj. prividne otpornosti dobivene mjerenjem pomoću 2D električne tomografije interpretiraju se inverznim metodama (Šumanovac, 2007.).

Mjerenje se izvodi s više dubinskih zahvata pri čemu se mijenjaju točke mjerenja. Elektrode spojene kablama postavljaju se na jednake udaljenosti duž profila i povezuju

pomoću kabla na instrument za mjerenje otpornosti. Tijekom istraživanja mjeri se jakost struje između strujnih elektroda pa se iz razlike potencijala između potencijalnih elektroda, koristeći konstantu geometrijskih odnosa elektroda, određuje prividna otpornost.

Mjerenje se najčešće izvodi Wennerovim mjernim rasporedom. Na slici 3.2. prikazan je primjer sa sustavom od 20 elektroda koje se nalaze na razmaku 1a. U prvom koraku izvode se mjerenja s razmakom 1a. Kod prvog mjerenja koriste se elektrode 1, 2, 3 i 4, a točka mjerenja nalazi se između druge i treće elektrode tj. u sredini. Drugo mjerenje izvodi se s elektrodama 2, 3, 4 i 5. U svakom sljedećem mjerenju elektrode se pomiču za 1a sve do zadnje elektrode. U drugom koraku mjerenje se obavlja s razmakom 2a. Kod prvog mjerenja koriste se elektrode 1, 3, 5 i 7, u drugom 2, 4, 6, 8, te se slijed nastavlja sve do zadnje elektrode. Navedeni postupak mjerenja ponavlja se za razmake 3a, 4a, 5a i 6a.



Slika 3.2. Wennerov raspored elektroda kod geoelektrične tomografije i nastanak pseudosekcije (prema Knödel i dr., 2007)

3.2. Seizmičke metode

Seizmičke metode koriste širenje seizmičkih valova za određivanje slojevitosti, stišljivosti i ostalih parametara tla i stijena. Seizmičkim metodama izazivaju se elastična titranja (potresi) na površini koji se šire kroz geomedij i nailaze do određenih točaka gdje se registriraju malim seizmometrima ili geofonima. Na temelju vremena putovanja

seizmičkih valova do geofona određuju se brzine širenja seizmičkih valova kroz geomedij (Šumanovac, 2007). Seizmički valovi mogu biti prostorni, P i S valovi (primarni i sekundarni) te površinski, L i R valovi (Rayleighovi i Loveovi).

Seizmički valovi putuju različitim brzinama kroz različite vrste tla i stijena (tablica 3.1.), pri čemu općenito tla imaju manje brzine od stijena. Prisutnost podzemne vode u nekoherentnim tlama može uzrokovati porast brzine P valova v_p , koja tada često ima vrijednost veću od 1500 m/s. Podzemna voda ne utječe na brzinu S valova v_s .

Tablica 3.1. Brzine P i S valova te gustoće određenih geomedija (prema McDowell i dr., 2002)

| Geomedij | v_p [m/s] | v_s [m/s] | Gustoća [Mg/m ³] |
|--------------------------|-------------|-------------|------------------------------|
| zrak | 330 | - | - |
| čista voda | 1450 - 1510 | - | 1,00 |
| granit | 4000 - 6100 | 2150 - 3350 | 2,67 |
| gabro | 6550 | 3450 | 2,98 |
| bazalt | 5600 | 3050 | 3,00 |
| pješčenjak | 1800 - 4000 | 915 - 3000 | 2,45 |
| šejl | 2500 - 4250 | 1000 - 3000 | 2,60 |
| vapnenac | 2000 - 6100 | 1800 - 3800 | 2,65 |
| glina | 1100 - 2500 | 580 | 1,40 |
| pijesak, šljunak | 300 - 800 | 100 - 500 | 1,70 |
| pijesak, šljunak (mokri) | 1500 - 2700 | 900 - 1600 | 1,93 |
| lapori | 1800 - 3900 | 1050 - 2300 | 2,35 |

3.2.1. Seizmička refrakcija

Seizmička refrakcija (engl. Shallow Refraction Seismic, SRS) koristi se za precizno mjerenje nailazaka P valova. Seizmički valovi izazivaju se na površini, šire se u podzemlje te se odbijaju (refraktiraju) na granici slojeva koji imaju različite seizmičke brzine. Odbijene seizmičke valove registrira niz geofona koji su raspoređeni na površini duž refrakcijskog profila. Metoda se uspješno koristi kod determinacije litologije, čvrstoće geomedija, razine podzemne vode i lokacija oslabljenih zona.

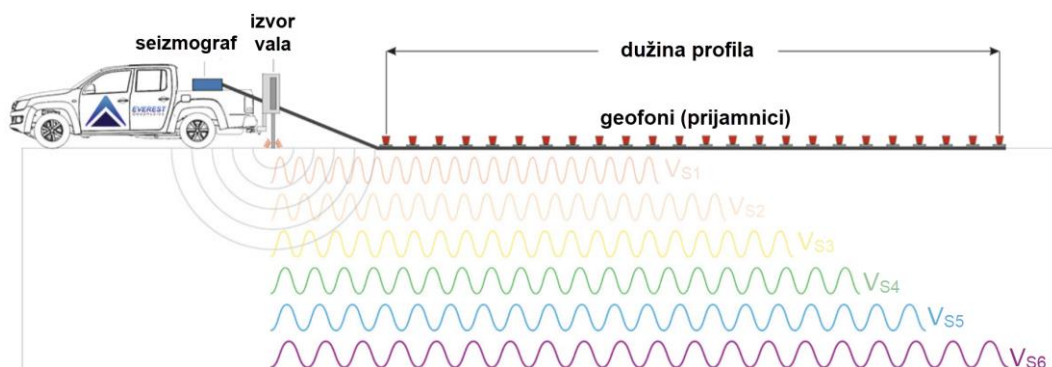
3.2.2. Višekanalna analiza površinskih valova

Prostorni (P i S) valovi šire se u homogenom, izotropnom i beskonačnom mediju. Izvor seizmičkih valova na površini je čekić ili pad utega. Kada ti valovi dođu do granice polubeskonačnog prostora nastaju površinski Rayleighevi (R) valovi. Sastoje se od longitudinalnog gibanja P valova i transverzalnog gibanja S valova s međusobnim pomakom u fazi. Krivulja koja prikazuje odnos fazne brzine i frekvencije naziva se disperzijska krivulja. R valovi preuzimaju najveći dio seizmičke energije, oko 67 % (Telford, 1990). Fazne brzine S valova v_S i R valova v_R povezane su relacijom 3.1.

$$v_S = P \cdot v_R \quad (3.1.)$$

Oznaka P predstavlja konstantu koja ovisi o Poissonovom koeficijentu.

Višekanalna analiza površinskih valova (engl. Multi-Channel Analysis of Surface Waves, MASW) predstavlja metodu kojom se procjenjuje krutost tla na temelju izmjerene brzine posmičnih valova po dubini. Po brzini širenja posmičnih valova razlikuje se granica između kliznog tijela i čvrste podloge (podine). MASW metoda (slika 3.3.) razvila se na već široko primjenjivoj spektralnoj analizi površinskih valova (engl. Spectral Analysis of Surface Waves, SASW). Kod MASW istraživanja, raspored i pozicije geofona nije potrebno mijenjati tj. koristi se višekanalni pristup s 24 prijamnika ili više.



Slika 3.3. Princip MASW metode (prema EVEREST Geophysics)

IZRADA v_S PROFILA

Proces izrade v_S profila sastoji se od tri koraka:

- 1) terensko prikupljanje podataka o površinskim valovima
- 2) obrada podataka i izrada disperzijske krivulje
- 3) inverzija ili izračunavanje brzine S valova iz površinskih R valova.

4. GEOTEHNIČKE METODE ISTRAŽIVANJA NA KLIZIŠTIMA

Svrha geotehničkih metoda (i općenito istražnih radova) je dobivanje uvida u sastav i geotehničke značajke istraživanog terena. Na temelju dobivenih podataka može se definirati klizna ploha i uzroci klizanja. U geotehničkoj praksi postoje mnoge metode istraživanja, kao što su statički konusni penetrometar, pokus plosnatim dilatometrom, dinamičko sondiranje lakom i teškom udarnom sondom, standardni penetracijski pokus, pokus presiometrom te pokus smicanja krilnom sondom. Sva istraživanja provode se in-situ (na licu mjesta) i služe za neposredno mjerenje određenih svojstava tla i stijena. U sljedećim poglavljima opisane su glavne karakteristike i postupci istraživanja metoda koje su korištene kod istraživanja klizišta u Samarici i Petrovskom.

Tijekom provođenja geotehničkih radova, na lokaciji u Samarici izvodilo se i istražno bušenje. Glavni cilj bušenja je dobivanje uzoraka, kako bi se nad njima provela ispitivanja u laboratoriju. Također, bušenje se izvodi za potrebe utvrđivanja debljine, rasporeda i svojstava slojeva tla, te dobivanje uvida o dubini pojavnosti podzemne vode i razini podzemne vode nakon što se ista ustabili. U geotehničkoj praksi najčešće se izvodi rotacijsko bušenje s jezgrovanjem. Tijekom postupka bušenja u jezgrenom cijev ulazi nabušeni materijal. Nabušene jezgre spremaju se u drvene sanduke, pregledavaju i odabiru uzorci koji se predaju na laboratorijska ispitivanja.

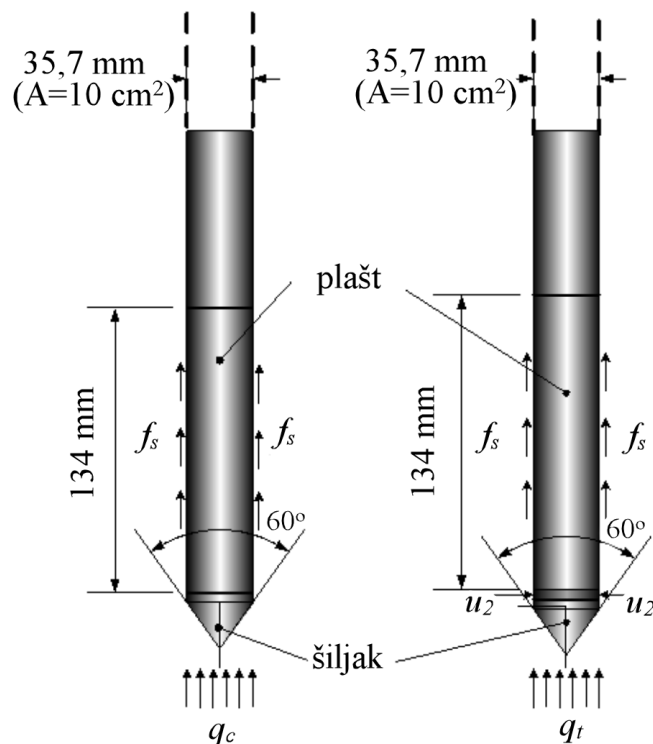
U istražnim bušotinama vrlo često se provodi standardni penetracijski pokus (engl. Standard Penetration Test, SPT) kojim se određuje relativna zbijenost tla. SPT istraživanjem dobiva se broj udaraca potreban da cilindar prodre 30 cm u tlo.

4.1. Statički konusni penetrometar

Moderni pokus statičkim konusnim penetrometrom (engl. Cone Penetration Test, CPT) izvodi se utiskivanjem mjernog penetracijskog konusa (sonde) konstantnom brzinom pomoću potisnih penetracijskih šipki. U Hrvatskoj se CPT pokus provodi prema normi HRN EN ISO 22476-1:2012. Sva oprema i postupci istraživanja moraju biti u skladu s navedenom normom. Velika prednost ovog pokusa je mogućnost istraživanja mekih i rastresitih tala koja je gotovo nemoguće uzorkovati. Interpretacijom CPT-u rezultata moguće je odrediti profil tla, klasifikaciju materijala, mehaničke parametre tla i podložnost likvefakciji.

OPREMA I POSTUPAK ISTRAŽIVANJA

Oprema za CPT istraživanje sastoji se od mjernog konusa (sonde) promjera 37,5 mm, prikazanog na slici 4.1. Nagib konusa prema vrhu sonde je 60° . Površina vrha sonde je 10 cm^2 ili 15 cm^2 , a plašta 150 cm^2 . Zatim uređaja za utiskivanje, šipki za penetraciju ($d = 35,7 \text{ mm}$, $l = 1000 \text{ mm}$), električnog kabela i sistema za prikupljanje podataka (loggera).



Slika 4.1. Mjerni konus (sonda) bez mjerenja pornog tlaka, CPT (lijevo) i s mjerenjem pornog tlaka CPTu (desno) (Szavits-Nossan, 2017)

Prije istraživanja nije potrebno izvesti bušotinu, ali kod pojave kamenog nasipa na površini potrebno je predbušenje. Istraživanje se provodi hidrauličkim utiskivanjem sonde konstantnom brzinom od 2 cm/s . Napredovanje sonde zahtijeva dodatno nastavljanje šipki po $1,0 \text{ m}$. Parametri se mjere tijekom svakih 20 mm napredovanja sonde.

MJERENI PARAMETRI

Tijekom istraživanja standardno se mjere otpor na šiljku sonde (q_c), trenje po plaštu sonde (f_s), nagib pribora (i) i porni tlak (u) na filteru iznad vrha sonde (spomenuta CPTu sonda, slika 4.1.). Može se mjeriti i brzina posmičnih valova (v_s) (SCPT sonda). Tijekom

istraživanja korištena je CPTu sonda pa će svi opisi i priloženi rezultati biti u skladu s time.

Otpor na šiljku (q_c) povezan je s nosivošću tla, a predstavlja ukupnu silu kojom tlo pri prodiranju djeluje na površinu vrha konusa. Kod istraživanja u pijesku, otpor na šiljku je povezan s relativnom zbijenošću (D_r) i efektivnim kutom trenja φ' , a kod glinovitih materijala s nedreniranom posmičnom čvrstoćom (c_U) i naprežanjem prekonsolidacije (σ_p). U glinama i prahovima otpor na šiljku potrebno je korigirati za porni tlak pa se dobiva korigirani otpor na šiljku (q_t). Otpor na šiljku ukazuje na vrstu i stanje tla. Vrijedi da je $q_t > 5 \text{ MPa}$ u pijescima, a u mekanim do srednje krutim glinama je $q_t < 2 \text{ MPa}$.

Trenje na plaštu sonde (f_s) je zapravo posmično naprežanje koje djeluje na površinu plašta. Omjerom trenja na plaštu i korigiranog otpora na šiljku pomnoženim sa 100 % dobiva se koeficijent trenja (R_f). R_f je u čistim pijescima manji od 1 %, a u koherentnim tlima veći od 4 %.

Parametar pornog tlaka (normalizirani porni tlak) B_q koristi se kod klasifikacije tla, procjene nedrenirane posmične čvrstoće, određivanja sadržaja gline i vodopropusnosti. Parametar B_q računa se prema izrazu 4.1.

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (4.1.)$$

Oznake u izrazu su sljedeće:

u_2 - porni tlak izmjeren u poroznom filteru

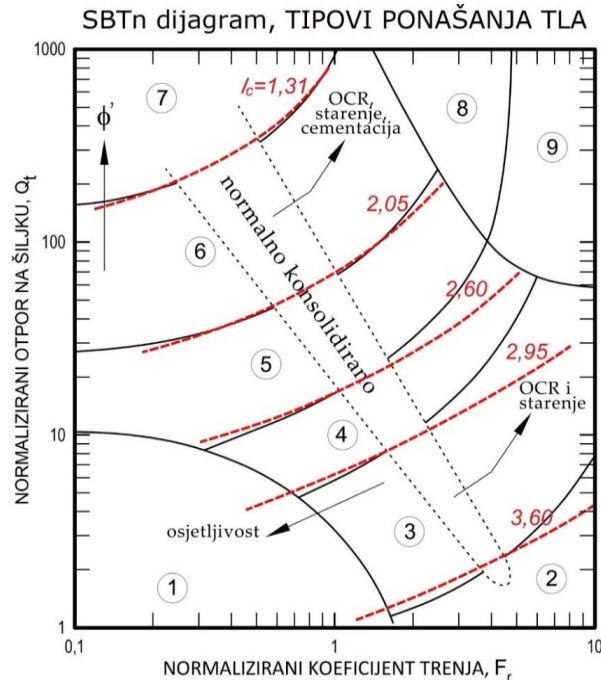
u_0 - hidrostatski tlak

σ_{v0} - totalno naprežanje

KLASIFIKACIJA TLA

Za klasifikaciju tla na temelju rezultata CPT pokusa u današnje vrijeme najčešće se koristi poboljšani SBTn (engl. Normalized Soil Behaviour Type) dijagram prikazan na slici 4.2. (Robertson, 2010). U poboljšanom SBTn dijagramu, za razliku od starijih klasifikacijskih sustava, koriste se normalizirani parametri kod kojih se uzimaju u obzir geološka naprežanja po dubini. Korišteni normalizirani parametri kod prikaza SBTn dijagrama su normalizirani otpor na šiljku Q_t (prikazan na ordinati dijagrama) i normalizirani koeficijent trenja F_r (prikazan na apscisi dijagrama).

Indeks tipa ponašanja (konzistencije) tla I_c predstavlja klasifikacijski parametar u kojem koncentrične crvene linije razdjeljuju područja prema tipu tla (slika 4.2.). Vrijednost $I_c = 2,60$ smatra se granicom između sitnozrnatog tla i krupnozrnatog tla.



Slika 4.2. Dijagram raspodjele zona prema tipu ponašanja tla za normalizirane vrijednosti, SBTn dijagram ($Q_t - F_r$) (prema Robertson, 2010)

Tablica 4.1. Opis materijala unutar zona tla prema tipovima ponašanja definiranih SBTn dijagramom (Robertson, 2010)

| Područje SBTn dijagrama | Tip ponašanja tla | Granice indeksa ponašanja tla, I_c |
|-------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | osjetljiva sitnozrnata tla | nije primjenjivo |
| 2 | organska tla - treset | $> 3,60$ |
| 3 | gline do prašinate gline | 2,95 - 3,60 |
| 4 | prahovi, glinoviti prahovi do prašinate gline | 2,60 - 2,95 |
| 5 | pijesci; prašnasti pijesci do pjeskoviti prahovi | 2,05 - 2,60 |
| 6 | pijesci, čisti pijesci do prašnasti pijesci | 1,31 - 2,05 |
| 7 | šljunkoviti pijesci do pijesci | $< 1,31$ |
| 8 | vrlo zbijeni pijesci do glinoviti pijesci | nije primjenjivo |
| 9 | vrlo kruta sitnozrnata tla | nije primjenjivo |

Indeks tipa ponašanja tla, čiji rasponi su prikazani u Tablica 4.1., računa se prema izrazu 4.2.

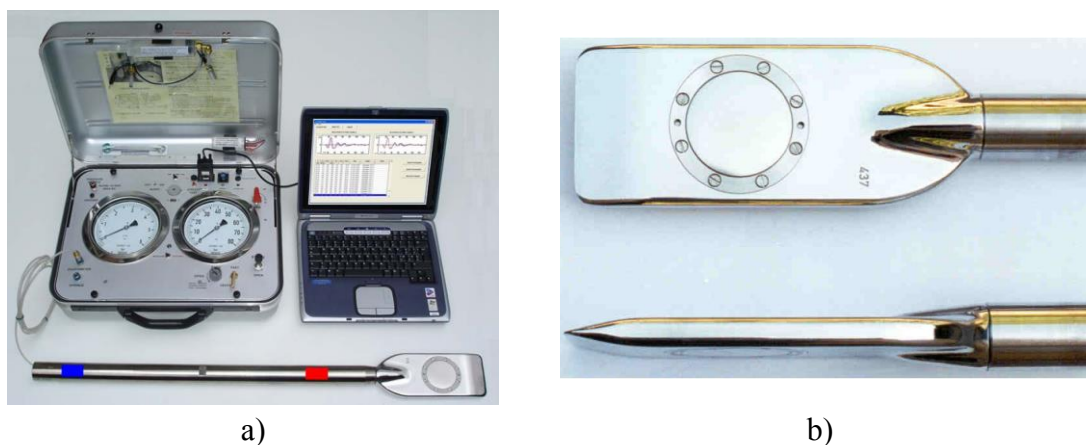
$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2} \quad (4.2.)$$

4.2. Dilatometar

Istraživanje dilatometrom (engl. Flat DilatoMeter Test, DMT) razvio je Silvano Marchetti u Italiji 1980. godine za određivanje čvrstoće i deformacijskih svojstava tla utiskivanjem čelične sonde. Mjerna sonda se zaustavlja na određenim dubinama zbog mjerenja specifičnih tlakova. U Hrvatskoj se ispitivanje provodi prema HRN EN ISO 22476-11:2017 normi, a najčešće se primjenjuje u glinama, prahovima i mekanim stijenama. Za provedbu pokusa nije potrebno izvesti bušotinu. U slučaju izvedene bušotine, sondiranje se tada provodi u neporemećeni dio tla.

OPREMA I POSTUPAK ISTRAŽIVANJA

Glavni dijelovi opreme dilatometarskog pokusa su sonda, uređaji za utiskivanje, utisne šipke i kontrolna jedinica (slika 4.3.). Dilatometarska sonda izrađena je od čelika visoke čvrstoće, a sastoji se od tlačne cijevi s električnim vodičem, kontrolne jedinice za mjerenje tla i boce s dušikom. Sonda je duga oko 240 mm, široka 95 mm, debljine 15 mm i nagiba oštrice oko 18°. Membrana promjena oko 60 mm nalazi se na sondi. Cijev je preko žice povezana s audio alarmom u mjernoj jedinici koji obavještava o specifičnim tlakovima - p_A , p_B i p_C .



Slika 4.3. Oprema za dilatometarsko istraživanje a) i detaljan prikaz sonde b)
(ISSMGE, 2001)

Nakon utiskivanja sonde u tlo do predviđene dubine, istraživanja se provode svakih 200 mm. Kod svakog istraživanja mjere se tlakovi koji odgovaraju deformaciji membrane u tom položaju. Tlak koji je potreban da membrana dođe u ravnotežni položaj tj. u položaj kada pomak iznosi 0 mm, predstavlja očitavanje A (p_A). Tlak kod kojeg se membrana deformira za 1,1 mm predstavlja očitavanje B (p_B), a C očitavanje odgovara tlaku pri kojem se membrana natrag vrati u ravnotežni položaj (p_C). Očitavanja A i B moraju se provesti 15 - 30 s nakon početka istraživanja.

MJERENI PARAMETRI I INTERPRETACIJA

Tlakovi kod očitavanja A i B korigiraju se za efekt krutosti membrane kako bi se dobili tlak podizanja p_0 i tlak ekspanzije p_1 . Kombinacijom dilatometarskih tlakova p_0 i p_1 , vrijednosti in-situ tlaka porne vode u_0 i efektivne vrijednosti vertikalnih napreznja σ'_{v0} , dobivaju se vrijednosti indeksa materijala I_D , indeksa horizontalnog napreznja K_D i dilatometarskog modula E_D (mjereni parametri). Primjenom indeksa materijala I_D provodi se klasifikacija tla, a računa se prema izrazu 4.3.

$$I_D = \frac{(p_1 - p_0)}{(p_0 - u_0)} \quad (4.3.)$$

Na temelju indeksa materijala tlo se klasificira u grupe i podgrupe (Marchetti i dr. 2001) kako je prikazano u tablici 4.2.

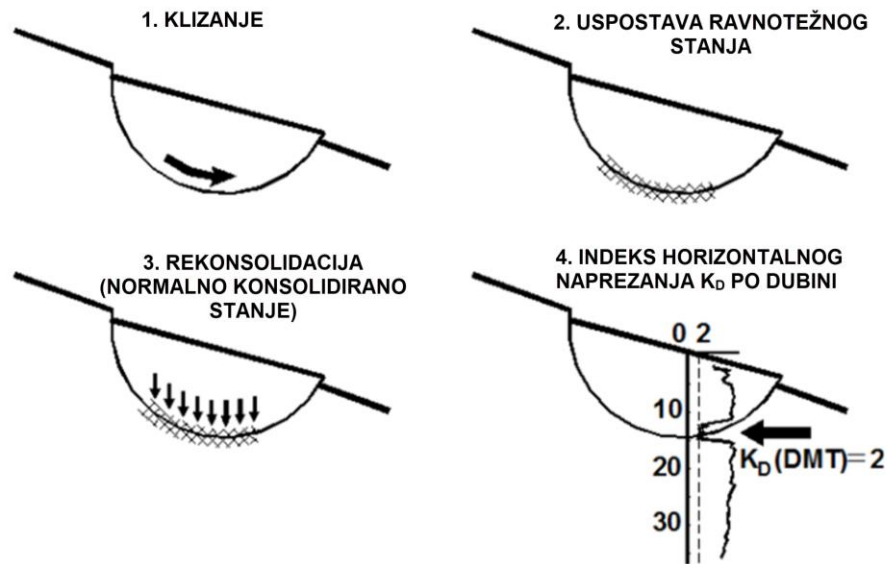
Tablica 4.2. Klasifikacija tla na temelju indeksa materijala I_D (prema Marchetti i dr. 2001)

| Grupa | Podgrupa | Indeks materijala I_D |
|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| glinoviti materijali | prašinate gline | $I_D < 0,6$ |
| | | $0,35 < I_D < 0,6$ |
| prahoviti materijali | glinoviti prah pjeskoviti prah | $0,6 < I_D < 1,8$ |
| | | $0,6 < I_D < 0,9$ |
| | | $1,2 < I_D < 1,8$ |
| pjeskoviti materijali | prašinski pijesci | $I_D > 1,8$ |
| | | $1,8 < I_D < 3,3$ |

Indeks horizontalnog napreznja K_D povezan je s in-situ horizontalnim napreznjem tla. Kod klizišta ukazuje na pregnječeni sloj koji odgovara kliznoj plohi, pri čemu je

vrijednosti $K_D = 1,8 - 2$. Slika 4.4. prikazuje primjer detektiranja klizne plohe po dubini. Na dubini na kojoj je došlo do klizanja tla vrijednost indeksa K_D iznosi 2, kao što je prikazano na profilu na donjoj desnoj slici. Indeks K_D računa se prema izrazu 4.4.

$$K_D = \frac{(p_0 - u_0)}{\sigma'_{v0}} \quad (4.4.)$$



Slika 4.4. Detektiranje klizne plohe na temelju indeksa K_D (prema Totani i dr., 1997)

Dilatometarski modul E_D , koji se računa prema izrazu 4.5., ukazuje na stišljivost tla.

$$E_D = 34,7 \cdot (p_1 - p_0) \quad (4.5.)$$

Korelacija indeksa horizontalnog naprezanja s parametrom bočnog mirnog tlaka K_0 definirana je izrazom 4.6.

$$K_0 = \left(\frac{K_D}{1,5} \right)^{0,47} - 0,6 \quad (4.6.)$$

U cementiranim prekonsolidiranim glinama izračunati K_0 može imati veću vrijednost jer cementacija utječe na parametar K_D .

Od početka primjene dilatometarskog pokusa uočena je sličnost indeksa horizontalnog naprezanja K_D sa koeficijentom prekonsolidacije OCR (Špiranec i dr., 2016). Kod normalno konsolidiranih materija vrijednost $K_D = 2$, odgovara vrijednosti $OCR = 1$.

Navedena korelacija pokazuje da je pregnečeni materijal unutar klizne plohe izgubio svaki trag o starenju, strukturiranju ili cementaciji. Korelacija između K_D i OCR definirana je izrazom 4.7.

$$OCR = (0,5 \cdot K_D)^{1,56} \quad (4.7.)$$

Nedrenirana posmična čvrstoća može se izračunati na temelju dvije korelacije od dva različita autora. Marchetti (1980) daje sljedeću formulu (izraz 4.8.) za proračun nedrenirane posmične čvrstoće.

$$c_U = 0,22 \cdot \sigma'_{v0} \cdot (0,5K_D)^{1,2} \quad (4.8.)$$

Prema Schmertmann-u (1991) izraz za nedreniranu posmičnu čvrstoću je definiran izrazom 4.9.

$$c_U = \frac{p_0 - u_0}{10} \quad (4.9.)$$

Na temelju različitih korelacija iz dilatometarskog istraživanja moguće je još odrediti vrijednost kuta trenja tla Φ , tangentnog modula stišljivosti M i dr.

4.3. Teška i laka udarna sonda

Istraživanja lakom udarnom sondom (engl. Dynamic Probing Light, DPL) i teškom udarnom sondom (engl. Dynamic Probing Heavy, DPH) provode se u svrhu određivanja debljine slojeva tla, stupnja zbijenosti za nekoherentna tla ili konzistencije za koherentna tla, parametara čvrstoće i deformabilnosti tla. Navedena istraživanja najčešće se koriste u kombinaciji s istražnim bušenjem i SPT pokusom (Strelec i dr., 2016) kako bi se odredio profil tla. Istraživanja se u Hrvatskoj provode u skladu s normom HRN EN ISO 22476-2:2008. Razlika između istraživanja teške i lake udarne sonde je prvenstveno u masi utega, masi sonde i šipki, radijusu šipki i površini sonde.

Osnovni princip teškog i lakog sondiranja je zabijanje sonde u tlo utegom standardne mase koji pada sa standardne visine, pri čemu se mjeri potreban broj udaraca da se sonda utisne u tlo 10 cm. Torzijski moment potreban da se okrene šipka tj. da se svlada otpor

trenju mjeri se na kraju svake utisnute standardizirane šipke. Na temelju torzijskog momenta određuje se indikacija o komponenti trenja šipki i utjecaj te komponente na dinamički otpor tla prodiranju sonde. Dinamički otpor tla prodiranju sonde računa se prema izrazu 4.10. (Coppe, 2011).

$$R_D = \frac{g}{A} \left[\left(\frac{M^2}{M + M'} \right) \cdot \frac{h}{0,1} \cdot N_{10} + (M + M') \right] - \frac{T}{A \cdot r} \quad (4.10.)$$

Oznake u izrazu 4.10. su sljedeće:

R_D - dinamički otpor prodiranju sonde

G - gravitacijska konstanta

M - masa utega (50 kg za DPH, 10 kg za DPL)

M' - masa sonde i šipki (4,8 kg za DPH, 3 kg za DPL)

h - visina pada utega (50 cm)

N_{10} - broj udaraca potreban da se sonda utisne u tlo 10 cm

T - torzijski moment potreban za rotaciju šipke

A - površina sonde (15 cm² za DPH, 10 cm² za DPL)

r - radijus šipki (32 mm za DPH, 22 mm za DPL)

U nekoherentnim tlima otpor prodiranju sonde je manji (manje vertikalno naprezanje) ispod razine podzemne vode nego iznad. Kod koherentnih tla trenje duž šipki utječe na otpornost prodiranju sonde pa otpornost raste po dubini. Istraživanje se provodi brzinom 15 do 30 udaraca u minuti, ako je moguće bez zaustavljanja. Brzina zabijanja sonde ima minimalni utjecaj u pijesku i šljunku, ali utječe na rezultate kod istraživanja u naslagama gline i praha.

5. PRIMJER IMPLEMENTACIJE TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA

Terenski istražni radovi provode se u svrhu dobivanja uvida u sastav i značajke tla, identifikaciju površine klizišta na istraživanom području te za potrebe izrade elaborata. Istražni radovi provedeni su na cestovnom klizištu u Samarici i klizištu u Petrovskom. Kod predmetnih klizišta, implementacijom geotehničkih i geofizičkih istraživanja utvrdio se litološki sastav sedimenata, položaj i veličina klizišta, dubina klizne plohe te uzroci

klizanja. Geotehnički istražni radovi uključuju bušenje s jezgrovanjem (kod klizišta u Samarici) CPTu, DMT, DPL i DPH istraživanje. Korištene geofizičke metode obuhvaćale su ERT, MASW i SRS snimanje. Kod istraživanja klizišta kombinacijom različitih geofizičkih i geotehničkih metoda dobivaju se najprecizniji rezultati koji služe za određivanje 2D modela klizišta.

Cestovno klizište Samarica nalazi se na koridoru lokalne ceste LC37069 u Bjelovarsko-bilogorskoj županiji. Klizište ugrožava kolnik lokalne ceste.

Klizište Petrovsko nalazi se u mjestu Slatina Svedruška (Krapinsko-zagorska županija) na udaljenosti 18 m od državne ceste D206. Navedena nestabilnost potencijalno ugrožava koridor državne ceste D206.

5.1. Metodologija istraživanja

Položaj istražnih radova na klizištu u Samarici prikazan je na detaljnom situacijskom planu istraživanja u Prilogu 1., a na klizištu u Petrovskom u Prilogu 2.

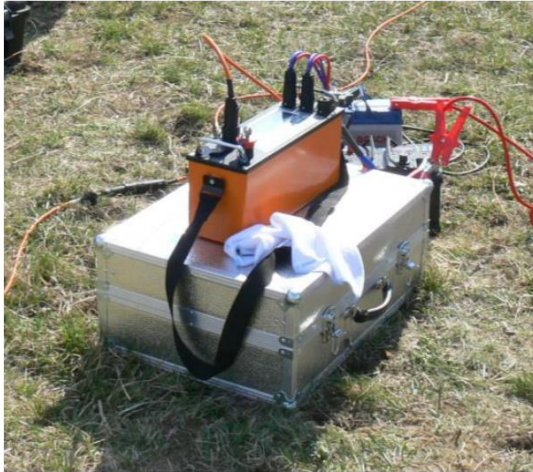
5.1.1. Inženjersko-geološka prospekcija terena

Inženjersko geološka prospekcija terena provedena je na klizištima u sklopu terenskih istraživanja. Inženjersko-geološkom prospekcijom prikupljeni su svi postojeći geološki podaci. Registrirani su inženjersko-geološki elementi vidljivi na površini, kao što su morfološka obilježja terena, litološki sastav stijene u podlozi, orijentacija diskontinuiteta u zasjecima, značajke pokrivača osnovne stijene i dr.

5.1.2. Geofizička istraživanja

ERT istraživanje

Snimanje ERT profila izvedeno je uređajem ARES odgovarajućih karakteristika (slika 5.1.), Češkog proizvođača GF Instruments. Uređajem ARES mjere se električne otpornosti te inducirani i vlastiti potencijal. Sastoji se od upravljačke jedinice, kabela s aktivnim selektorom elektroda i samih elektroda. Kod snimanja korišten je Wennerov mjerni raspored s dvije strujne i dvije potencijalne elektrode.



| Odašiljač: | | |
|--------------------------------|----------------------------------------------------|------|
| Snaga: | do 850 | W |
| Struja: | do 5.0 | A |
| Strujna rezolucija | 24 | bits |
| Napon: | 2000 V _{p-p} | |
| Zaštita: | elektronička | |
| Prijamnik: | | |
| Ulazni nivo napona | ±5 V _{p-p} (±10 V _{p-p} dodatno) | |
| Naponska rezolucija | 24 | bits |
| Ulazna impedancija | 20 | MΩ |
| Mrežna frekvencija filtriranja | 50 or 60 Hz odabir filtra | |

Slika 5.1. Uređaj ARES za geoelektrična istraživanja

Prilikom istraživanja klizišta Samarica snimljen je jedan ERT profil duljine 182,9 m s razmakom elektroda 5,9 m. Profil se protezao duž osi tijela klizišta s ciljem dobivanja što više detaljnih podataka o sastavu tla u području klizne plohe.

Na klizištu Petrovsko snimljena su dva ERT profila, ERT-1 duljine 182,9 m i ERT-2 duljine 135,7 m (razmak elektroda 5,9 m).

MASW i SRS istraživanje

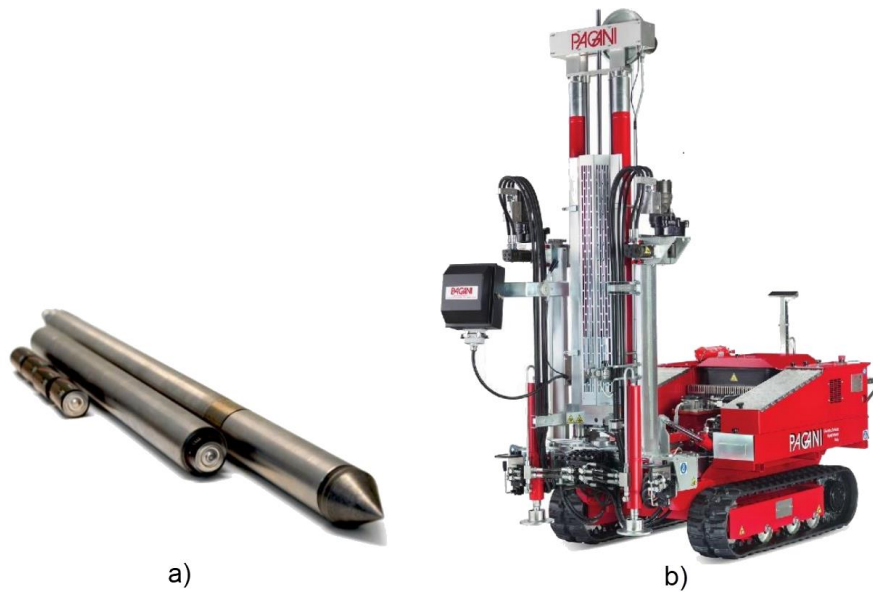
MASW snimanje provedeno je dispozitivom koji se sastojao od 24 vertikalna geofona postavljenih na razmaku od 3,0 m, frekvencije 4,5 Hz.

Prilikom istraživanja klizišta Samarica provedeno je snimanje jednog seizmičkog MASW profila, a kod klizišta Petrovsko jednog profila SRS/MASW dužine dispozitiva L=55,0 m.

5.1.3. Geotehnička istraživanja

CPTu istraživanje

Istraživanje je provedeno uređajem tipa Pagani TG 63-150. prikazanom na slici 5.2.b., utiskivanjem CPTu sonde (slika 5.2.a) konstantnom brzinom od 2 cm/s.



Slika 5.2. a) izgled CPTu konusa, b) hidraulički stroj za utiskivanje, tip: Pagani

Tijekom geotehničkih istražnih radova na klizištu Samarica izvedena su dva CPTu sondiranja, a kod klizišta Petrovsko jedno CPTu sondiranje.

DMT istraživanje

Sondiranje dilatometrom tipa Marchetti (prikazanom na slici 4.3. u poglavlju 4.2.) provedeno je na jednoj lokaciji prilikom detektiranja klizne plohe u Samarici. Tijekom istražnih radova u području klizišta Petrovsko DMT sondiranje se nije izvodilo.

Dinamičko sondiranje DPH i DPL

DPH sondiranje izvedeno je na jednoj lokaciji kod klizišta Samarica. DPL istraživanje se na navedenom klizištu nije provodilo.

Prilikom istraživanja klizišta Petrovsko provedeno je šest sondiranja lakom udarnom sondom (DPL), dok se DPH sondiranje nije provodilo.

Istražno bušenje i laboratorijska ispitivanja

Na klizištu Samarica izvedeno je šest geomehaničko-istražnih bušotina do dubine 15 m. Bušotine B-1, B-2 i B-3 izvedene su neposredno uz čelo klizišta koristeći kamionsku bušaću garnituru CLIVIO. Bušenje bušotina izvedeno je motornom rotacijskom bušilicom uz kontinuirano jezgrovanje. Ostale tri bušotine (B-4, B-5 i B-6) izbušene su na glavnom tijelu klizišta, a zbog nepristupačnosti terena izvedene su ručnim bušenjem

(nema jezgre, bušenje sa spiralom). U bušotinama je provedeno istraživanje relativne zbijenosti tla standardnim penetracijskim pokusom (SPT). Po završetku bušenja provedena je terenska identifikacija i USCS klasifikacija nabušene jezgre.

Iz geomehaničkih istražnih bušotina uzeti su poremećeni i neporemećeni uzorci za laboratorijsko ispitivanje. Laboratorijskim ispitivanjima odredila su se mehanička i fizikalna svojstva tla kao što su jednoosna tlačna čvrstoća q_c , jedinična težina tla γ , koeficijent vodopropusnosti k , granica tečenja w_L , granica plastičnosti w_P , kohezija c , kut unutrašnjeg trenja φ i modul stišljivosti M_S . Određivanje kohezije i kuta unutrašnjeg trenja provedeno je u uređaju za direktno smicanje, a modula stišljivosti u edometru.

Kod klizišta Petrovsko geomehaničko-istražno bušenje nije se izvodilo.

5.1.4. Proračun stabilnosti kosine prema metodi Bishopa

Analiza stabilnosti kosine provodila se prema metodi Bishopa. Analizom se odredio faktor sigurnosti protiv klizanja (F_s) koji se definira kao odnos momenta otpora klizanja (M_o) i momenta aktivnih sila (M_a) oko potencijalnog polja rotacije promatranog kliznog tijela. Analiza stabilnosti zasniva se na pretpostavci da se radi o ravninskom problemu pa se zanemario utjecaj promjene geometrije i značajki materijala u smjeru okomitom na promatranu ravninu. Odnos normalnog napona i posmične čvrstoće na plohi sloma definiran je Mohr-Coulombovim zakonom.

5.2. Rezultati istraživanja i interpretacija

U nastavku prikazani su rezultati i interpretacija rezultata istraživanja na području klizišta Samarica i Petrovsko. Rezultati će biti prikazani po vrsti istraživanja paralelno za oba klizišta.

5.3. Vizualna identifikacija klizišta

Klizište Samarica

U klizištu Samarica klizanjem je zahvaćeni dio kolnika u dužini 35 m sa jasno formiranom vlačnom pukotinom i skokom u čeonom dijelu (slika 5.3.). Pregledom

klizišta utvrđeno je da se radi o većem klizištu (površine oko 20000 m²) od dijela koji zahvaća prometnicu. Od ostalih obilježja vidljive su radijalne pukotine u stopi, najahivanje u stopi, ispupčenja i uvala ispunjena vodom. Na cestovnom dijelu klizišta vidljivi su i ostaci pokušaja sanacije pobijanim drvenim pilotima i nasutim kamenim materijalom.



Slika 5.3. Prikaz dijela klizišta u Samarici (čeoni dio zahvatio cestu)

Klizište Petrovsko

Klizište Petrovsko (slika 5.4.) je ukupne površine 5000 m² i ima jasno izražene elemente klizanja: čelo sa vlačnom pukotinom i skokom visine do $h = 2,5$ m (slika 5.4.) te materijal naguran u nožici. Prema vrsti klizanja, klizište je rotacijsko-translacijsko. Premještene mase odgovaraju volumenu oko 2000 m³, a ukupni pomak iznosi oko 10 m. Vlačna pukotina može se pratiti u dužini 150 m. Klizište je razvedenog oblika, a kretanje masa događa se po putanjama od 30 do 60 m. Manifestirano klizište ugrožava koridor državne ceste D206. Zanimljiva činjenica je da je klizište zahvatilo i rubni dio šumskog terena na dijelu oko 30 m. Klizište je približno smješteno usred kontinuirane padine, jednako udaljeno od vrha i nožice.



Slika 5.4. Klizište Petrovsko s prikazom vlačne pukotine

5.3.1. Litološke značajke lokacija

Klizište Samarica

Lokaciju grade pleistocenske naslage, a zastupljene su glinovitim siltom s proslojcima organske komponente.

Klizište Petrovsko

Lokacija klizišta Petrovsko nalazi se na području kojeg izgrađuju naslage gornjeg miocena sarmatskog kata. Na ovom području zastupljeni su klastiti, od kojih dominiraju lapori, laporoviti vapnenci, glinoviti lapori, pijesci i pješčenjaci. Konglomerati i pješčenjaci nalaze se u bazi ovog slijeda naslaga. Boja klastita je sivo-žuta i zelena. Na užoj lokaciji zastupljeni su u podlozi pjeskoviti lapori i pjeskovite gline.

5.3.2. ERT istraživanje

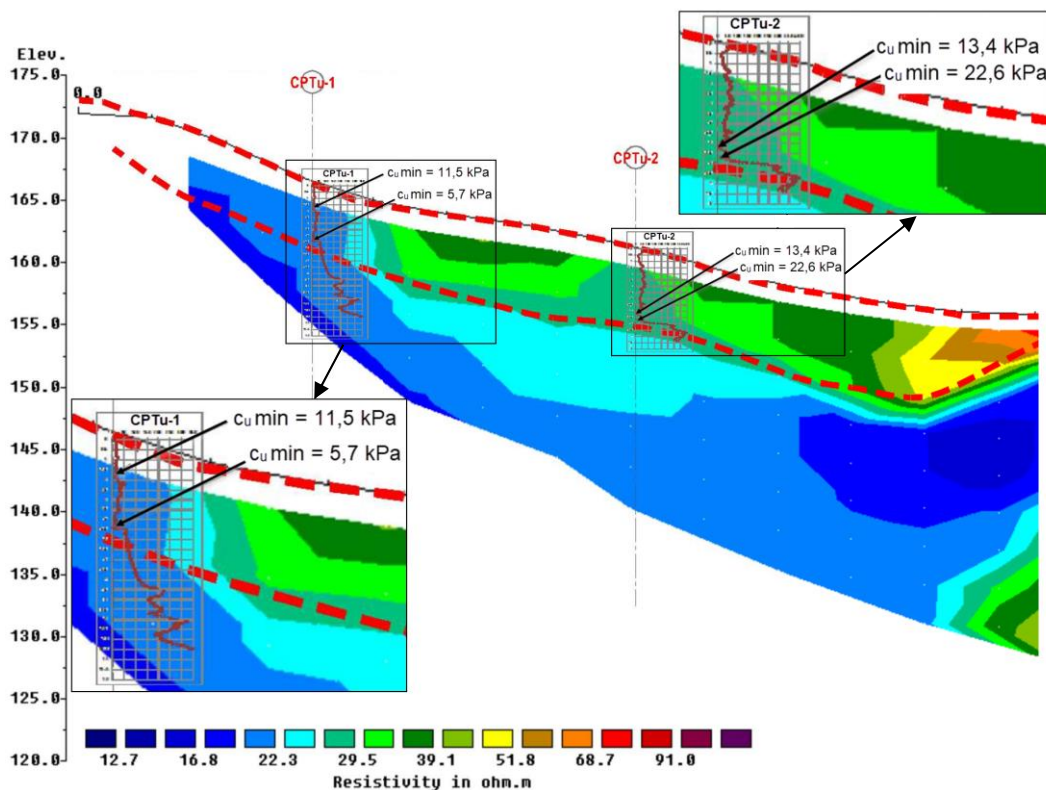
Rezultati ERT istraživanja prikazuju se kao grafički prikaz profila otpornosti s dubinom. Grafički profil može se prikazati u boji (najčešće) ili u crno-bijelome prikazu, gdje različite boje prema legendi prikazuju zone različitih električnih otpornosti. Trapezasti oblik grafičkog prikaza, u kojem se sa udaljenošću od središta profila smanjuje

dubina interpretacije, dobiva se zbog smanjivanja prikupljenih podataka (povećanje razmaka između strujnih i potencijalnih elektroda).

Kod određivanja karakterističnih vrijednosti električnog otpora za različite zone ili slojeve potrebno je provesti inverziju izmjerenih vrijednosti prividnog otpora. Inverzija je provedena korištenjem softvera RES2DINV, na temelju metode najmanjeg kvadrata koju je predložio Loke (1997).

Klizište Samarica

Na temelju detaljnog geoelektričnog ERT profila prikazanog u Prilogu 3. (na slici 5.5. prikazan je dio ERT profila s kliznom plohom), tlo je prema vrijednostima električne otpornosti klasificirano u kategorije kako je prikazano u tablici 5.1. Vrijednosti električnog otpora niže od $30 \Omega\text{m}$ u dubljim dijelovima profila ukazuju na gline manje propusnosti koje tvore osnovno tlo (čvrstu podinu). Neposredno iznad nalazi se klizno tijelo kojeg čine muljevite, slabo propusne zasićene gline električnog otpora 30 do $50 \Omega\text{m}$. Na dubljim dijelovima (desna strana profila) pojavljuju se muljevito-pjeskovite gline s rastućim vrijednostima električnog otpora ($50\text{-}100 \Omega\text{m}$), adekvatne povećanju sadržaja pijeska i većoj propusnosti.



Slika 5.5. Preklap geoelektričnog profila ERT-1 s CPTu-1 i CPT-2 sondama - klizišta Samarica

Tablica 5.1. Kategorije tla na temelju električne otpornosti - klizište Samarica

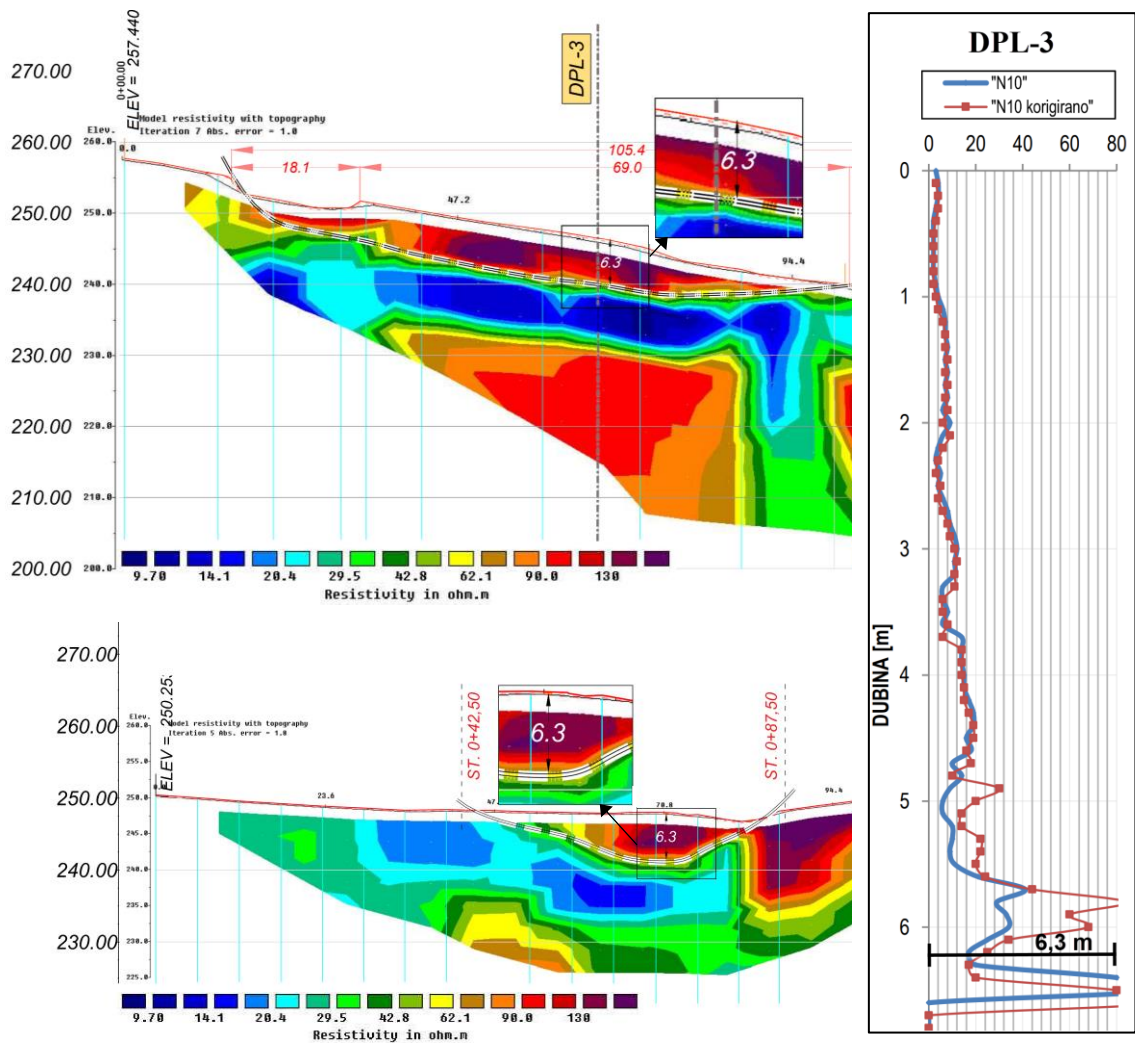
| Električna otpornost | Kategorija tla | Hidrauličke karakteristike |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| < 30 Ωm | gline (osnovno tlo) | slabo propusno |
| 30 - 50 Ωm | prašinate gline/ klizno tijelo | slabo propusno |
| 50 - 100 Ωm | prašinski materijali kojima s povećanjem otpornosti u zadanom intervalu raste udio pijeska | slabo do srednje propusno (promjenjivo) |

Na slici 5.5. crvenom crtkanom linijom označena je klizna ploha kojoj odgovaraju povećane vrijednosti električne otpornosti. Dubina klizne plohe identificirana ERT profilom poklopila se s rezultatima CPTu istraživanja. Minimalne vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće dobivene CPTu sondama ukazuju na kliznu plohu

Klizište Petrovsko

Slika 5.6. prikazuje dijelove geoelektričnih profila ERT-1 i ERT-2 s kliznom plohom. Njihov detaljan prikaz u cijeloj dužini nalazi se u Prilogu 4. Iz profila je vidljivo da se klizna ploha (crtkana bijelo-crna linija) formirala unutar glinovitih materijala prema podini pjeskovitih lapora. ERT-1 profil postavljen je uzdužno na kliznu plohu, a ERT-1 poprečno. Na području sjecišta profila, prikazanom na detaljnom situacijskom planu u Prilogu 2, detektirana je klizna ploha dubine 6,3 m (slika 5.6.). Dubina klizne plohe preklapa se s rezultatima DPL-3 sonde. Na temelju rezultata DPL-3 sonde na dubini većoj od 6,3 m, dolazi do naglog povećanja broja udaraca potrebnih za prodor sonde što ukazuje na čvrstu podinu.

Iz provedenih istraživanja ne može se odrediti točna granica između krovine glina i podloge laporovitih glina i lapora. Razlog tome je što ovi materijali mogu imati slične vrijednosti električne otpornosti pa ih nije moguće detaljno razlučiti unutar profila električne otpornosti. Tablica 5.2. daje klasifikaciju tla u kategorije na temelju vrijednosti električne otpornosti.



Slika 5.6. Preklap geoelektričnih profila ERT-1 i ERT-2 i rezultata DPL-3 sonde - klizište Petrovsko

Tablica 5.2. Kategorije tla na temelju električne otpornosti - klizište Petrovsko

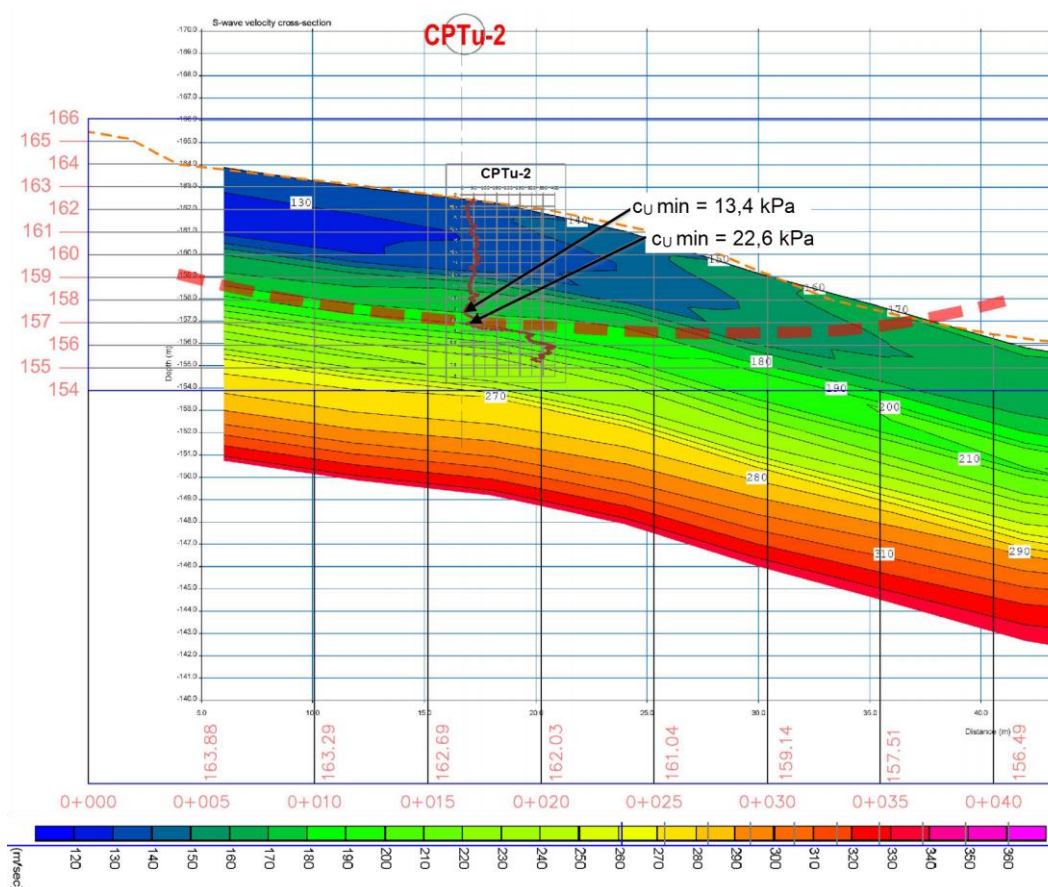
| Električna otpornost | Kategorija tla | Hidrauličke karakteristike k - koeficijent filtracije [m/s] |
|----------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| < 30 Ωm | gline, laporovite gline i lapori | slabo propusne / nepropusne gline (k = 10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁹) |
| 30 - 60 Ωm | zaglinjeni prah do pjeskoviti siltovi | djelomično propusno (k = 10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁷) |
| 80 - 250 Ωm | pijesci, pješčenjaci, laporoviti pijesci | djelomično nepropusno (k = 10 ⁻⁸ - 10 ⁻¹²) |

5.3.3. MASW i SRS istraživanje

Kod interpretacije MASW-1 istraživanja koristi se fundamentalni ili osnovni mod M_0 . Dobiveni rezultati interpretirani su računalnom aplikacijom SeisIMAGER 4.0.1.6., OYO Corporation 2004-2009.

Klizište Samarica

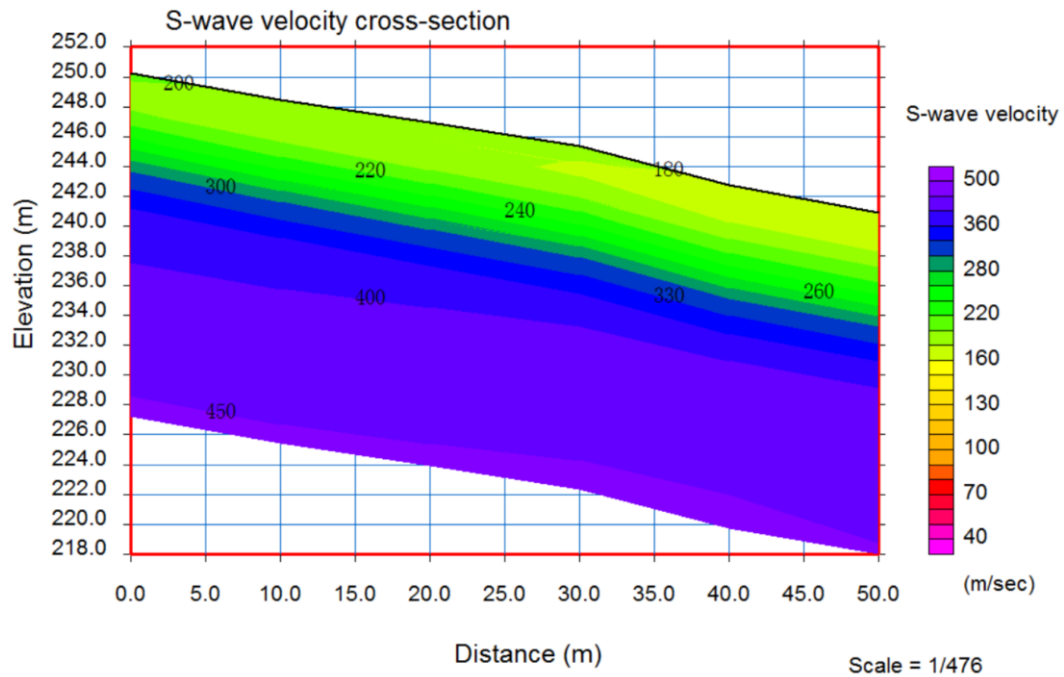
Seizmički MASW-1 profil, koji prikazuje brzine seizmičkih valova v_s po dubini dan je na slici 5.7., a detaljan profil nalazi se u Prilogu 5. Crvena crtkana linija predstavlja kliznu plohu kojoj odgovaraju povećane vrijednosti brzine posmičnih valova u odnosu na klizno tijelo. Kao i u slučaju rezultata ERT istraživanja, dubina klizne plohe dobivena MASW-1 profilom poklopila se sa rezultatima CPTu-2 sonde (male vrijednosti posmične nedrenirane čvrstoće). Brzine v_s valova izmjerene MASW-om, također se poklapaju s v_s brzinama izmjerim CPTu-2 sondom.



Slika 5.7. Preklap MASW-1 profila i CPTu-2 sonde - klizište Samarica

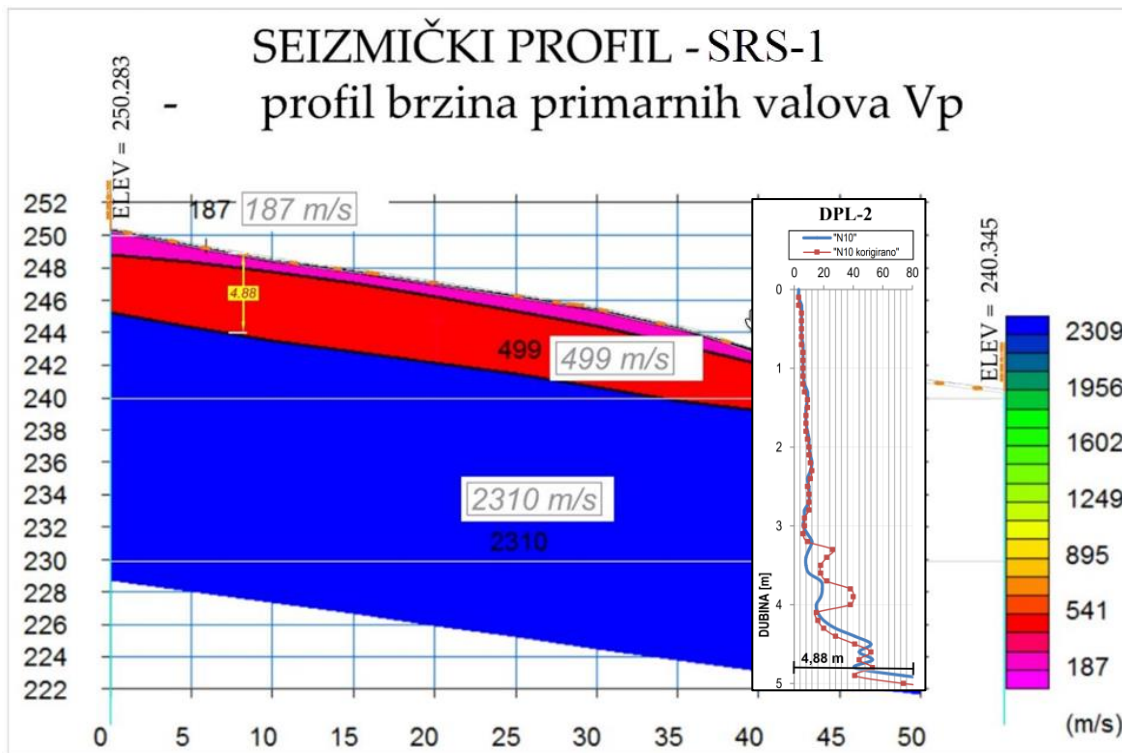
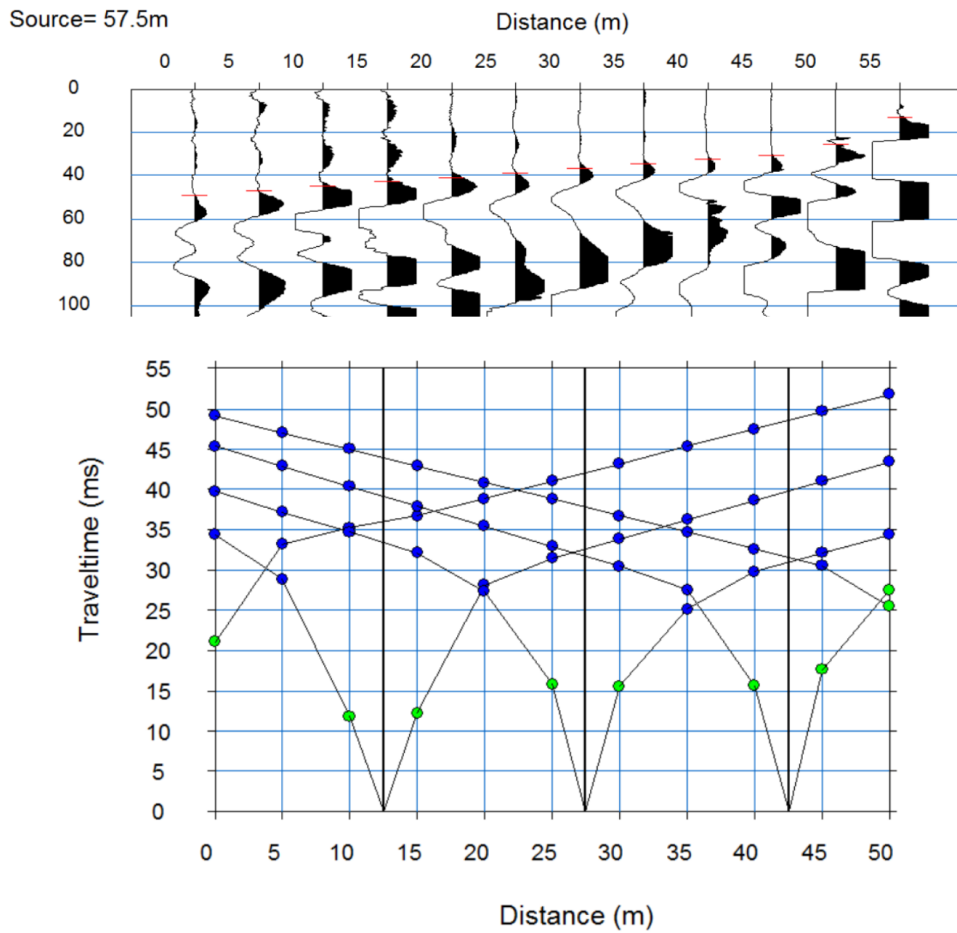
Klizište Petrovsko

Slika 5.8. prikazuje rezultat interpretacije MASW-1 2D profila brzine posmičnih valova v_s po dubini. Interpretacija MASW istraživanja ukazuje da površinski sedimenti do dubine oko 6,0 m imaju brzine posmičnih valova v_s između 180 i 220 m/s. Povećanjem dubine naglo se povećava krutost materijala. Brzina posmičnih valova na dubini većoj od 6,0 m prelazi 300 m/s (čvrsta podina).



Slika 5.8. Seizmički MASW-1 profil - klizište Petrovsko

Na slici 5.9. prikazana je snimka nailazaka valova na geofone (prva slika), obrada i interpretacija vremena nailazaka (druga slika) i SRS-1 profil brzine P valova po dubini (treća slika). Dubina klizne plohe od 4,88 m detektirana SRS-1 profilom, poklopila se sa dubinom dobivenom DPL-2 sondom. Na toj dubini dolazi do naglog povećanja broja udaraca potrebnih za prodiranje sonde (čvrsta podina).



Slika 5.9. Preklop SRS-1 profila s rezultatima DPL-2 sonde - klizište Petrovsko

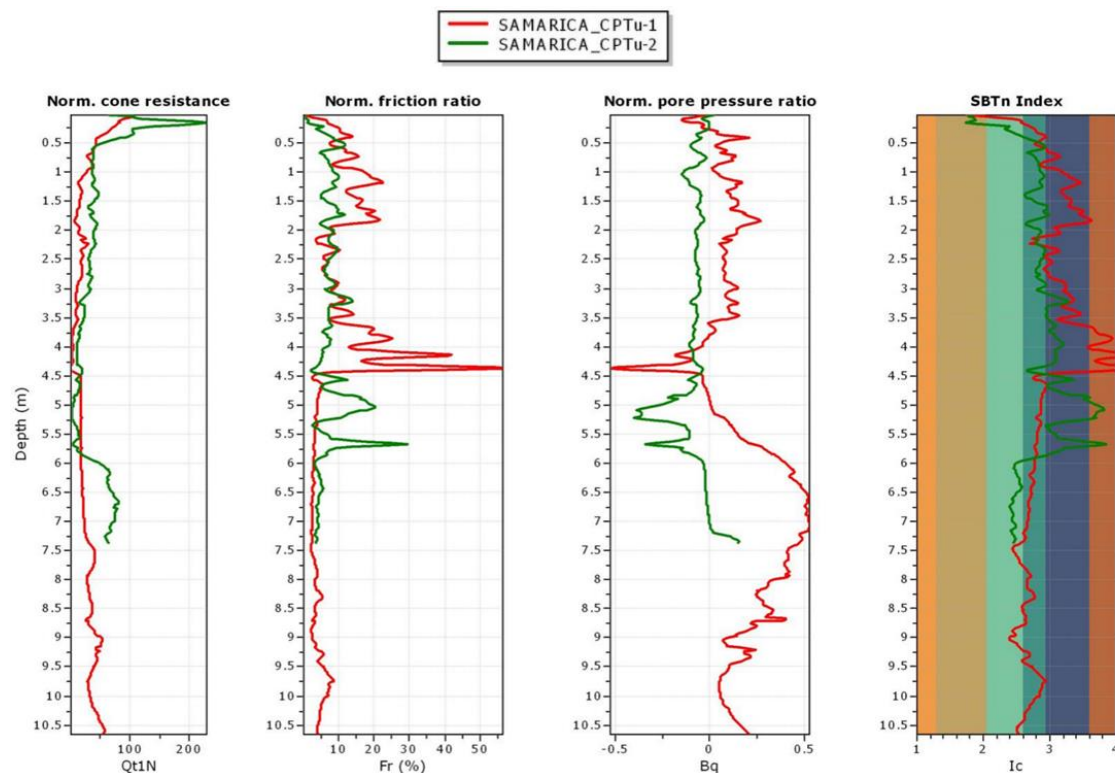
5.3.4. CPTu istraživanje

Interpretacija izmjerenih podataka dobivenih CPTu sondiranjem provedena je programom CpeT-IT v.3.3.2.17 (2007), GeoLogismiki. Na temelju CPTu podataka program provodi interpretaciju u skladu s tipom ponašanja tla (SBTn) i različitim geotehničkim parametrima, a sve na osnovi objavljenih empiričkih korelacija prema Lunne, Robertson i Powell (1997).

Prikazanu interpretaciju treba uzeti kao smjernicu za geotehničku upotrebu, no potrebna je kontrola dobivenih podataka. Mnoge empiričke korelacije kojima se procjenjuju geotehnički parametri sadrže konstante koje imaju širok raspon ovisno o vrsti tla, geološkim karakteristikama i drugim faktorima. Interpretacija je provedena primjenom konzervativnih vrijednosti navedenih konstanti s ciljem osiguranja nižih i konzervativnih ocjena geotehničkih parametara.

Klizište Samarica

Rezultati istraživanja CPTu-1 i CPTu-2 sonde prikazani su na slici 5.10. i u Prilogu 6.

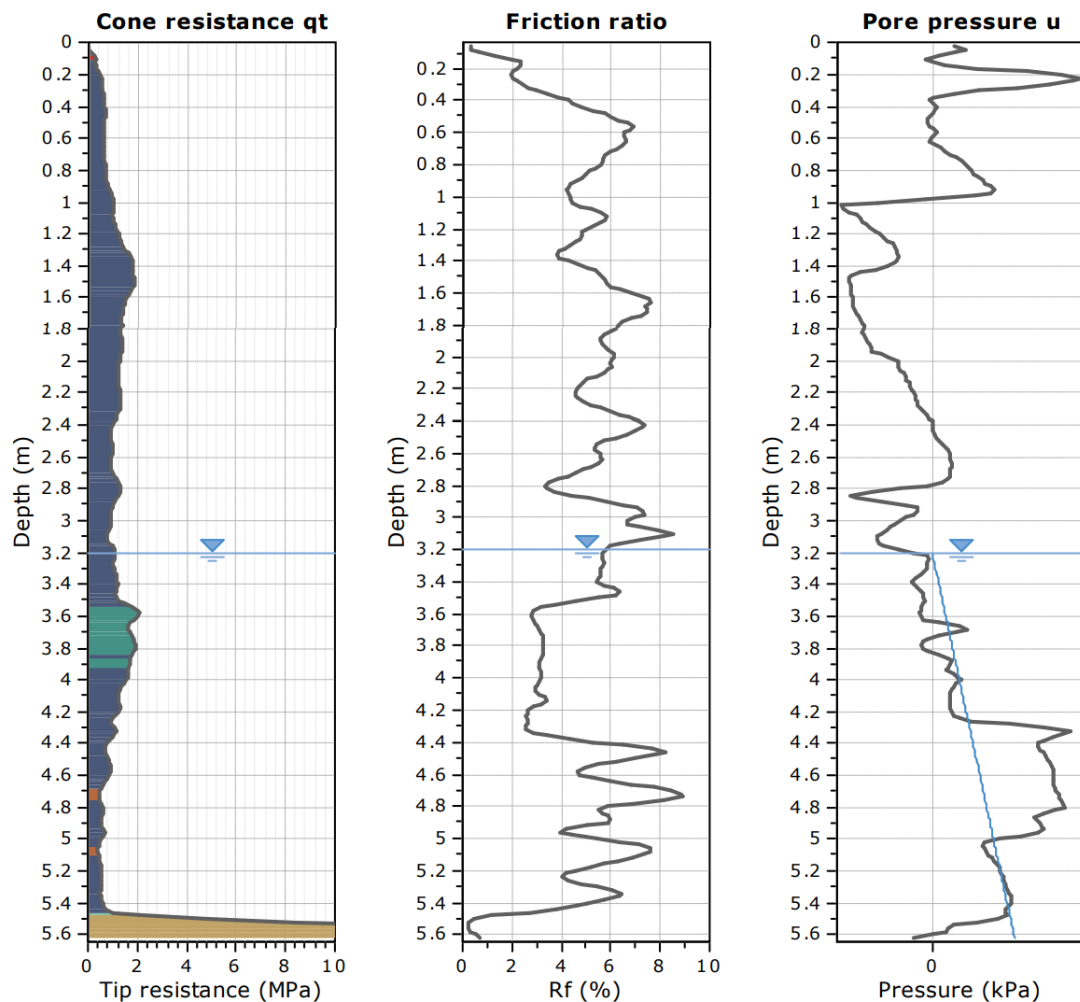


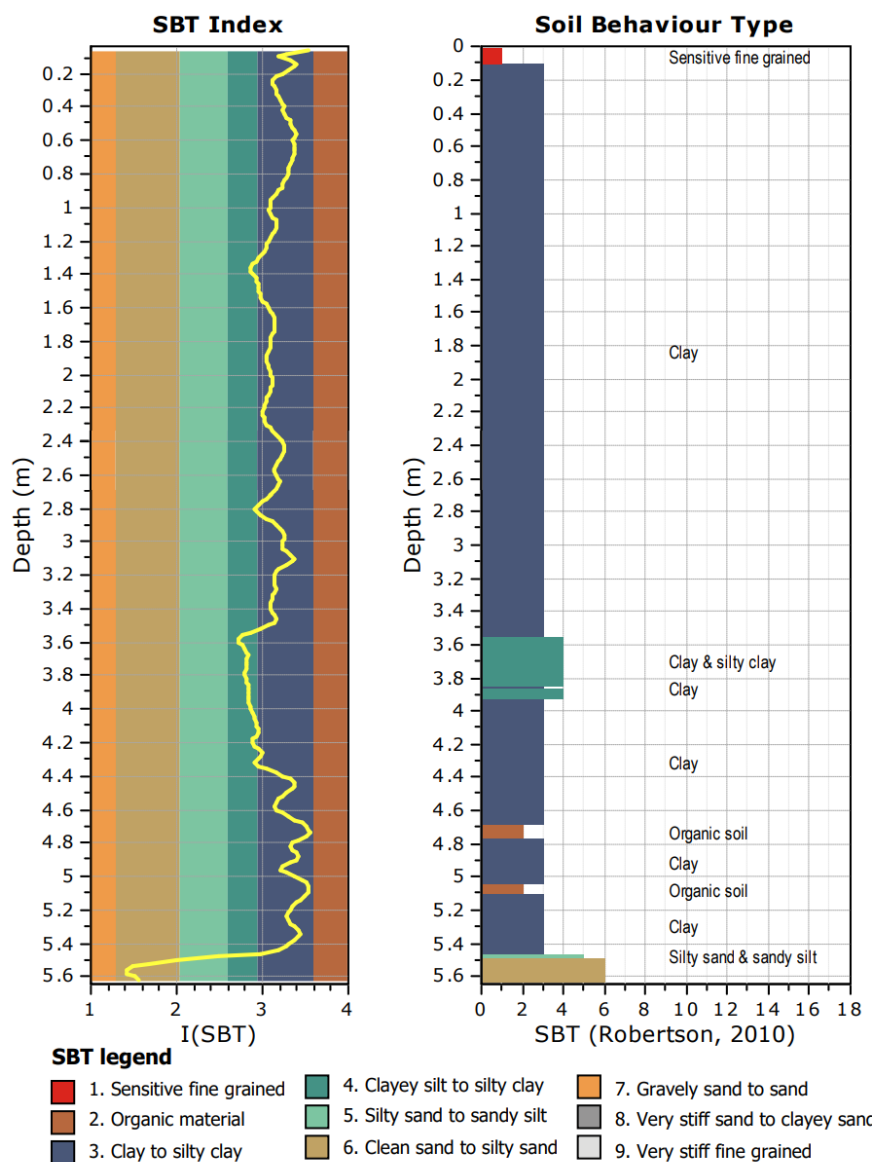
Slika 5.10. Prikaz korigiranog otpora na šiljku Q_t , normaliziranog koeficijenta trenja F_r , parametra pornog tlaka B_q i indeksa ponašanja I_c po dubini kod CPTu-1 i CPTu-2 sonde na klizištu Samarica - direktni ispis računalog programa GeoLogismiki

Klizna ploha detektirana je na dubini od 4,4 m. Na toj dubini svi izmjereni parametri na dijagramima poprimaju najmanje vrijednosti. Dubljim prodiranjem u čvrsto tlo svi parametri se naglo povećavaju. Na klizištu Samarica, dubina klizne plohe detektirana statičkim CPTu sondama točno je u skladu s naznačenom dubinom na profilima električne tomografije (slika 5.5.). Geotehnički parametri interpretirani iz vrijednosti dobivenih CPTu istraživanjima izračunati su prema izrazu kojeg je predložio Robertson sa svojim suradnicima (2014).

Klizište Petrovsko

Rezultati istraživanja CPTu-1 sonde prikazani su na slici 5.11. Ostali rezultati priloženi su u Prilogu 7.





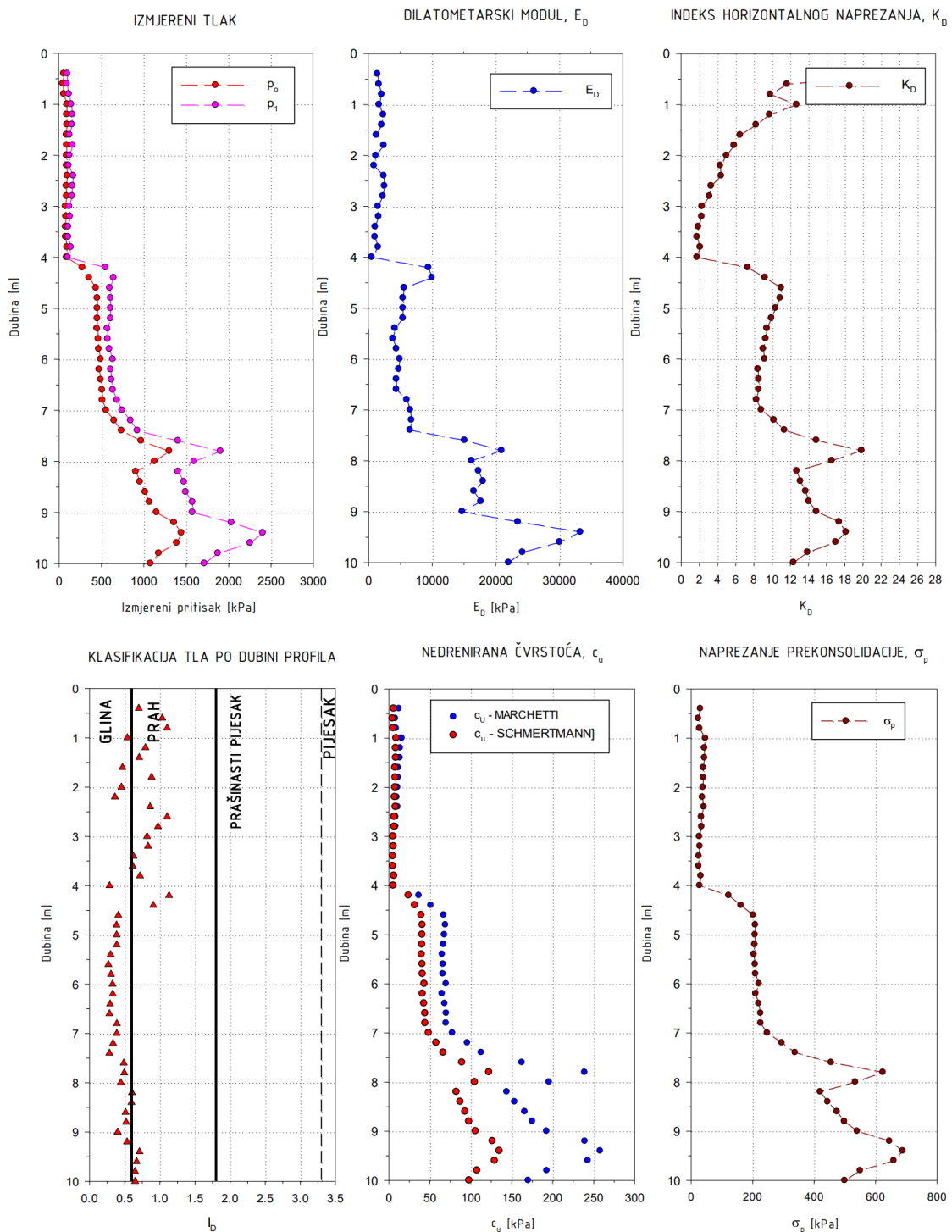
Slika 5.11. Prikaz otpora na šiljku q_t , koeficijenta trenja R_f , pnog tlaka u , indeksa tipa ponašanja tla I_c i SBTn dijagrama po dubini kod CPTu-1 sonde na klizištu Petrovsko - direktni ispis računalog programa GeoLogismiki

5.3.5. DMT istraživanje

Klizište Samarica

Na slikama 5.12. i 5.13. prikazani su izmjereni i interpretirani rezultati istraživanja DMT sondom. Dobiveni indeks horizontalnog naprezanja (K_D) jednak je vrijednosti 2 na dubini od 4 m, što je pokazatelj dubine klizne plohe. Rezultati CPTu sonde, prikazani na prethodnim slikama, pokazuju da se klizna ploha nalazi na dubini od 4,4 m. Mala razlika

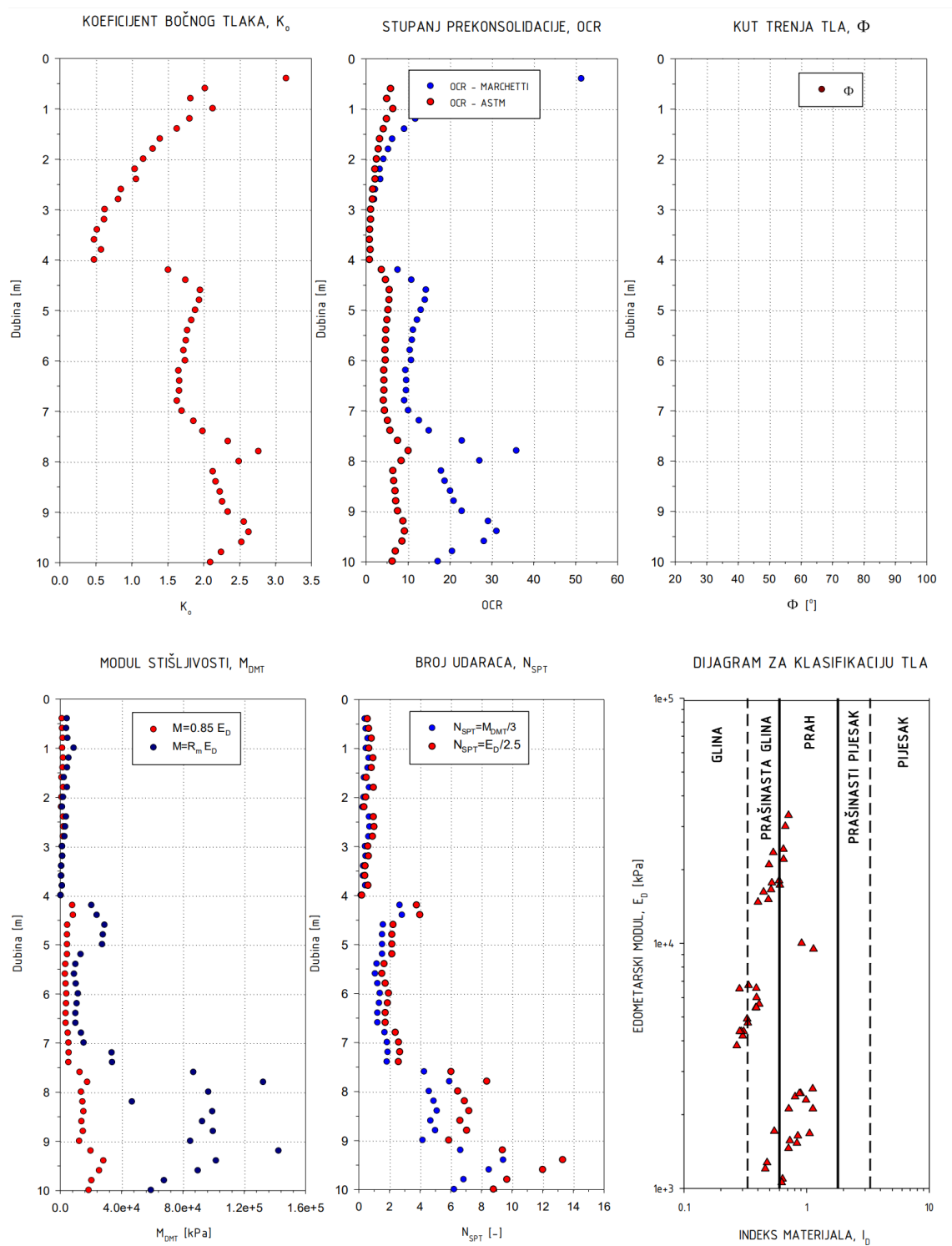
u dubini objašnjava se apsolutnom visinskom razlikom između lokacija sonde, kao i horizontalnim razmakom između njih.



Slika 5.12. Prikaz rezultata istraživanja DMT-1 sondom - klizište Samarica

Koeficijent (stupanj) prekonsolidacije (OCR) izravno je povezan s indeksom horizontalnog napreznja K_D (Špiranec i dr., 2016.). Iz prikazanih rezultata (slika 5.12. i

slika 5.13.) vidljivo je da $OCR=1$ odgovara vrijednosti indeksa horizontalnog napreznja $K_D \approx 2$.

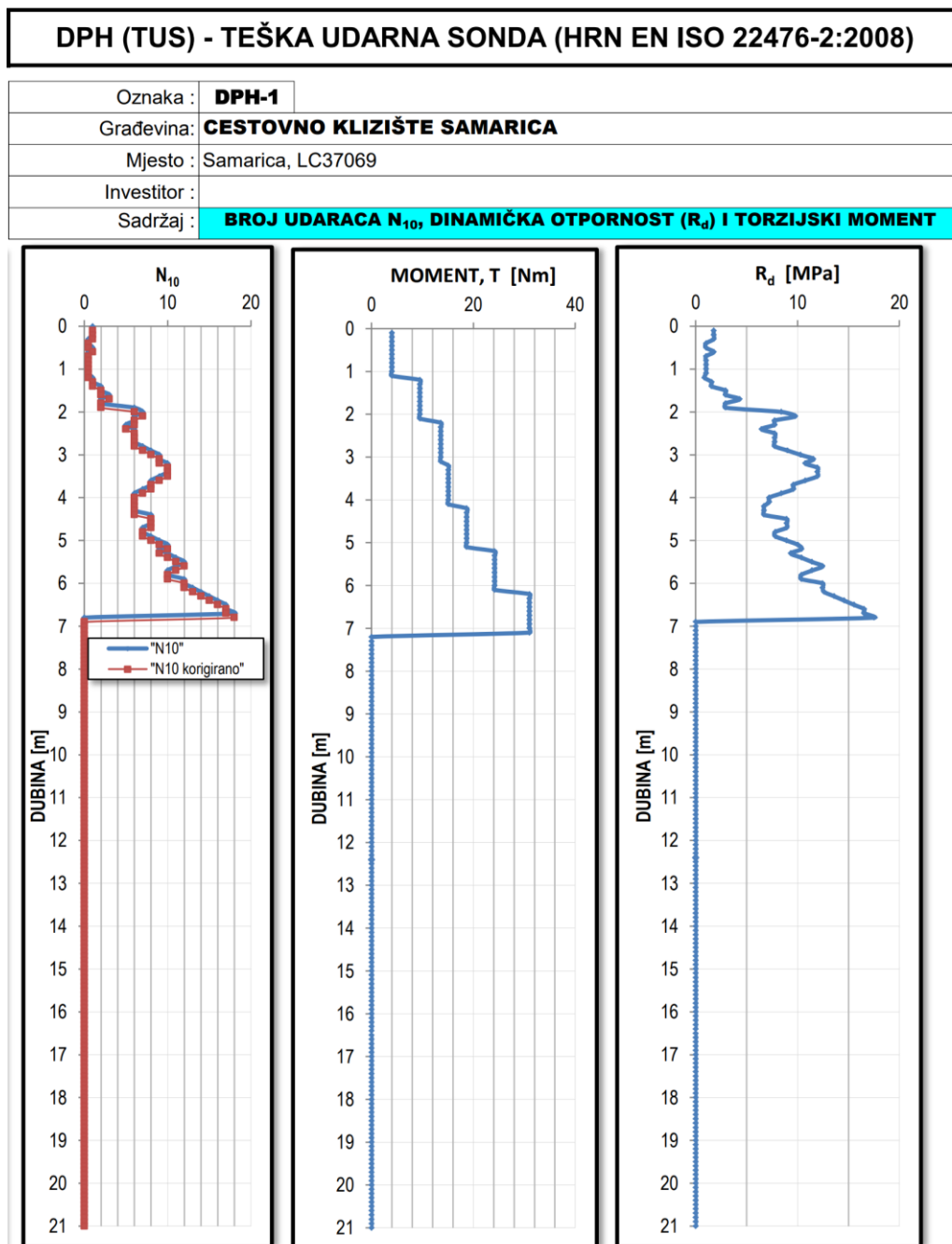


Slika 5.13. Prikaz rezultata istraživanja DMT-1 sondom - klizište Samarica

5.3.6. DPL i DPH istraživanje

Klizište Samarica

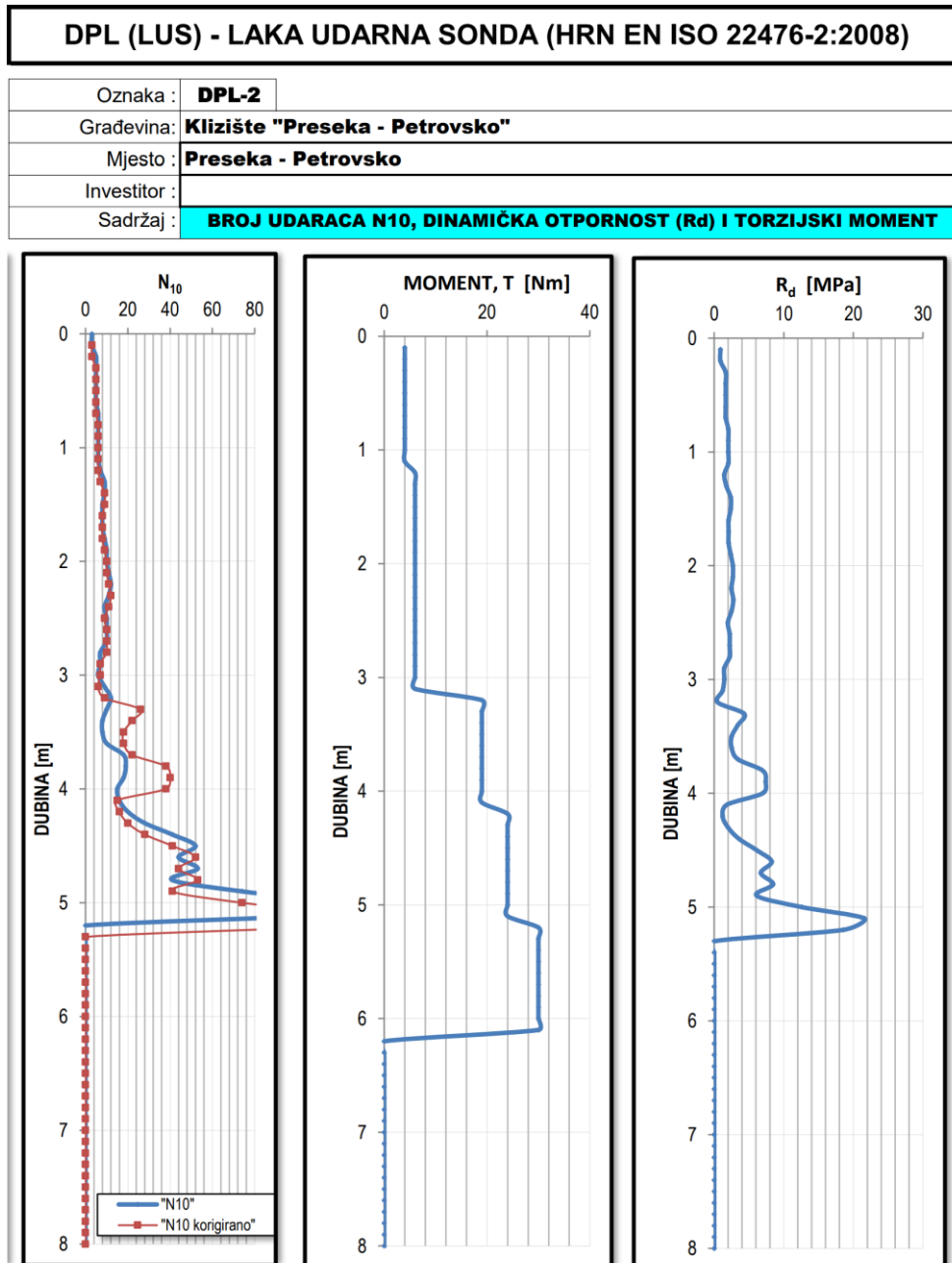
Iz rezultata istraživanja DPH-1 sonde, priloženih na slici 5.14. i u Prilogu 8, jasno su uočljive dvije klizne plohe. Prva klizna ploha nalazi se na dubini 2 m, a druga na 4,1 m do 4,4 m. S povećanjem dubine izmjereni i interpretirani parametri poprimaju velike vrijednosti što ukazuje na čvrstu podinu ispod klizne plohe.



Slika 5.14. Prikaz rezultata DPH-1 udarne sonde - klizište Samarica

Klizište Petrovsko

Na klizištu Petrovsko ukupno je izvedeno 6 DPL sondiranja, čiji je položaj prikazan na detaljnom situacijskom planu u Prilogu 2. U ovom radu za primjer prikazani su rezultati DPL-2 sonde (slika 5.15. i prilog 8.), dok su neki od ostalih profila prikazani u preklopu s ostalim rezultatima istraživanja. Razina podzemne vode detektirana je na dubini 3,2 m.

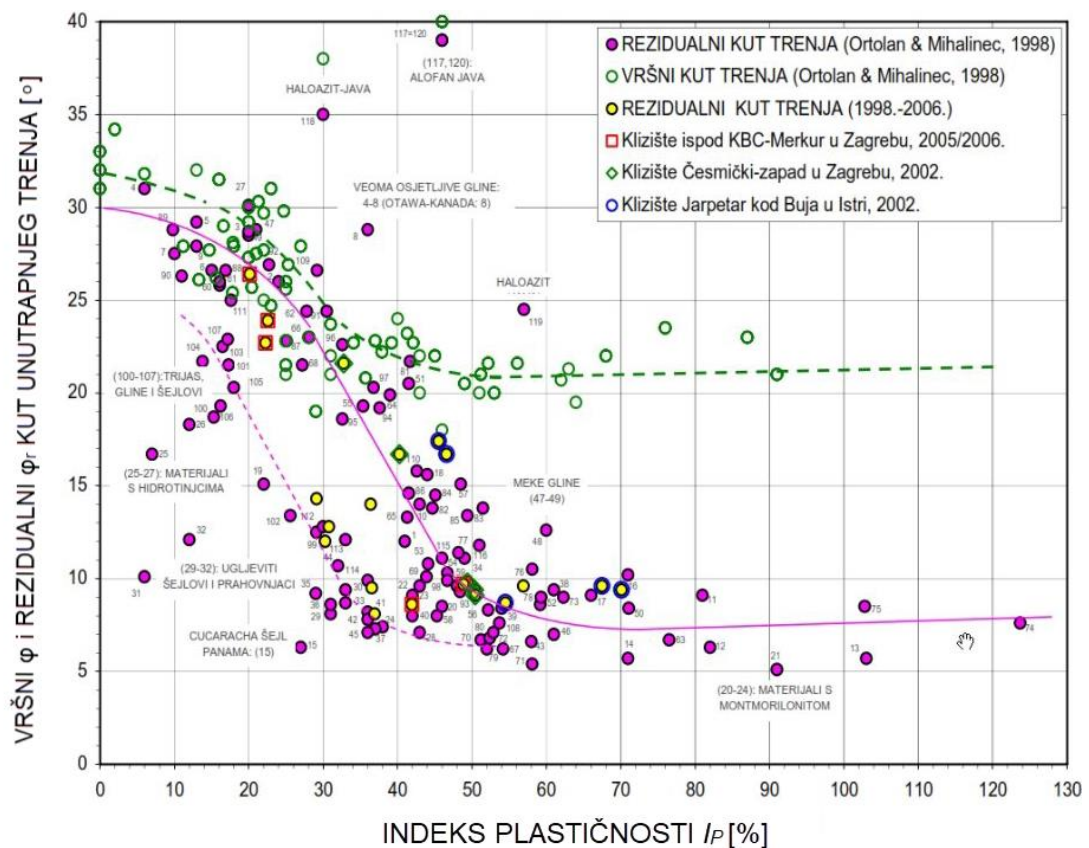


Slika 5.15. Prikaz rezultata DPL-2 udarne sonde - klizište Petrovsko

Sukladno rezultatima dinamičkog sondiranja DPL sondama, kao i statičke CPTu-1 sonde, jasno je kako se klizna ploha formirala na kontaktu prašinasto-glinovitih materijala i podine. Dubina podine nalazi se u intervalu od 5,0 do 6,0 m. Geofizičkim profilima potvrđena je navedena granica i odlično su nadopunjeni rezultati ostalih geotehničkih istraživanja.

5.3.7. Istražno bušenje i laboratorijska ispitivanja

Slika 5.16. prikazuje korelaciju indeksa plastičnosti i kuta unutrašnjeg trenja prema autorima Ortolan i Mihalinec, 1998. Preko ovih korelacija može se približno odrediti kut unutrašnjeg trenja koherentnih materijala, ako su poznate vrijednosti indeksa plastičnosti koji se određuje u geotehničkom laboratoriju na uzorcima tla iz istražnih bušotina.



Slika 5.16. Dijagram korelacije indeksa plastičnosti sa vršnim i rezidualnim kutem unutrašnjeg trenja (Ortolan i Mihalinec, 1998)

U Prilogu 9 prikazana su dva sondažna profila, B-1 i B-3, od šest izbušenih sondažnih bušotina u klizištu Samarica, s foto dokumentacijom jezgre.

Kod bušotine B-3 u intervalu 2,00 do 5,50 m identificirana je iznimno šupljikava struktura sedimenata glina. Navedeno ukazuje na geološku pripadnost grupi glinovitih siltova. Prema strukturi, nestabilnost padine klasificira kao asekvantno klizište tj. klizna ploha je unutar jednorodnog tla.

Tijekom istražnog bušenja u bušotinama nije zabilježena slobodna voda, već je zabilježena provlažena zona kod bušotine B-3. Provlažena zona odgovara materijalu glina šupljikave strukture, s mekom konzistencijom na dubini 4,0 do 4,5 m. Na identificiranoj dubini utvrđeno je i novoformirano dno bušotine kod bušotine B-1.

5.3.8. Litološki sastav tla

Klizište Samarica

Temeljem identifikacije nabušene jezgre, rezultata CPTu i DMT sondiranja, te laboratorijskih ispitivanja, utvrđen je sljedeći litološki sastav tla na predmetnoj lokaciji:

Sraslo tlo (nepokrenuta masa)

- 1) Gline niske plastičnosti (CL) - 0,0 - 15,0 m

Sraslo tlo na lokaciji grade gline niske plastičnosti (CL), granice tečenja $w_L = 40 - 50$ %, žuto-smeđe boje i kruto plastičnog konzistentnog stanja. Prijelazna zona prema dubljim "šarim" glinama (proslojenost sivom glinom), dublja od 7,0 m, gradacijska je bez izražene oštre sedimentacijske granice. Gline sadrže male do srednje dispergirane organske supstance (tamne mrlje). Parametri tla su sljedeći:

- $q_c = 110 - 400 \text{ kN/m}^2$, $N_{SPT} = 8 - 12 \text{ ud./30 cm}$, $c_U = 50 - 200 \text{ kN/m}^2$
- $\gamma = 19,5 \text{ kN/m}^3$, $M_V = 7 \text{ MN/m}^2$, $c = 10 \text{ kN/m}^2$, $\varphi = 28^\circ$

Koluvijalna masa¹ u tijelu klizišta (pokrenuta masa)

- 2) Gline niske plastičnosti (CL) - 0,0 - 5,0 m

Parametri tla:

- $c_U = 10 - 30 \text{ kN/m}^2$, $\gamma = 18,8 \text{ kN/m}^3$

¹ Koluvijalna masa odnosi se na materijal ili procese povezane s transportom koji su pod direktnim utjecajem gravitacijske sile.

Parametri tla u kliznoj plohi

3) Glina niske plastičnosti (CL) - 4,0 – 5,0 m

Statičkim sondama identificiran je mali koeficijent vodopropusnosti u zoni klizanja $k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s, što predstavlja razliku u odnosu na litološki profil plićih formacija.

Parametri tla su:

- $c_U = 6 \text{ kN/m}^2$, $\gamma = 18,0 \text{ kN/m}^3$

Klizište Petrovsko

Interpretacijom rezultata dinamičkih sonde DPL, CPTu sonde i geostatičkih računskih kalkulacija utvrđen je sljedeći litološki sastav tla na predmetnoj lokaciji:

Površinsko tlo

1) Prašnasti pijesci i pjeskovito prašinaste gline (siltovi) – 0,0 - 6,0 m

Klizna ploha nalazi se na dnu ovog intervala. Površinsko tlo grade prašnasti pijesci i pjeskovito-prašinaste gline. Krovinski klastiti su u sedimentacijskoj izmjeni od prašnastih pijesaka (SM) do zaglinjenog praha, ali i pojave sitnog šljunka unutar pjeskovite serije. Na dnu krovine CPTu sondom identificirane su masnije gline sa organskim primjesama.

Parametri tla:

- $c_U = 20 - 50 \text{ kN/m}^2$
- $\gamma = 14 - 16 \text{ kN/m}^3$, $c = 0 - 10 \text{ kN/m}^2$, $\varphi = 13 - 20^\circ$
- seizmički parametri: $v_p = 200 - 500 \text{ m/s}$, $v_s = 180 - 300 \text{ m/s}$

Podina

2) Čvrsti lapor (podina) - > 6,0 m

Dublje od 6,0 m identificirana je podina.

Parametri tla:

- $c_U = 250 \text{ kN/m}^2$, $\gamma = 19,0 \text{ kN/m}^3$, $c = 50 \text{ kN/m}^2$, $\varphi = 25^\circ$

5.3.9. Geotehničke značajke temeljnog tla

Prema karti potresnih područja Republike Hrvatske, koja je sastavni dio Nacionalnog dodatka za niz normi HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne

otpornosti konstrukcija - 1.dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade, određeno je vršno ubrzanje za istražni prostor: $a_{gR} = 0,11$ g za klizište Samarica i $a_{gR} = 0,18$ g za klizište Petrovsko (povratni period 475 godina).

Utjecaj svojstava temeljnog tla na seizmička djelovanja generalno se uzima u obzir svrstavajući tlo u pet razreda A, B, C, D i E. Razredi tla razlikuju se prema karakterističnim stratigrafskim profilima i parametrima. Temeljem izmjerenih vrijednosti na terenu i upotrebom izraza za v_{s30} utvrđeno je da tlo na obje lokacije klizišta pripada "C" kategoriji tla prema seizmičnosti, $v_{s30} = 180 - 360$ m/s (tablica 5.3.).

Tablica 5.3. Kategorizacija tla prema seizmičnosti (Eurocode 8, HRN EN 1998-1:2011)

| Kategorija tla | Opis profila tla | Parametri | | |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------|
| | | v_{s30} [m/s] | N_{SPT} [ud./30 cm] | c_u [kPa] |
| C | Slojevi zbijenog ili srednje zbijenog pijeska, šljunka ili čvrste gline, debljine od nekoliko desetina do više stotina metara. | 180 - 360 | 15 - 50 | 70 - 250 |

5.3.10. Hidrološki uvjeti u tlu

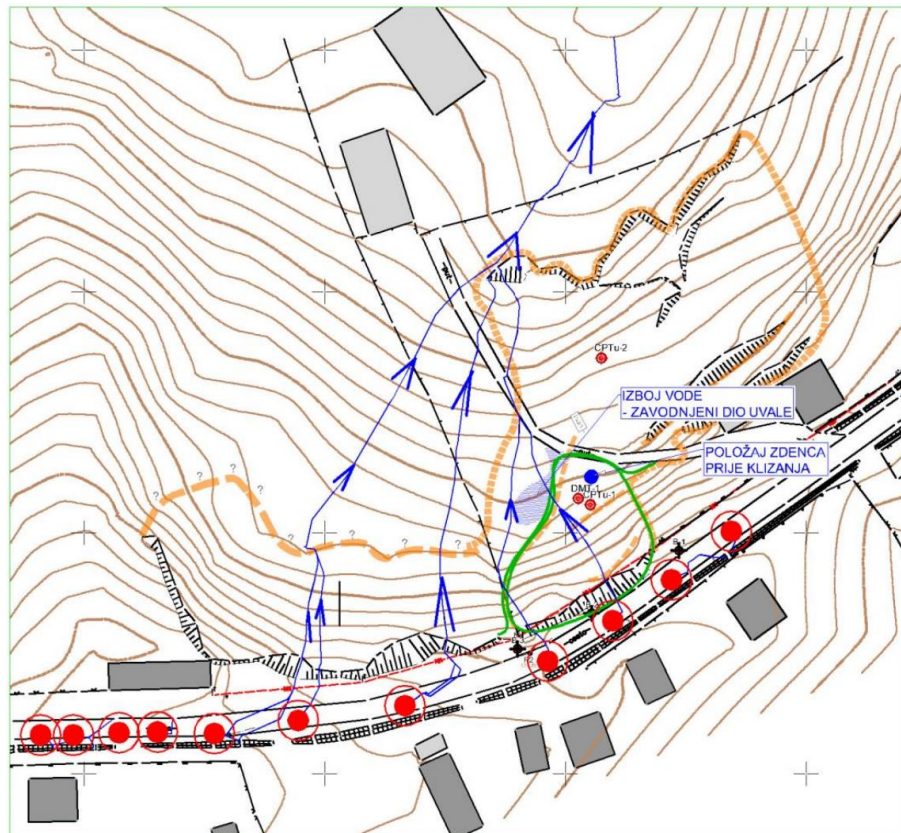
Klizište Samarica

Proslojci koji su sedimentacijski predisponirani (sedimentacije siltita i siltitnih glina) omogućavaju lakše procjeđivanje vode u dublje slojeve. S obzirom da se voda u ove slojeve prihranjuje iz viših dijelova terena, tlakovi i fluktuacije su velikih iznosa.

Isklinjavanjem opisanih slojeva, procijeđena voda nema mogućnost brze evakuacije iz padine pa se počinje nakupljati u tlu, čime se povećavaju porni tlakovi. Kombinacija povećanih pornih tlakova i dodatno saturiranje tla površinskim oborinskim vodama sa prometnice dovela je do pojave klizišta (slika 5.17.).

Prema informacijama koje su dobivene od lokalnog stanovništva, na klizištu se nalazio zdenac koji je nakon velikih oborina pokazivao karakteristike samoizljeva. Približna lokacija zdenca vidljiva je na slici 5.17. Nakon klizanja zdenac se nije mogao vizualno

locirati. Iz navedenog se došlo do zaključka da su potencijali procjednih voda sigurno značajni i uzrok su destabilizacije cijelog prostora. Izbijanje vode iz nagurane koluvijalne mase kliznog tijela "B" i nakupljanje u uvali posljedica su ove pojave.



Slika 5.17. Putanje procjeđivanja površinskih oborinskih voda sa kolnika preko prostora klizišta

Klizište Petrovsko

Na klizištu Petrovsko nisu uočene nikakve posebne pojave koje bi dovele do razumijevanja hidroloških uvjeta u tlu.

5.3.11. Glavni razlozi pojave nestabilnosti

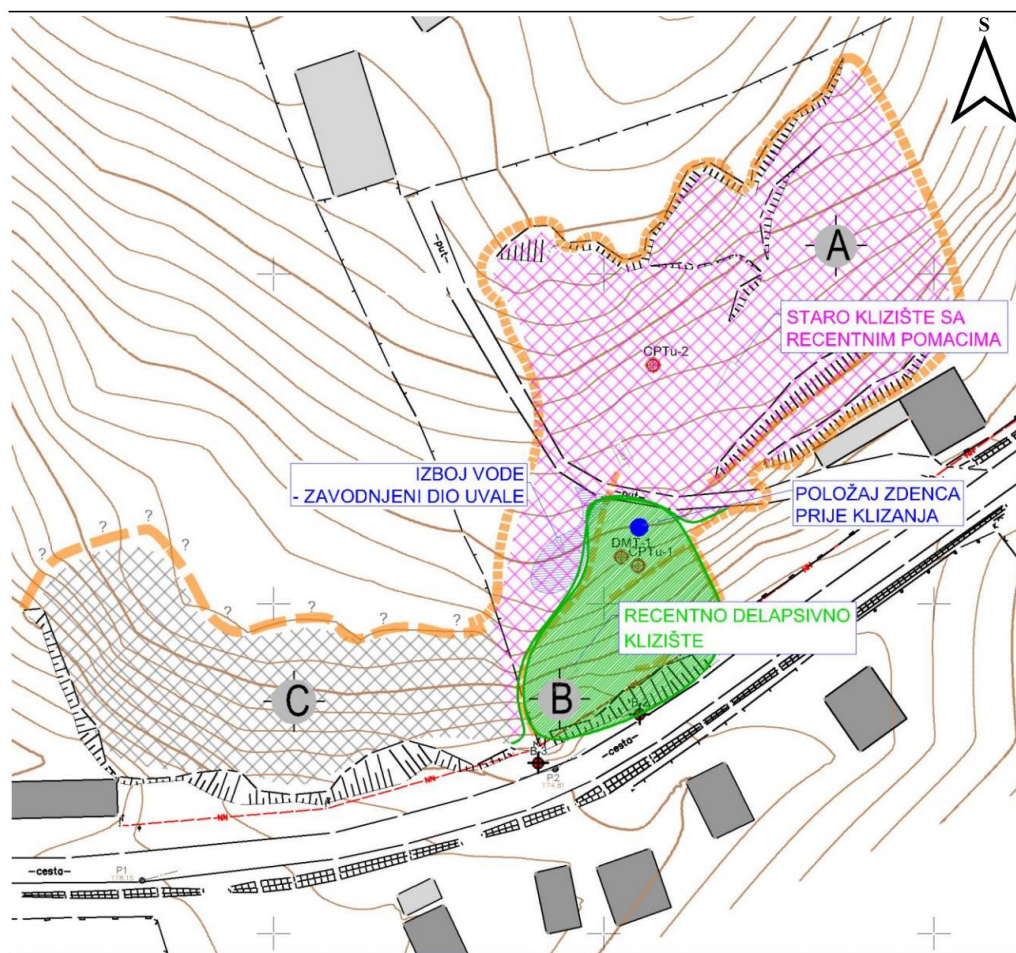
Klizište Samarica

Provedeni istražni radovi pokazali su da je cestovno klizište Samarica klizište sa složenim kretanjem mase. Prema vremenu nastanka, klizište je klasificirano kao staro

klizište sa recentnim² razvojem delapsivnog³ klizišta uz prometnicu i novim razvojem pomaka na postojećem "starom" klizištu.

Glavni razlog recentnih pomaka i razvoja klizišta je popuštanje nožice zbog nakupljanja i visokih razina procjednih voda. Navedeni proces djeluje dugo na istraživanom prostoru, što je rezultiralo pomacima kroz dugi niz godina, pri čemu su formirane klizne plohe. Struktura padine, geološka građa terena, fizikalno-mehanički i hidrološki uvjeti u kombinaciji s dodatnim hidrološkim oborinama, predstavljaju osnovni uzrok pokretanja klizanja tla na predmetnoj lokaciji.

Gledano razvojnom dinamikom kinematika klizišta prikazana je na slici 5.18.



Slika 5.18. Podjela klizišta prema kinematici pomaka

² Recentno klizište je novo, nedavno formirano klizište.

³ Delapsivna klizišta nastaju u nožici padine kao posljedica podsijecanja i razvijaju se naviše uz padinu.

A - Staro klizište sa recentnim klizanjem vezanim u delapsivni razvoj klizanja uz prometnicu. Novi pomaci na starom dijelu klizišta jasno su ograničeni najahivanjem na stopu, radijalnim pukotinama na ispučanju i vertikalnim odsječkom na čelu klizišta. Posmične čvrstoće na ovom dijelu klizišta detektirane CPTu-2 sondom većeg su iznosa nego na prostoru koluvija kliznog tijela „B“.

B - „Novo“ klizište, također s delapsivnim razvojem klizišta uz prometnicu. Na ovom području koluvijalna masa kliznog tijela je vrlo malih čvrstoća, saturirana vodom i sadrži uvalu zapunjenu vodom u nižem dijelu. CPTu-1 i DMT-1 sondama jasno je utvrđena klizna ploha (dubina 4,10 - 4,40 m) s minimalnom posmičnom čvrstoćom $c_U = 6,0 \text{ kN/m}^2$ i malim posmičnim čvrstoćama unutar koluvija kliznog tijela (slika 5.19.) koje u zonama minimuma potvrđuju složeno klizanje tla (sekundarna klizanja.) Približno na koti stope kliznog tijela "B" nalazio se prethodno spomenuti bunar koji se nakon jačih oborina samoizljevao. Navedeno potvrđuje visoke potencijale procjednih voda kao uzrok klizanja. Ovim klizanjem je izravno kompromitiran kolnik prometnice, te je aktualizirana problematika od strane uprave za ceste.

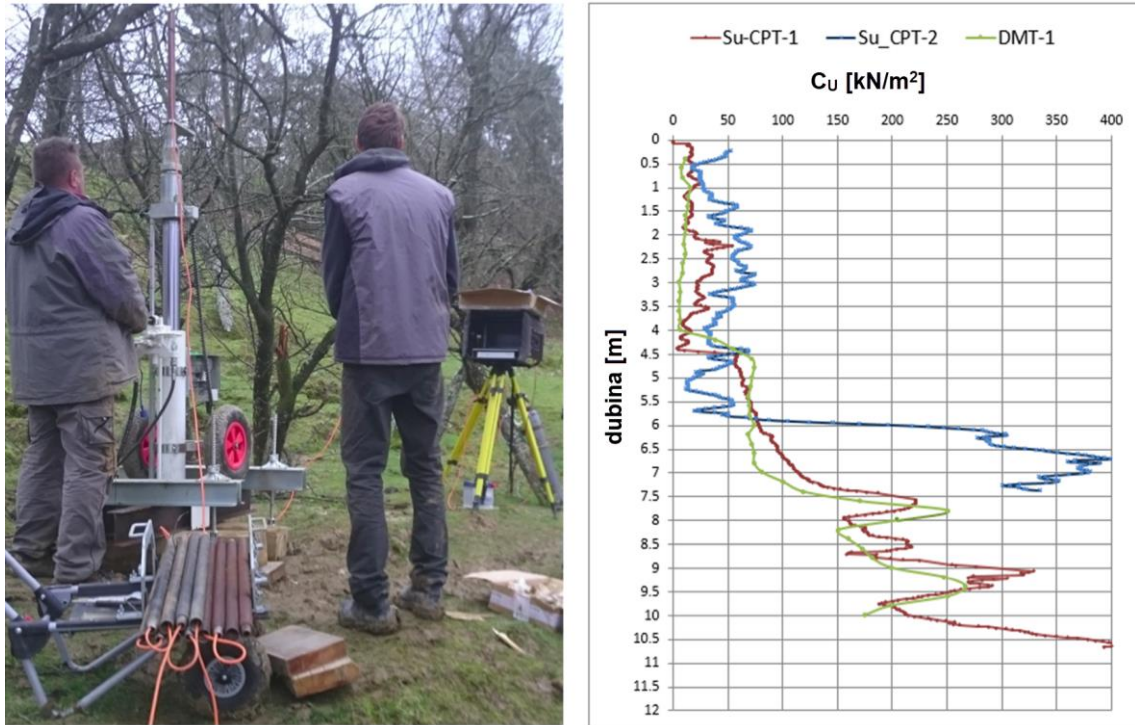
C - Pretpostavlja se da ovo klizište također pripada u stari dio klizišta koji je zbog guste vegetacije teško okarakterizirati jer nema lako vidljivih markantnih obilježja. Točne granice nisu utvrđene, osim jasne linije vlačne pukotine na čelu klizišta. Vlačna pukotina je u najbližem dijelu udaljena 4,0 m od prometnice. Na ovom prostoru nisu se provodili istražni radovi, a pretpostavljen je delapsivni razvoj klizišta kao i na ostalim dijelovima. Ovo klizište ne predstavlja prijetnju za kolnik prometnice, ali ugrožava objekt u zapadnom dijelu.

Klizište Petrovsko

Prema informacijama dobivenim od mještana, klizanje se dogodilo početkom 2020. godine, a do tada na ovom području nije bilo nestabilnosti tla. Nepovoljnom činjenicom smatra se geološka građa čiju krovinu grade prašinski pijesci i siltozne gline. Neposredno prije kontakta s laporom, u podini se pojavljuju masne (organogene) gline malih posmičnih čvrstoća, koje su vrlo osjetljive na promjene vlažnosti.

Glavni uzrok aktiviranja klizišta je pad čvrstoće glina na kontaktu sa laporom. Točan razlog nije potpuno jasan, ali do klizanja je najvjerojatnije došlo zbog povećanja vlažnosti tj. porasta razine podzemne vode dubljih slojeva tla. Navedeno za posljedicu ima

povećanje pornih tlakova i smanjenje efektivnih napreznja. Utjecaj potresa u Zagrebu iz ožujka i travnja 2020., također se ne može isključiti kao jedan od mogućih razloga. Koji od ovih procesa je prethodio drugom teško je kronološki definirati.



Slika 5.19. Oprema za statičko sondiranje (lijevo) i nedrenirane posmične čvrstoće na području kliznog tijela „B“ utvrđene CPTu-1, CPTu-2 i DMT-1 sondama (desno) – klizište Saamrica

Klizište Petrovsko

Prema informacijama dobivenim od mještana, klizanje se dogodilo početkom 2020. godine, a do tada na ovom području nije bilo nestabilnosti tla. Nepovoljnom činjenicom smatra se geološka građa čiju krovinu grade prašinski pijesci i siltozne gline. Neposredno prije kontakta s laporom, u podini se pojavljuju masne (organogene) gline malih posmičnih čvrstoća, koje su vrlo osjetljive na promjene vlažnosti.

Glavni uzrok aktiviranja klizišta je pad čvrstoće glina na kontaktu sa laporom. Točan razlog nije potpuno jasan, ali do klizanja je najvjerojatnije došlo zbog povećanja vlažnosti tj. porasta razine podzemne vode dubljih slojeva tla. Navedeno za posljedicu ima povećanje pornih tlakova i smanjenje efektivnih napreznja. Utjecaj potresa u Zagrebu iz

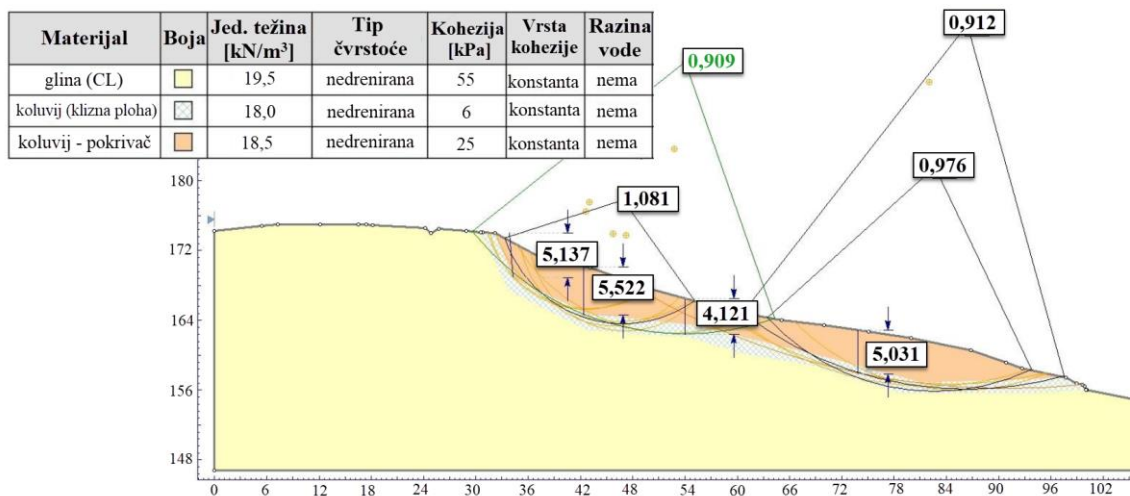
ožujka i travnja 2020., također se ne može isključiti kao jedan od mogućih razloga. Koji od ovih procesa je prethodio drugom teško je kronološki definirati.

5.3.12. Analiza stabilnosti kosine prema metodi Bishop-a

Kod proračuna faktora sigurnosti analizira se velik broj potencijalnih kliznih ploha. U proračunu grafički se prikazuje samo analiza za najkritičniju kliznu plohu, odnosno zelenom bojom prikazane su plohe za koje je faktor sigurnosti blizak plohi sa minimalnim faktorom sigurnosti. Proračun stabilnosti po Bishop-u izveden je računalnim programom Rocscience Inc, SLIDE 6.0.

Klizište Samarica

Analiza stabilnosti kosine provedena je za slučaj s minimalnom posmičnom čvrstoćom $c_U = 6$ kPa na kliznoj plohi u zatečenom stanju padine. Model s korištenim ulaznim parametrima tla i opterećenjima prikazan je na slici 5.20.



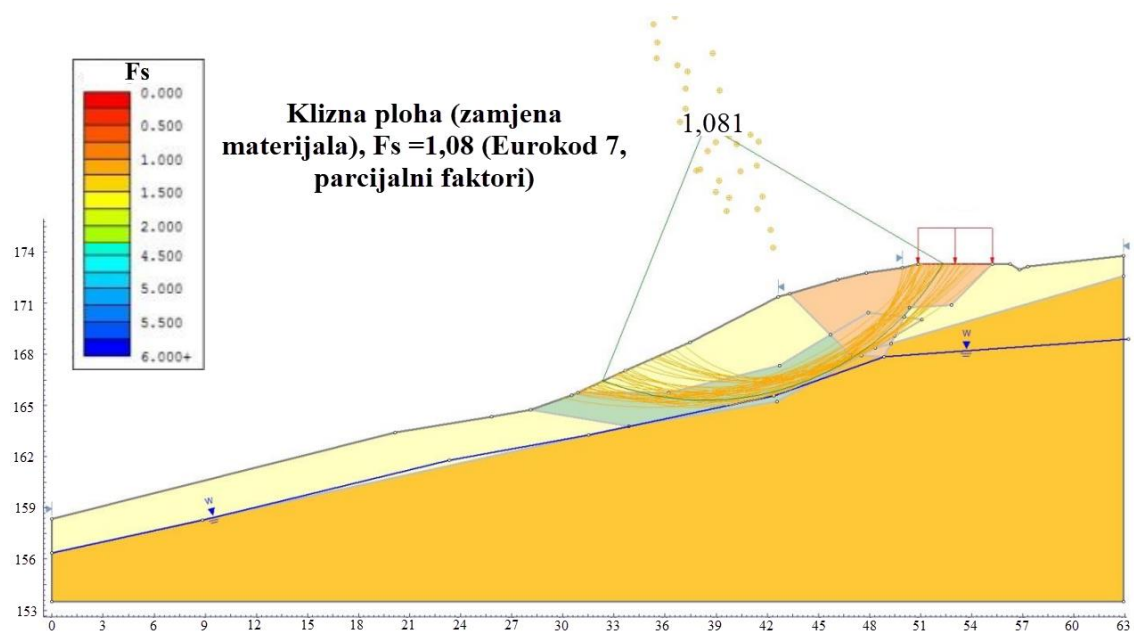
Slika 5.20. Analiza stabilnosti kosine klizišta Samarica - karakteristični profil i model

Kod proračuna stabilnosti kosine prema Bishop-u korištena je analiza granične ravnoteže - povratna analiza labilne stabilnosti. Dobiveni faktori sigurnosti približno iznose 1 ($F_s = 1$), što znači da za odabrane parametre modela vlada labilna stabilnost. Kod ove povratne analize nisu se primjenjivali parcijalni faktori pa su karakteristične vrijednosti jednake projektnim vrijednostima.

Analiza jasno pokazuje da se klizište sastoji od više kliznih ploha koje se međusobno nastavljaju, određenim dijelom i preklapaju u pojavu sekundarnih klizanja (slika 5.20.). Cijelo klizište, kao i njegov oblik, rezultat su više kliznih procesa, što odgovara i potvrđuje delapsivan karakter recentnog klizanja uz prometnicu. Detaljan geotehnički profil tla s opisom pojedinih dijelova klizišta i objašnjenjima prikazan je u Prilogu 10.

Na temelju svih dobivenih rezultata i analize stabilnosti cestovno klizište u Samarici klasificira se kao plitko klizanje (do 5,0 m) sa složenom kinematikom. Prema strukturi klizište je asekventno (unutar jednorodnog materijala) i ima delapsivan karakter s rotacijskim tipom klizanja. U zapadnom dijelu postoji nejasna granica klizišta, ali u tom dijelu klizište ne ugrožava koridor prometnice.

Nakon provedbe analize stabilnosti u saniranom stanju (zamjena materijala) dobiven je faktor sigurnosti iznosa $F_s = 1,08$ (slika 5.21.). Analiza se provodila sukladno Eurokodu 7, koristeći parcijalne faktore iz projektnog pristupa 3.



Slika 5.21. Analiza stabilnosti kosine klizišta Samarica – sanirano stanje

Klizište Petrovsko

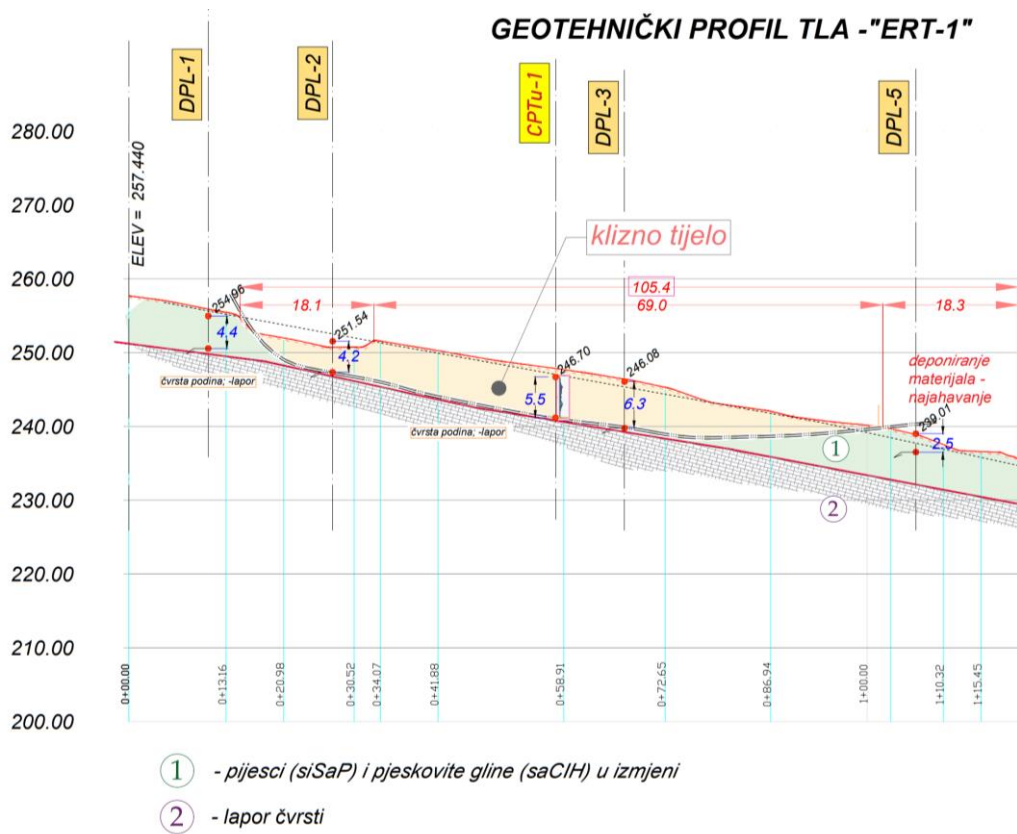
Geotehnički profil dobiven na temelju geoelektričnog profila „ERT-1“ s preklopima DPL-2, CPTu-1 i DPL-3 sonde prikazan je na slici 5.22. Na dijagramima dinamičkih sondi dolazi do naglog povećanja potrebnog broja udaraca ispod klizne plohe, a na

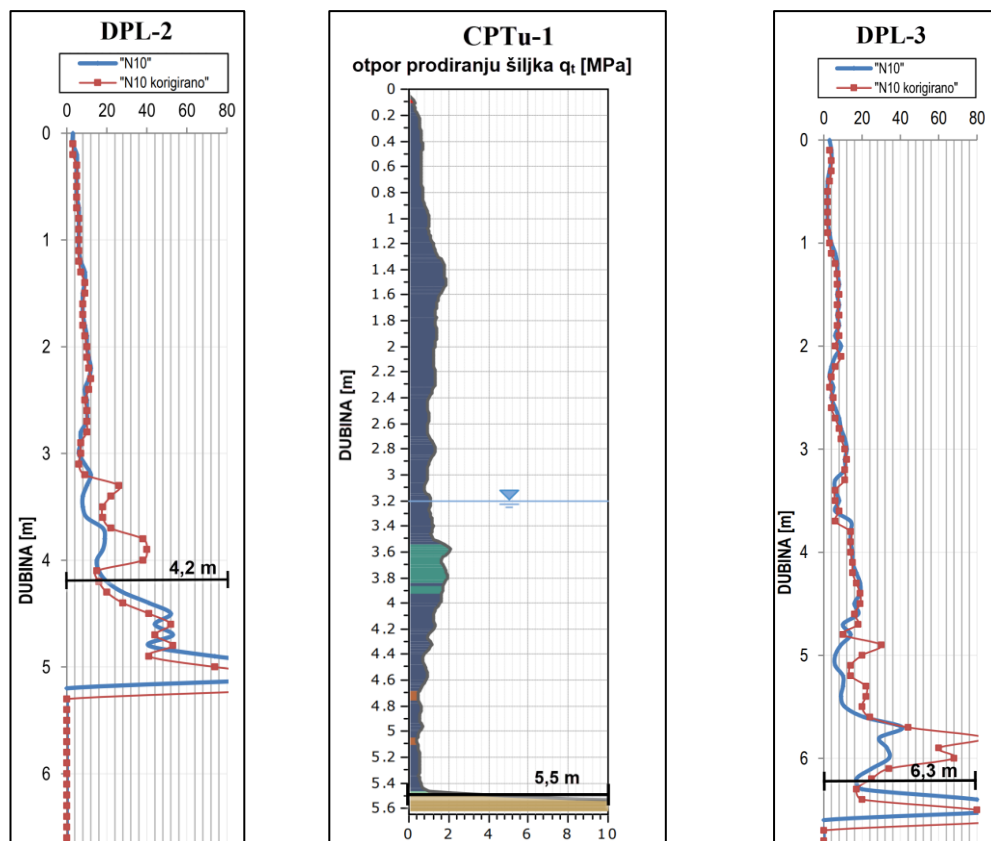
dijagramu statičke sonde do naglog povećanja otpora prodiranju šiljka. Navedeno ukazuje na čvrstu podinu ispod klizne plohe. Detaljan geotehnički profil nalazi se u Prilogu 11.

Slika 5.23. prikazuje model tla ispod geofizičkog presjeka „ERT-1“ kod proračuna analize stabilnosti. Detaljan profil prikazan je u prilogu 11. Kod zatečenog stanja dobiven je faktor sigurnosti 1 (labilna stabilnost). Proračun stabilnosti kosine, kao i kod klizišta Samarica, proveden je za slučaj s minimalnim parametrom posmične čvrstoće na kliznoj plohi.

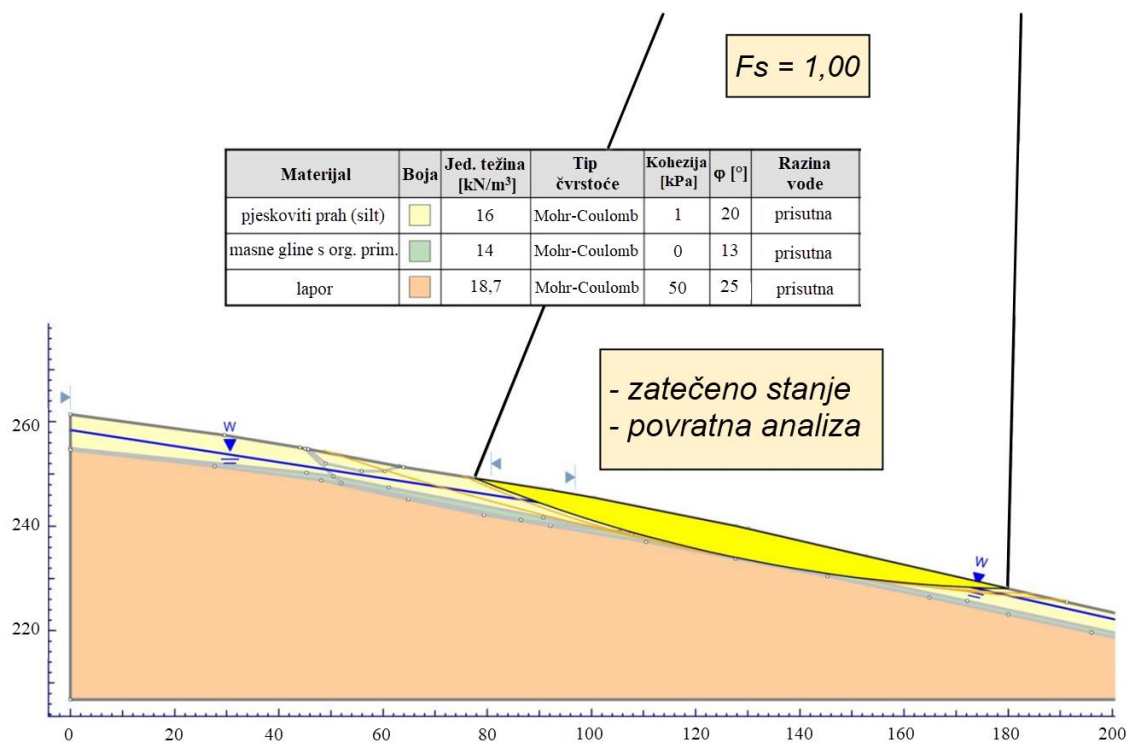
Slika 5.24. prikazuje preklap geotehničkog profila „GEO-1“ s DPL-3 i DPL-4 sondama. Kao i u slučaju geotehničkog profila ispod presjeka „ERT-1“ broj udaraca potreban za prodor dinamičke sonde poprima velike vrijednosti ispod klizne plohe. Model tla „GEO-1“ s korištenim ulaznim parametrima tla i opterećenjima prikazan je na slici 5.25. Faktor sigurnosti kod proračuna stabilnosti geotehničkog profil „GEO-1“ također iznosi 1 (labilna stabilnost).

Slika 5.26. prikazuje sanirano stanje nakon snižavanja podzemnih voda ugradnjom drena. Faktor klizanja za ovaj slučaj iznosi $F_s=1,20$, dok je prije sanacije iznosio $F_s=1,00$ (labilna stabilnost). Faktor sigurnosti je izračunat primjenom parcijalnih faktora.



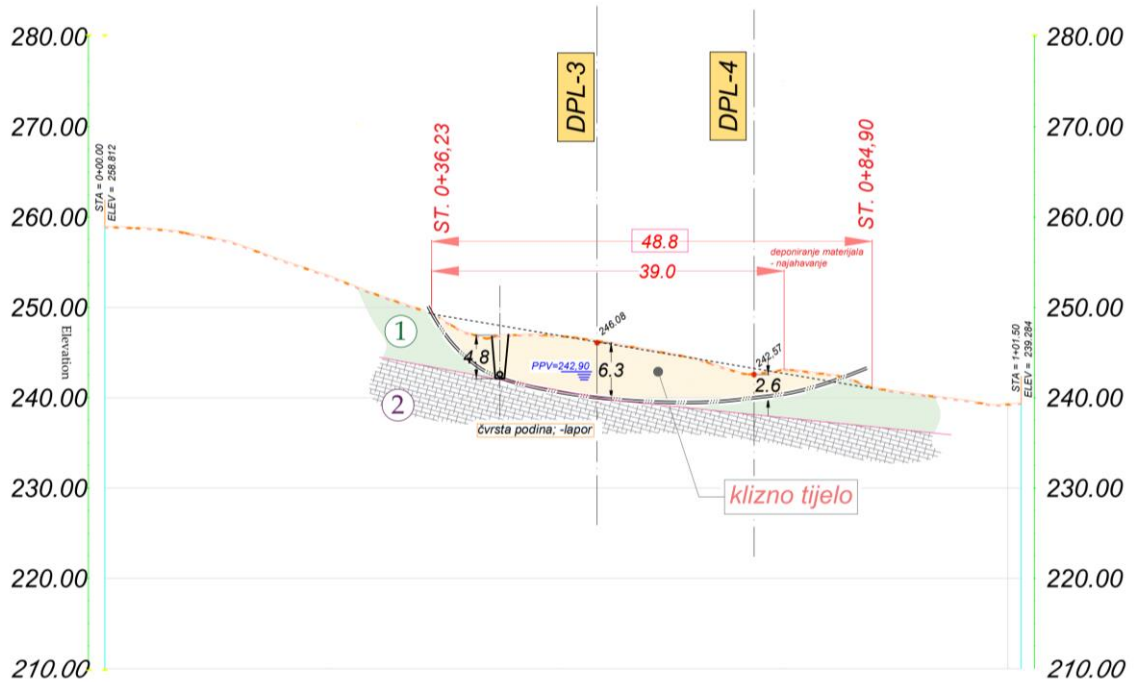


Slika 5.22 Preklap geotehničkog profila ispod presjeka „ERT-1“ s DPL-2, CPTu-1 i DPL-3 sondama - klizište Petrovsko

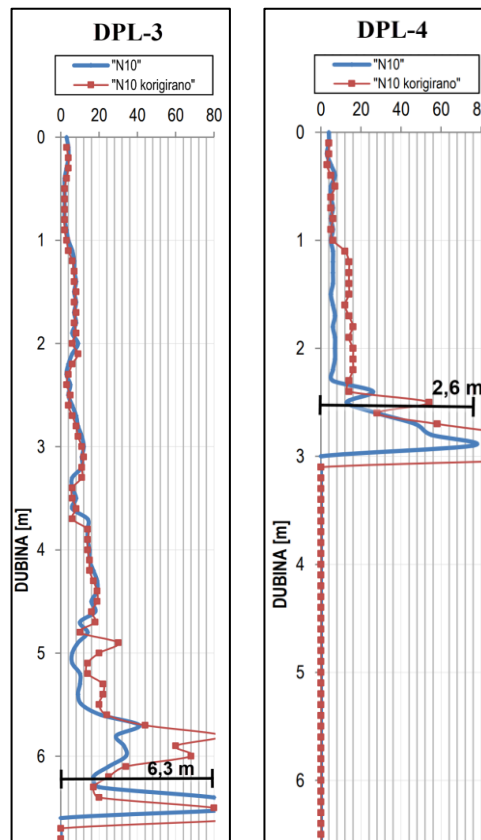


Slika 5.23. Karakteristični profil „ERT-1“ i model tla korišten pri proračunu tla na klizanje - klizište Petrovsko

GEOTEHNIČKI PROFIL TLA - "GEO-1"

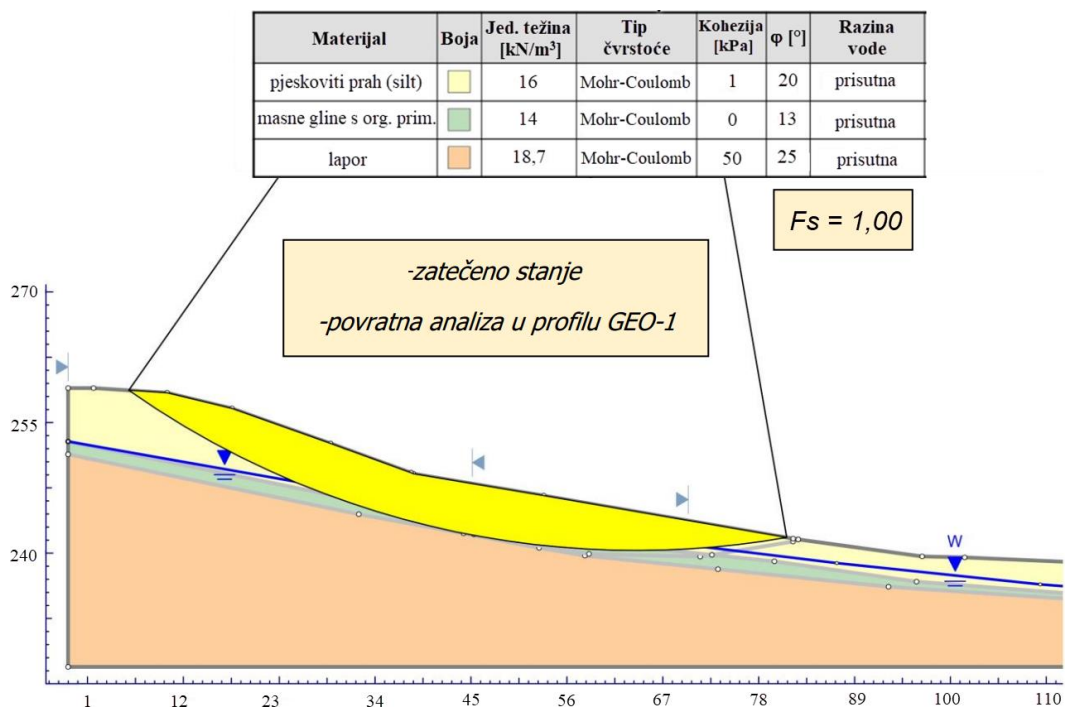


- ① - pjeskovite gline (saCIH) i pijesci (siSaP) u izmjeni
- ② - lapor čvrsti







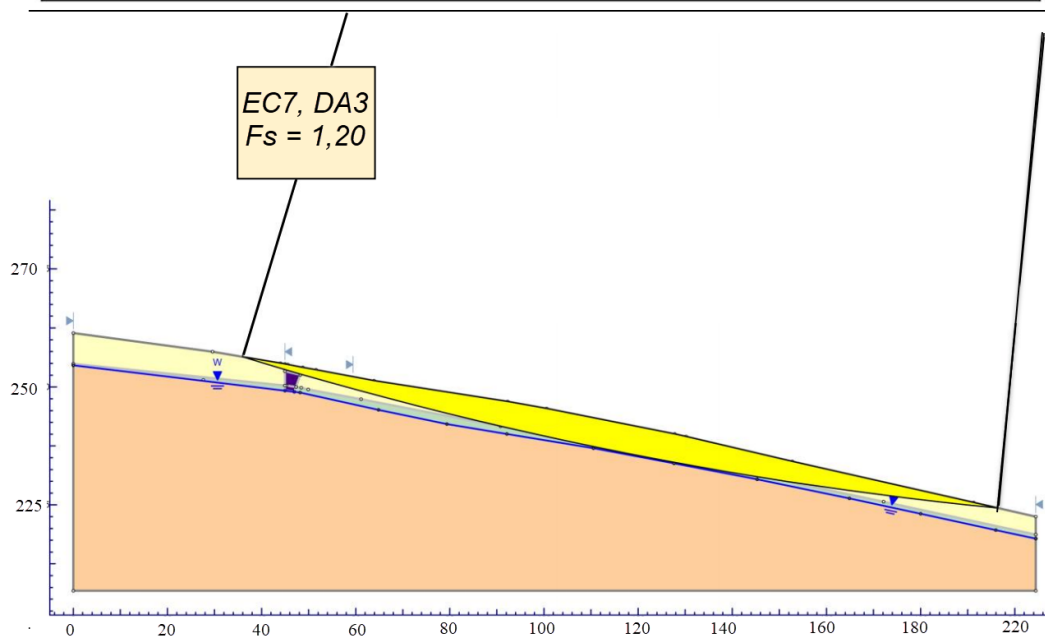
Slika 5.24. Preklop geotehničkog profila „GEO-1“ s DPL-3 i DPL-4 sondama - klizište

Petrovsko



Slika 5.25. Karakteristični profil i model tla „GEO-1“ korišten pri proračunu tla na klizanje s prikazom minimalnog faktora sigurnosti – klizište Petrovsko

| Svojstva | Pjeskoviti prah (silt) | Masne gline s org prim. | Lapor | Drenažni zasip |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| boja |  |  |  |  |
| tip čvrstoće | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb |
| jed. težina [kN/m ³] | 16 | 14 | 18,7 | 21 |
| kohezija [kPa] | 1 | 0 | 50 | 1 |
| kut unutraš. trenja [°] | 20 | 13 | 25 | 40 |
| razina vode | prisutna | prisutna | prisutna | prisutna |



Slika 5.26. Karakteristični profil i tla korišten pri stabilnosti kosine kod saniranog stanja - klizište Petrovsko

5.3.13. Prijedlog sanacijskog rješenja

Klizište Samarica

Sanacijske mjere organizirane su fazno u dvije etape, interventne mjere sanacije i dopunske sanacijske mjere. Predložene sanacijske mjere detaljno su prikazane u Prilogu 12.

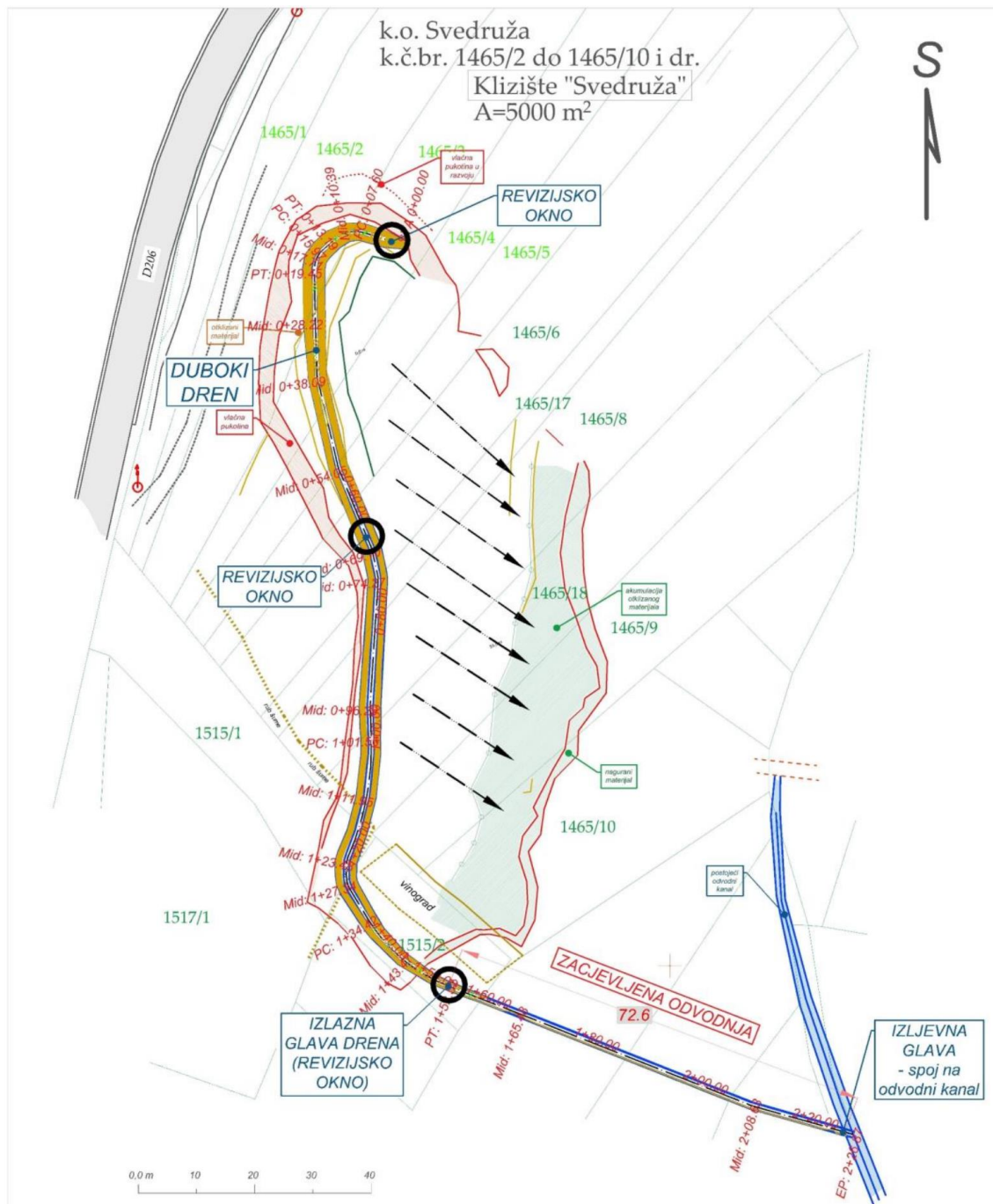
Interventne mjere sanacije obuhvaćaju stabilizaciju prostora koja će se ostvariti snižavanjem razina procjednih voda kao glavnog okidača nestabilnosti na navedenom prostoru. Navedeno se postiže kombinacijom kopanih drenova i uređenjem površinske odvodnje kojima će se učinkovito sniziti potencijal podzemne vode. Za dreniranje tijela klizišta u interventnoj mjeri, izvest će se dva drena, poprečno na os ceste "dren 1" i "dren 2", koji će služiti za sniženje visokih podzemnih voda. Ostali elementi sanacije u interventnoj mjeri odnose se na uređenje cestovnog (oborinskog) jarka oblaganjem betonskom trapeznom kanalicom, s rekonstrukcijom kolnih ulaza AB kanalom s pocinčanom rešetkom, te izgradnju okna uljeva i odvodnog kanala uz bočni put. Odvodnja vode iz drenova izvodi se kanalom od betonskih trapezno-konusnih kanalice prema situacijskom planu (Prilog 12).

Dopunske sanacijske mjerene odnose se na zamjenu materijala ispod kolnika i na nizbrežnoj strani ceste. Kolnik je oštećeni uslijed ostvarenih pomaka te zahtijeva obnovu. Da bi obnovu bilo moguće izvesti potrebno je za nju izvesti odgovarajući temelj, pa se izvodi zamjena materijala ispod ceste kao i dijelom na padini ispod ceste na potezu duljine 40 m. Na dnu zamjene materijala izvodi se "temeljni dren" koji se preko revizijskog okna (RO) spaja sa ispustom drenaže ("dren 3"), kojom se voda odvodi do kanalice ispusta drenova 1 i 2. Predloženo sanacijsko rješenje zadovoljava stabilnost kosine, $F_s = 1,08$ (slika 5.21.).

Klizište Petrovsko

Nakon razvitka klizišta, tlo je potpuno izloženo vlaženju i procjeđivanju oborinskih i procjednih voda. Sukladno tome, sanaciju je potrebno je provesti dreniranjem dubokih slojeva tla, do lapora u podini. Ugradnja kopanog drena spriječit će nakupljanje novih voda i osigurati snižavanje zatečenih voda u dubljim dijelovima tla. Trasu drena potrebno je položiti na otklizanoj depresiji, ispod vlačne pukotine (slika 5.27.).

Nakon što se ugradi drenažna cijev, iskop drena potrebno je ispuniti kamenim drenažnim materijalom. Površinski naboj materijala (čep) preporuča se izvesti u fazi premještanja masa, kako bi teren poprimio izgled sličan onome prije klizanja. Vode prikupljene drenom mogu se ispuštati u obližnji odvodni jarak zacijepljenim sustavom odvodnje. Predloženo sanacijsko rješenje zadovoljava stabilnost kosine, $F_s = 1,20$ (slika 5.26.).



Slika 5.27. Prikaz prijedloga sanacijskog rješenja - klizište Petrovsko

6. ZAKLJUČAK

Provedena istraživanja pokazala su da razlozi aktivacije klizišta mogu biti različiti, kao što su struktura padine u kombinaciji s litostratigrafskim sastavom tla na istraživanoj lokaciji, hidrološkim uvjetima i dodatnim količinama oborina. Iako su oborine (voda) glavni pokretač klizanja, do klizanja može doći i tijekom dodatnih opterećenja (potresa), kao što je to mogući slučaj aktiviranja klizišta u Petrovskom.

Najpouzdaniji podaci za određivanje 2D modela klizišta dobivaju se kombinacijom različitih geofizičkih i geotehničkih istraživanja. Navedena istraživanja su brza, a podaci za analizu se dobivaju trenutno. U ovom radu pokazalo se i potvrdilo da se rezultati različitih geotehničkih istraživanja (CPTu, DMT, DPL, DPH, istražno bušenje) savršeno poklapaju i nadopunjuju s rezultatima geofizičkih istraživanja (MASW, ERT, SRS). Odabir metoda i lokacije izvođenja istraživanja ovisi o litostratigrafskom sastavu tla, mogućnosti pristupa lokaciji i procjeni multidisciplinarnog istraživačkog tima (geotehničari, geolozi, geofizičari).

S obzirom da je istražno bušenje skupo, dugotrajno i daje samo točkaste jednodimenzionalne podatke, posljednjih godina je dopunjeno i u određenim slučajevima zamijenjeno suvremenim geofizičkim i geotehničkim istražnim metodama. Klizište u Petrovskom predstavlja primjer dobivanja pouzdanih podataka i uspješnog istraživanja klizišta bez primjene istražnog bušenja. Navedeno ukazuje da se istraživanje klizišta, naročito manjih klizišta, može provesti bez istražnog bušenja.

Na temelju dubine klizne plohe, sastava tla, razine podzemne vode, utjecaja okolnih građevina, kao i glavnih razloga aktivacije klizišta te ciljeva sanacije daje se prijedlog sanacijskog rješenja. Primjeri sanacijskih rješenja iz ovog rada uključuju izvedbu kopanih drenova, odvodnih kanala i zamjenu materijala (klizište Samarica) te šljunčane drenažne rovove sa zacijevljenim sustavom odvodnje (klizište Petrovsko). Za provjeru uspješnosti sanacijskog rješenja potrebno je provesti analizu stabilnosti kosine prije i nakon sanacije. U ovom radu upotrijebljena je metoda Bishop-a. Za obje predmetne lokacije klizišta, faktor sigurnosti na kliznoj plohi s najmanjom posmičnom čvrstoćom iznosio je $F_s = 1$ (labilna stabilnost). Nakon provedbe analize s uključenim sanacijskim rješenjem, na klizištu Petrovsko vrijednost faktora sigurnosti povećala se na 1,2, a na klizištu Samarica na 1,08. Proračuni su rađeni sukladno Eurokodu 7, koristeći parcijalne faktore. Rezultati

provedene analize stabilnosti kosine pokazuju da će se izvedbom predloženog sanacijskog rješenja postići stabilnost kosine na predmetnim klizištima.

7. LITERATURA

Bishop, A.W. (1955): The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique. Vol 5, pp.7-17.

Cope, M. (2011): Dynamic probe theory revisited-effective interpretation of dynamic test results. Formely of Geotek Services Limited. Auckland, New Zealand.

Corsini, A., Borgatti, L., (2019): Mountain Landslides: Monitoring, Modeling, and Mitigation. Geosciences. 9:365. 10.3390/geosciences9090365.

Cruden, D. M. (1991): A simple definition of a landslide. Bulletin Of the International Association of Engineering geology, No 43. Paris.

Disas-SHARE. LANDSLIDE AND SINKHOLES. Dostupno na:

<https://janeceegavan.wordpress.com/2018/01/24/78/>. Datum pristupa: 18.03.2022.

Eberhardt, E. (2003): Rock Slope Stability Analysis - Utilization of Advanced Numerical Techniques, Vancouver, Canada: Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia.

EVEREST Geophysics. MASW. Dostupno na:

<https://everestgeophysics.com/methods/seismic/masw/>. Datum pristupa: 10.04.2021.

Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. In Transactions of the 2nd Congress on Large Dams (ICOLD), Paris. Vol. 4, pp. 445 – 462.

FINE Ltd. (2014): Geotechnical Software Suite. GEO5 - User's Guide. Version 19.

HRN EN ISO 22476-2:2008. Geotehničko Istraživanje i Ispitivanje - Terensko Ispitivanje - 2. Dio: Dinamička penetracija (ISO 22476-2:2005; EN ISO 22476-2:2005)

HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1.dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade.

HRN EN ISO 22476-2012. Geotehničko Istraživanje i Ispitivanje - Terensko Ispitivanje - 1. Dio: Ispitivanje Električnim Statičkim Prodiranjem Bez Mjerenja Potresnog Tlaka i s Mjerenjem Potresnog Tlaka (ISO 22476-1:2012; EN ISO 22476:2012).

HRN EN ISO 22476-11:2017. Geotehničko Istraživanje i Ispitivanje - Terensko Ispitivanje - 11. Dio: Ispitivanje Plosnatim Dilatometrom (ISO 22476-11:2017; EN ISO 22476-11:2017).

International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) (2001): Technical Committee 16 on Ground Property Characterisation from In-situ Testing. The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations.

Jordanova, G., Gariano, S.L., Melillo, M., Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Jemec Auflič, M. (2020): Determination of Empirical Rainfall Thresholds for Shallow Landslides in Slovenia Using an Automatic Tool. *Water*. 12: 1449.

Kliche, C. A. (2018): *Rock Slope Stability*. 2nd Edition. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. London.

Knödel, K., Lange, G., Voigt, H. J. (2007): *Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer Science & Business Media. Berlin.

Labuz, J. F., Zang, A. (2012): Mohr-Coulomb Criterion Failure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol 45, pp. 975-979.

Loke, M. H. (1997): *Res2DINV software user's manual*. University Sains Malaysia. Penang, pp 173.

Loke, M. H. (2021): Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Marchetti S. (1980): In Situ Tests by Flat Dilatometer. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 106(GT3) pp. 299-321.

Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., Calabrese, M. (2001): The DMT in soil investigations. A report by ISSMGE TC 16. *International Conference on In Situ Measurements of Soil Properties and Case Histories*, pp. 95-132.

McDowell P. W., Barker, R. D., Butcher, A. P. (2002): *Geophysics in engineering investigations*. Construction Industry Research and Information Association, CIRIA C562. London.

Mihalić Arbanas, S., Arbanas. Ž., Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Vivoda Prodan, M., Domlija, P., Jagodnik, V., Dugonjić Jovančević, S., Sečan, M., Peranić, J. (2017): Landslide risk reduction in Croatia: scientific research in the framework of the WCoE 2014-2017, IPL-173, IPL-184, ICL ABN. Sassa, K. et al. Eds. Proceedings of 4th World Landslide Forum. Ljubljana, Slovenija, 2017. Advancing Culture of Living with Landslides.

Nossa & District Landcare (2015): Keeping it in Kin Kin Priority Implementation Plan. Dostupno na: <https://noosalandcare.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/KIKK-Implementation-PlanFINAL.pdf>. Datum pristupa: 15.03.2022.

Ortolan, Ž., Mihalinec, Z. (1998): Plasticity index - indicator of shear strength and a major axis of geotechnical modelling. Proc. of the XIth Danube–European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, May 25–29, 1998, Poreč, 743–750, A.A. Balkema, Rotterdam.

Robertson, P. K. (2010): Soil Behaviour Type from the CPT: An Update. In 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, pp. 8.

Robertson, P.K., Cabal, K.L. (2014): Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering.

Schmertmann, J. H. (1991): Pressure Dissipation Tests. A-B-C vs A2 vs A. DMT Digest No. 12, Section 12C, Schmertmann Ed., Dec.

Strelec, S., Stanko, D., Gazdek, M. (2016): Empirical correlation between the shear-wave velocity and the dynamic probing heavy Test; Case study Varaždin, Croatia, Acta Geotechnica Slovenica (1854-0171). Vol. 13(1); pp. 3-15.

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

Szavits-Nossan, V. (2017): Geotehnički terenski istražni radovi. Materijali za predavanja iz kolegija Mehanika tla i stijena. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.

Špiranec, M., Grabar, K., Strelec, S. (2016): Određivanje klizne plohe in-situ pomoću dilatometarskog (DMT) istraživanja ("Kd metoda"), (Determination slip surface in situ by dilatometer (DMT) test ("Kd method")). Geotechnical aspects of damages caused by natural phenomena, 7th conference of Croatian Geotechnical Society with international participation, 10. – 12 .11.2016. Varaždin, Croatia.

Šumanovac, F. (2007): Geofizička istraživanja podzemnih voda. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Zagreb.

Telford, W. M. (1990): Applied Geophysics. 2nd Edition. Cambridge University Press, Cambridge.

Tofani, V., Bicocchi, G., Rossi, G., Segoni, S., D'Ambrosio, M., Casagli, N., Catani, F., (2017): Soil characterization for shallow land-slides modeling: a case study in the Northern Apennines (Central Italy). Landslides. Vol. 14, pp. 755–770.

Totani, G., Calabrese, M., Marchetti, S., Monaco, P. (1997): Use of in situ flat dilatometer (DMT) for ground characterization in the stability analysis of slopes. Report of the ISSMGE Technical Committee 16. Proc. XIV ICSMFE. Session 1.2. Hamburg.

Varnes, D. J.(1996): Landslide Types and Processes, in Turner, A. K., and R.L. Schuster, Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, National Academy Press. Wasington, D.C

8. POPIS SLIKA

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 2.1. Utjecaj saturiranosti tla vodom na stabilnost kosine (prema Nossa i District Landcare, 2018) | 3 |
| Slika 2.2. Dijelovi klizišta (prema Disas-SHARE) | 3 |
| Slika 2.3. Blok na beskonačnoj kosini u graničnoj ravnoteži (prema Kliche, 2018) | 6 |
| Slika 2.4. Grafički prikaz teoretskih postavki metode Felleniusa | 7 |
| Slika 2.5. Grafički prikaz teoretskih postavki Bishopove pojednostavljene metode (Fine Ltd, 2014)..... | 9 |
| Slika 3.1. Električna otpornost nekih stijena, tla i minerala (prema Loke, 2021)..... | 11 |
| Slika 3.2. Wennerov raspored elektroda kod geoelektrične tomografije i nastanak pseudosekcije (prema Knödel i dr., 2007) | 12 |
| Slika 3.3. Princip MASW metode (prema EVEREST Geophysics) | 14 |
| Slika 4.1. Mjerni konus (sonda) bez mjerenja pornog tlaka, CPT (lijevo) i s mjerenjem pornog tlaka CPTu (desno) (Szavits-Nossan, 2017)..... | 16 |
| Slika 4.2. Dijagram raspodjele zona prema tipu ponašanja tla za normalizirane vrijednosti, SBTn dijagram ($Qt - Fr$) (prema Robertson, 2010) | 18 |
| Slika 4.3. Oprema za dilatometarsko istraživanje a) i detaljan prikaz sonde b) (ISSMGE, 2001) | 19 |
| Slika 4.4. Detektiranje klizne plohe na temelju indeksa KD (prema Totani i dr., 1997)..... | 21 |
| Slika 5.1. Uređaj ARES za geoelektrična istraživanja | 25 |
| Slika 5.2. a) izgled CPTu konusa, b) hidraulički stroj za utiskivanje tip: Pagani | 26 |
| Slika 5.3. Prikaz dijela klizišta u Samarici (čeoni dio zahvatio cestu)..... | 28 |
| Slika 5.4. Klizište Petrovsko s prikazom vlačne pukotine | 29 |
| Slika 5.5. Preklop geoelektričnog profila ERT-1 s CPTu-1 i CPT-2 sondama - klizišta Samarica..... | 30 |
| Slika 5.6. Preklop geoelektričnih profila ERT-1 i ERT-2 i rezultata DPL-3 sonde - klizište Petrovsko | 32 |
| Slika 5.7. Preklop MASW-1 profila i CPTu-2 sonde - klizište Samarica | 33 |
| Slika 5.8. Seizmički MASW-1 profil - klizište Petrovsko | 34 |
| Slika 5.9. Preklop SRS-1 profila s rezultatima DPL-2 sonde - klizište Petrovsko..... | 35 |
| Slika 5.10. Prikaz korigiranog otpora na šiljku Qt , normaliziranog koeficijenta trenja Fr , parametra pornog tlaka Bq i indeksa ponašanja Ic po dubini kod CPTu-1 i CPTu-2 sondi na klizištu Samarica - direktni ispis računalog programa GeoLogismiki..... | 36 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 5.11. Prikaz otpora na šiljku qt , koeficijenta trenja Rf , pornog tlaka u , indeksa tipa ponašanja tla Ic i SBTn dijagrama po dubini kod CPTu-1 sonde na klizištu Petrovsko - direktni ispis računalog programa GeoLogismiki | 38 |
| Slika 5.12. Prikaz rezultata istraživanja DMT-1 sondom - klizište Samarica..... | 39 |
| Slika 5.13. Prikaz rezultata istraživanja DMT-1 sondom - klizište Samarica..... | 40 |
| Slika 5.14. Prikaz rezultata DPH-1 udarne sonde - klizište Samarica | 41 |
| Slika 5.15. Prikaz rezultata DPL-2 udarne sonde - klizište Petrovsko..... | 42 |
| Slika 5.16. Dijagram korelacije indeksa plastičnosti sa vršnim i rezidualnim kutem unutrašnjeg trenja (Ortolan i Mihalinec, 1998) | 43 |
| Slika 5.17. Putanje procjeđivanja površinskih oborinskih voda sa kolnika preko prostora klizišta | 47 |
| Slika 5.18. Podjela klizišta prema kinematici pomaka..... | 48 |
| Slika 5.19. Oprema za statičko sondiranje (lijevo) i nedrenirane posmične čvrstoće na području kliznog tijela „B“ utvrđene CPTu-1, CPTu-2 i DMT-1 sondama (desno) – klizište Saamrica | 50 |
| Slika 5.20. Analiza stabilnosti kosine klizišta Samarica - karakteristični profil i model | 51 |
| Slika 5.21. Analiza stabilnosti kosine klizišta Samarica – sanirano stanje | 52 |
| Slika 5.22 Preklop geotehničkog profila ispod presjeka „ERT-1“ s DPL-2, CPTu-1 i DPL-3 sondama - klizište Petrovsko | 54 |
| Slika 5.23. Karakteristični profil „ERT-1“ i model tla korišten pri proračunu tla na klizanje - klizište Petrovsko | 54 |
| Slika 5.24. Preklop geotehničkog profila „GEO-1“ s DPL-3 i DPL-4 sondama - klizište Petrovsko | 55 |
| Slika 5.25. Karakteristični profil i model tla „GEO-1“ korišten pri proračunu tla na klizanje s prikazom minimalnog faktora sigurnosti – klizište Petrovsko | 56 |
| Slika 5.26. Karakteristični profil i tla korišten pri stabilnosti kosine kod saniranog stanja - klizište Petrovsko..... | 56 |
| Slika 5.27. Prikaz prijedloga sanacijskog rješenja - klizište Petrovsko | 58 |

9. POPIS TABLICA

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 2.1. Podjela klizišta ovisno o vrsti materijala u kojem nastaju (prema Varnes, 1996) | 4 |
| Tablica 3.1. Brzine P i S valova te gustoće određenih geomedija (prema McDowell i dr., 2002) | 13 |
| Tablica 4.1. Opis materijala unutar zona tla prema tipovima ponašanja definiranih SBTn dijagramom (Robertson, 2010) | 18 |
| Tablica 4.2. Klasifikacija tla na temelju indeksa materijala <i>ID</i> (prema Marchetti i dr. 2001) | 20 |
| Tablica 5.1. Kategorije tla na temelju električne otpornosti - klizište Samarica | 31 |
| Tablica 5.2. Kategorije tla na temelju električne otpornosti - klizište Petrovsko | 32 |
| Tablica 5.3. Kategorizacija tla prema seizmičnosti (Eurocode 8, HRN EN 1998-1:2011) | 46 |

10. POPIS I OBJAŠNENJE KORIŠTENIH KRATICA

CPT (Cone Penetration Test) - statički konusni penetrometar

CPTu (Cone Penetration Test, u - pore pressure) – statički konusni penetrometar s mjerenjem poreznog tlaka

DMT (Flat DilatoMeter Test) - plosnati dilatometar

DPH (Dynamic Probing Heavy) - teška udarna sonda

DPL (Dynamic Probing Light) - laka udarna sonda

ERT (Electrical Resistivity Tomography) - geoelektrična tomografija

MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) - višekanalna analiza površinskih valova

SRS (Shallow Refraction Seismic) - seizmička refrakcija

SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) - spektralna analiza površinskih valova

SBTn (normalized Soil Behavior Type) - normalizirani tip ponašanja tla

SPT (Standard Penetration Test) - standardni penetracijski pokus

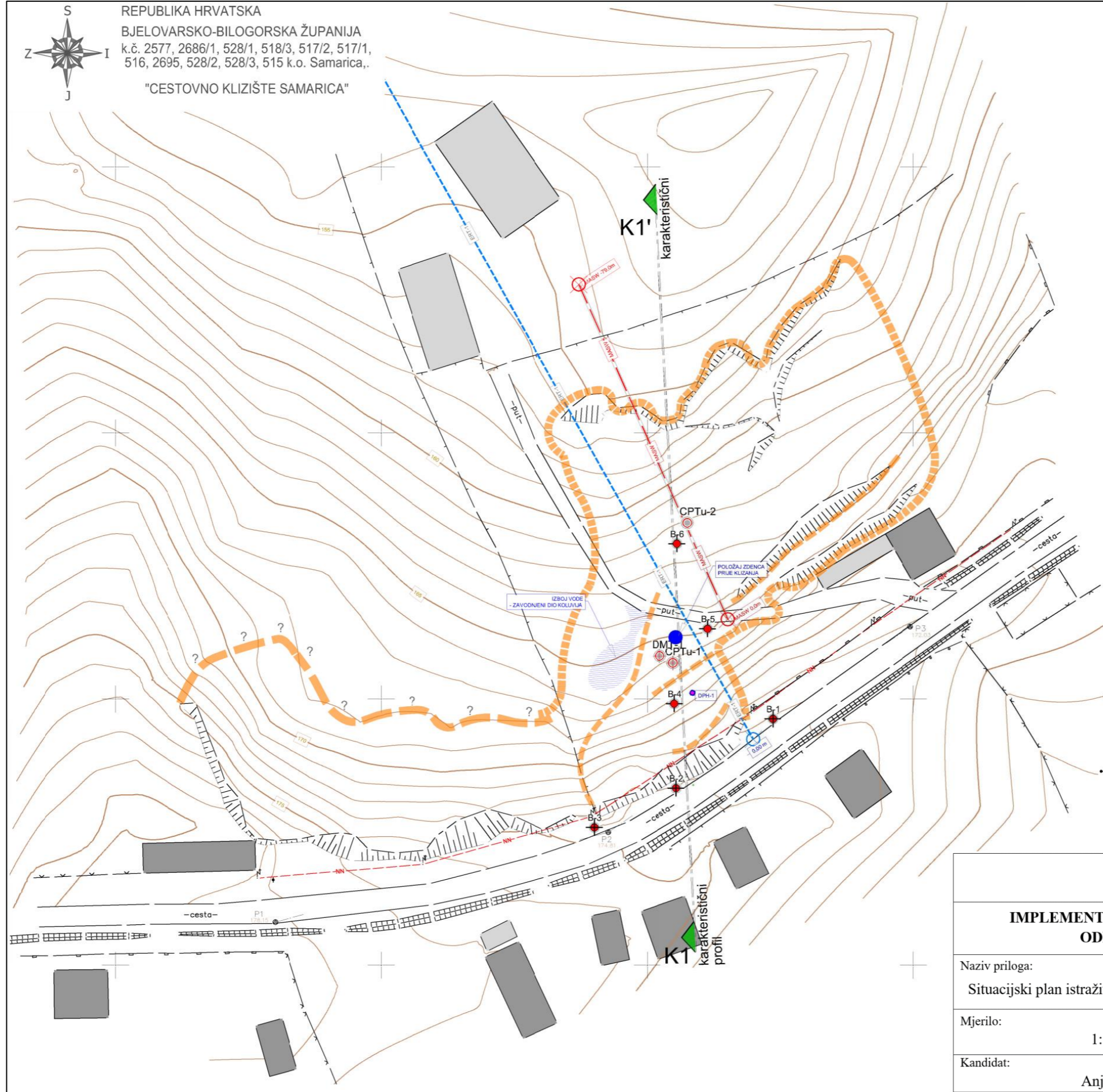
USCS (Unified Soil Classification System) - jedinstvena (objedinjena) klasifikacija tla

PRILOG br. 1

SITUACIJSKI PLAN ISTRAŽIVANJA - KLIZIŠTE SAMARICA



REPUBLIKA HRVATSKA
BJELOVARSKO-BILOGORSKA ŽUPANIJA
k.č. 2577, 2686/1, 528/1, 518/3, 517/2, 517/1,
516, 2695, 528/2, 528/3, 515 k.o. Samarica.,
"CESTOVNO KLIZIŠTE SAMARICA"



- TUMAČ OZNAKA
- B-1 - oznaka istražne bušotine
 - CPTu-2 - oznaka statičke sonde (CPTu ili DMT)
 - DPH-1 - oznaka dinamičke sonde (teška udarna sonda -DPH)
 - - oznaka postojećeg zdenca - nakon klizanja zatrpan
 - K1' - geotehnički profil tla
 - zavodnjena uvala
 - MASW-1 - seizmički profil MASW-1
 - ERT - oznaka geoelektrnog profila (ERT)

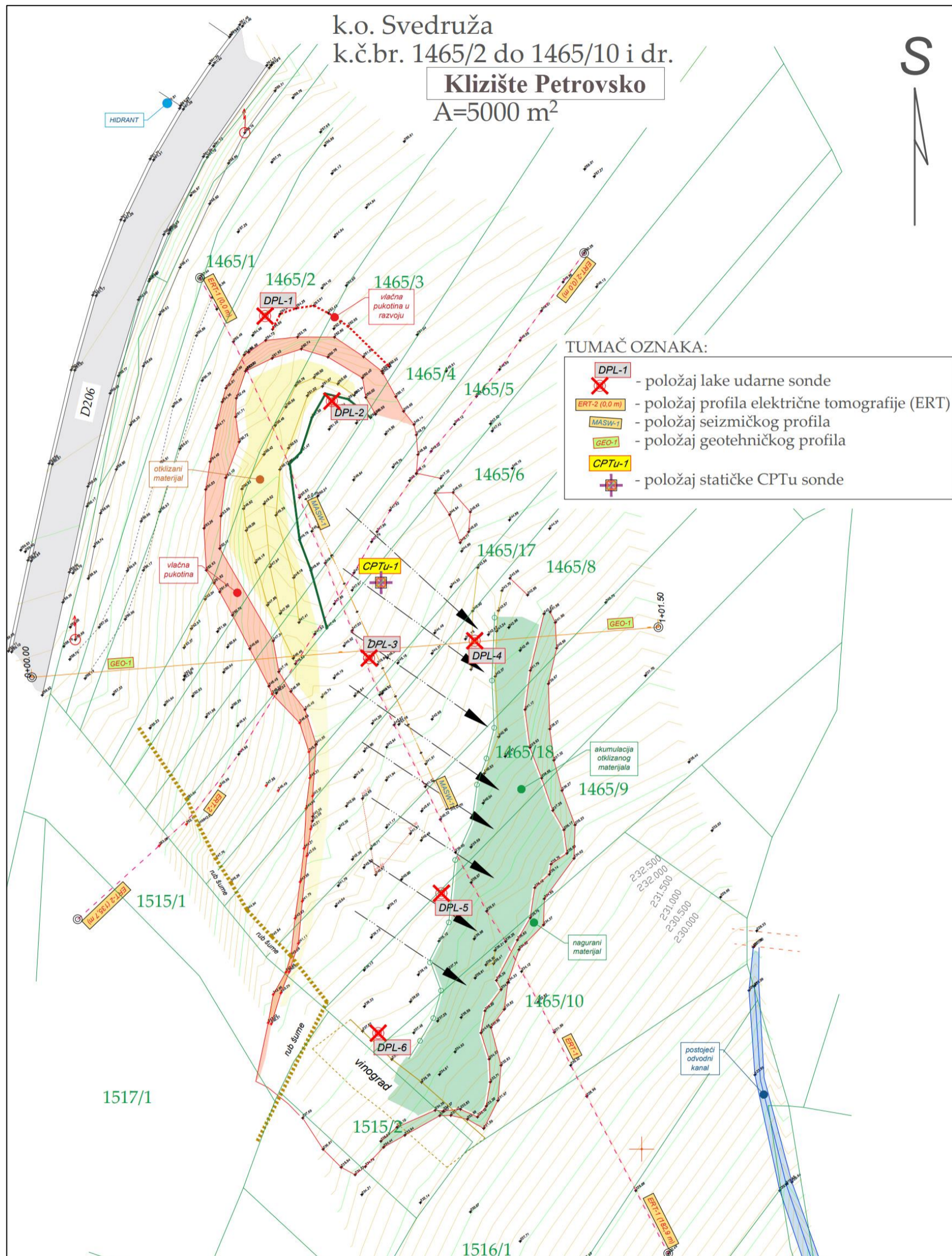
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Situacijski plan istraživanja - klizište Samarica | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: 1: 500 | Broj priloga: Prilog 1, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 2

SITUACIJSKI PLAN ISTRAŽIVANJA - KLIZIŠTE PETROVSKO

k.o. Svedruža
k.č.br. 1465/2 do 1465/10 i dr.

Klizište Petrovsko
A=5000 m²



TUMAČ OZNAKA:

- DPL-1 ✗ - položaj lake udarne sonde
- ERT-2 (0,0 m) - položaj profila električne tomografije (ERT)
- MASW-1 - položaj seizmičkog profila
- GEO-1 - položaj geotehničkog profila
- CPTu-1 - položaj statičke CPTu sonde

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU
ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA

| | |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Naziv priloga: Situacijski plan istraživanja – klizište Petrovsko | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: 1:400 | Broj priloga: Prilog 2, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 3

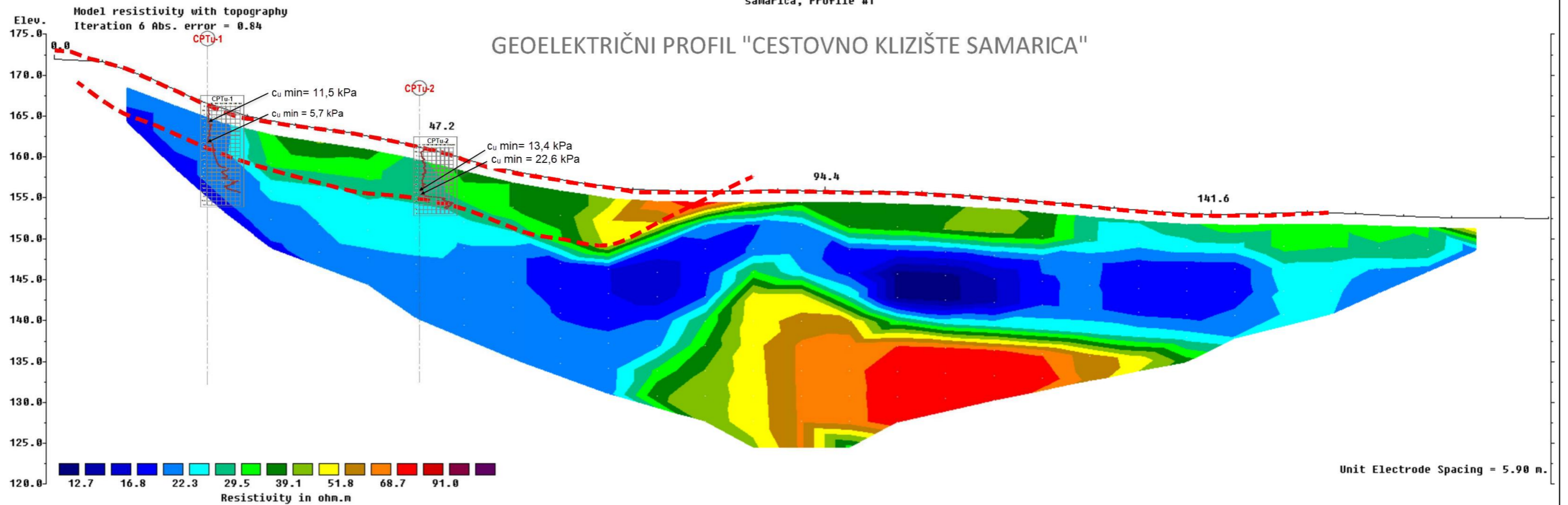
**PROFIL GEOELEKTRIČNE TOMOGRAFIJE (ERT) - KLIZIŠTE
SAMARICA**

REPUBLIKA HRVATSKA
 BJELOVARSKO-BILOGORSKA ŽUPANIJA
 k.č. 2577, 2686/1, 528/1, 518/3, 517/2, 517/1,
 516, 2695, 528/2, 528/3, 515 k.o. Samarica,
 "CESTOVNO KLIZIŠTE SAMARICA"

331°

samarica, Profile #1

GEOELEKTRIČNI PROFIL "CESTOVNO KLIZIŠTE SAMARICA"

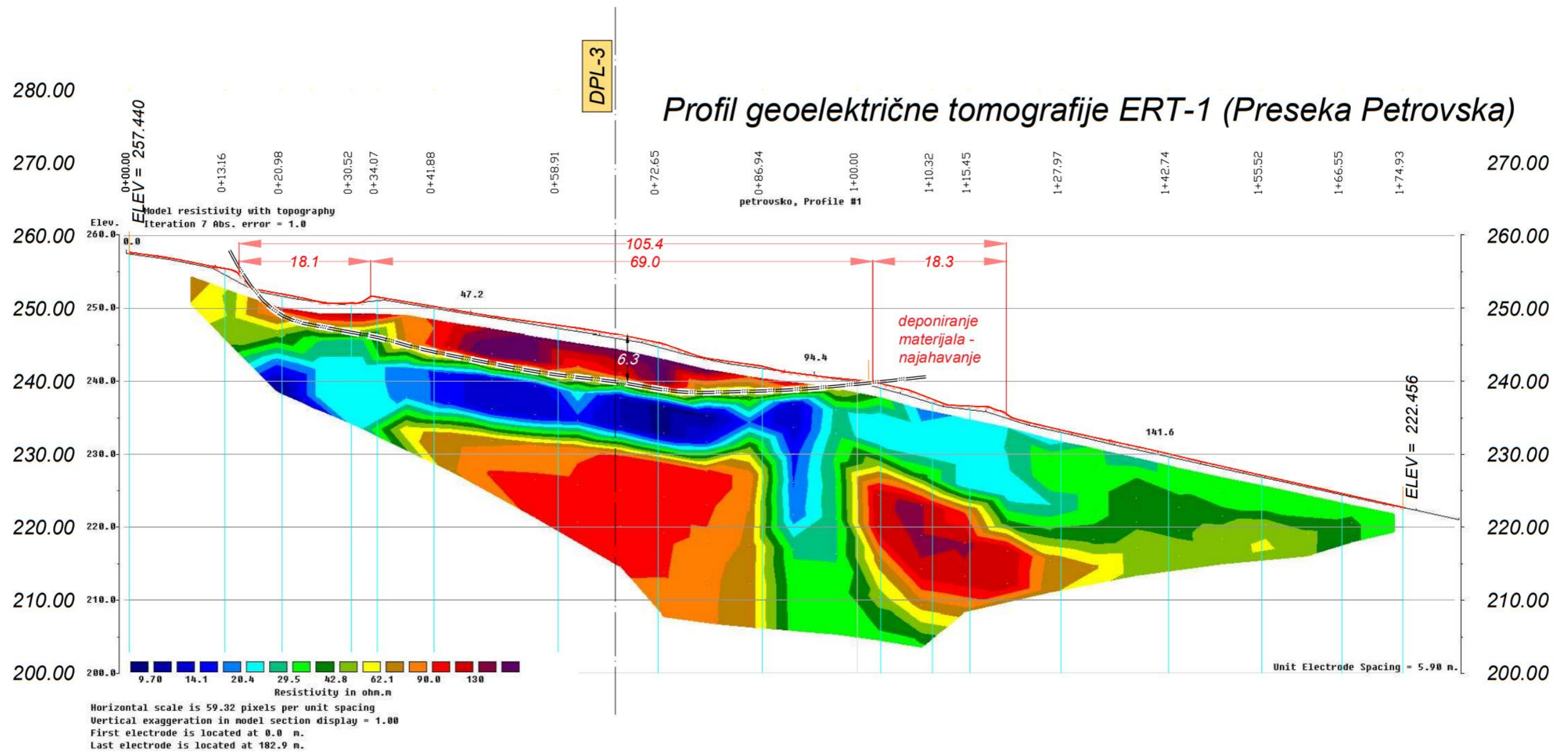


Horizontal scale is 59.32 pixels per unit spacing
 Vertical exaggeration in model section display = 1.00
 First electrode is located at 0.0 m.
 Last electrode is located at 182.9 m.

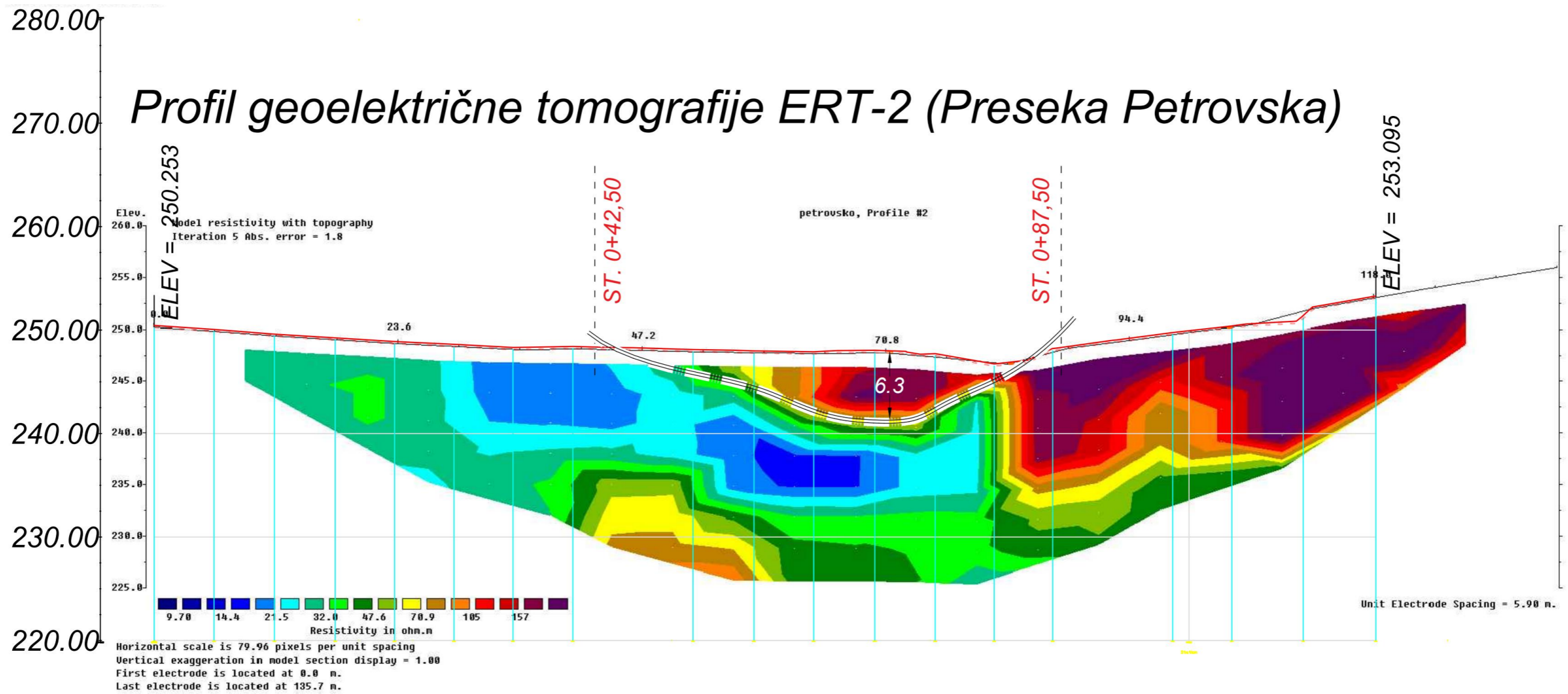
| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Geoelektrični profil (ERT) - klizište Samarica | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: 1: 500 | Broj priloga: Prilog 3, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 4

**PROFILI GEOELEKTRIČNE TOMOGRAFIJE (ERT-1 i ERT-2) –
KLIZIŠTE PETROVSKO**



| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Geoelektrični profil ERT-1 – klizište Petrovsko | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: 1:500 | Broj priloga: Prilog 4, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |



| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU | |
| GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Geoelektrični profil ERT-2 – klizište Petrovsko | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: 1:500 | Broj priloga: Prilog 4, List 2 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 5

SEIZMIČKI MASW PROFIL - KLIZIŠTE SAMARICA

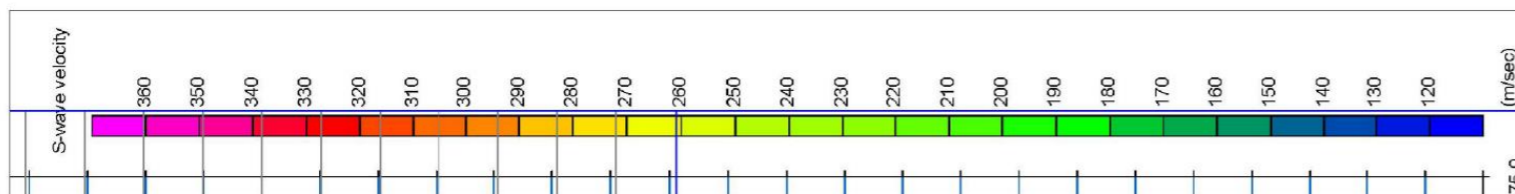
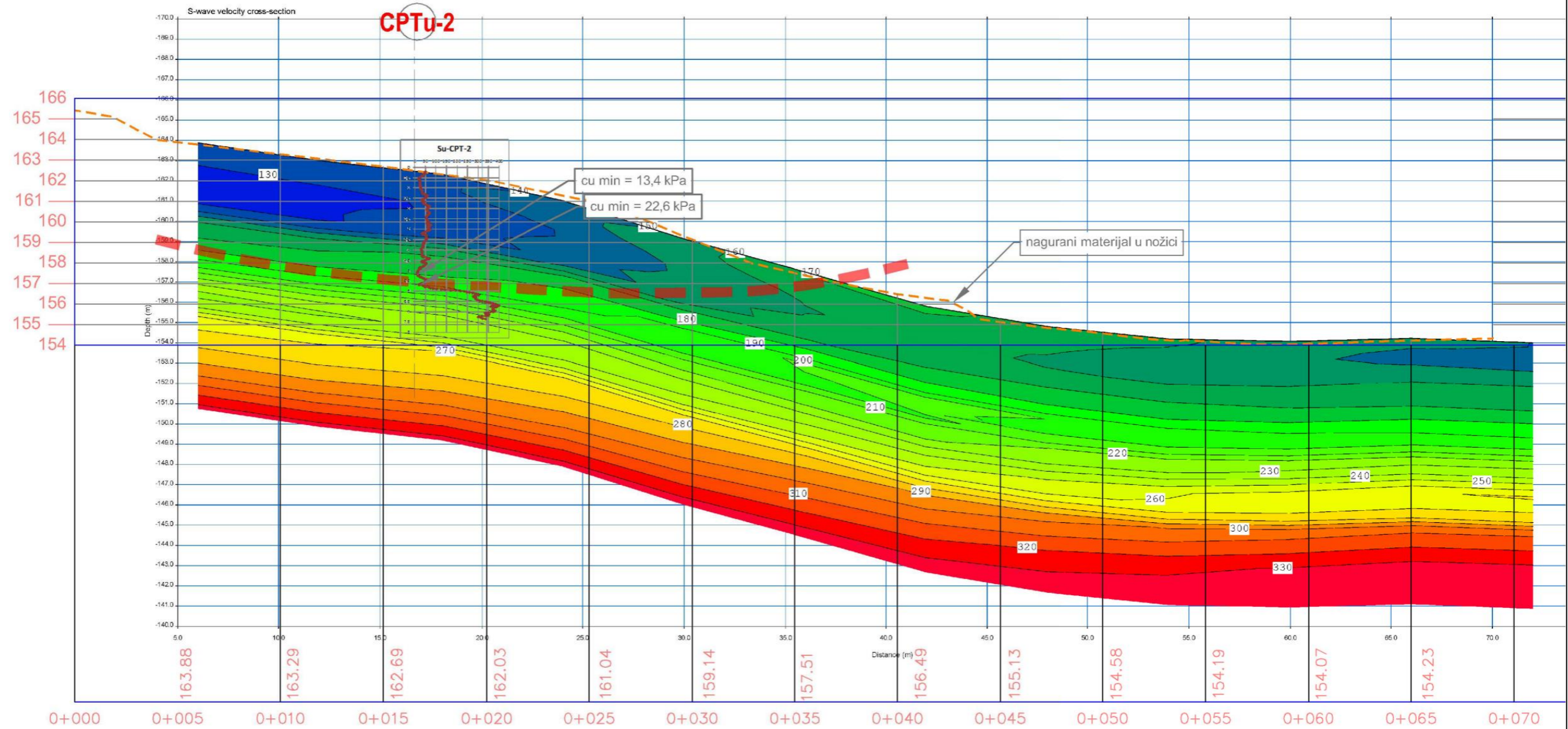
REPUBLIKA HRVATSKA

BJELOVARSKO-BILOGORSKA ŽUPANIJA

k.č. 2577, 2686/1, 528/1, 518/3, 517/2, 517/1,
516, 2695, 528/2, 528/3, 515 k.o. Samarica.

seizmički profil tla - MASW (V_s [m/s])

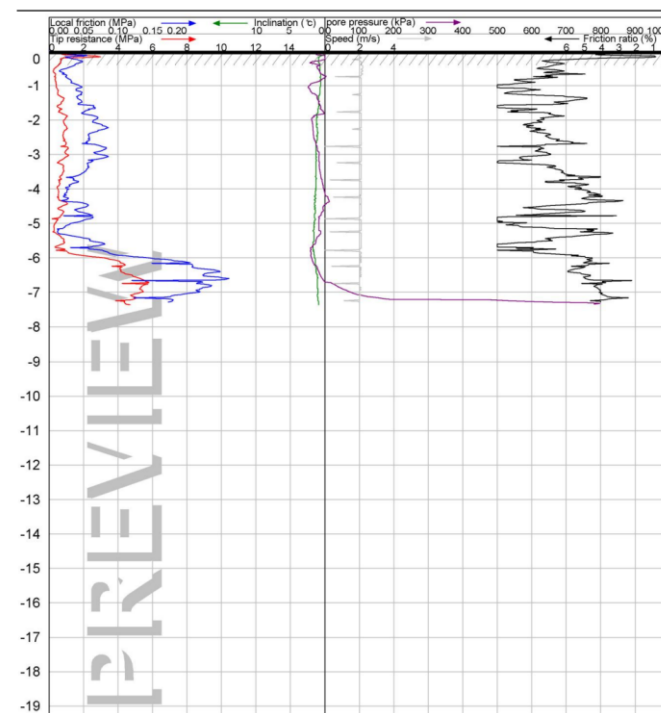
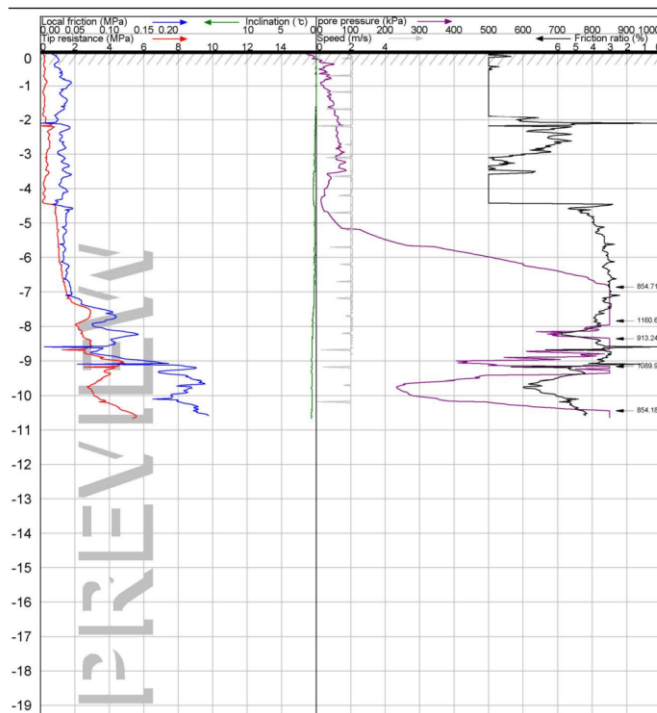
"CESTOVNO KLIZIŠTE SAMARICA"



| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Seizmički MASW profil - klizište Samarica | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: 1: 200 | Broj priloga: Prilog 5, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 6

**REZULTATI ISTRAŽIVANJA (DIREKTNI ISPIS IZ SOFTVERA)
CPTu-1 i CPTu-2 SONDE - KLIZIŠTE SAMARICA**

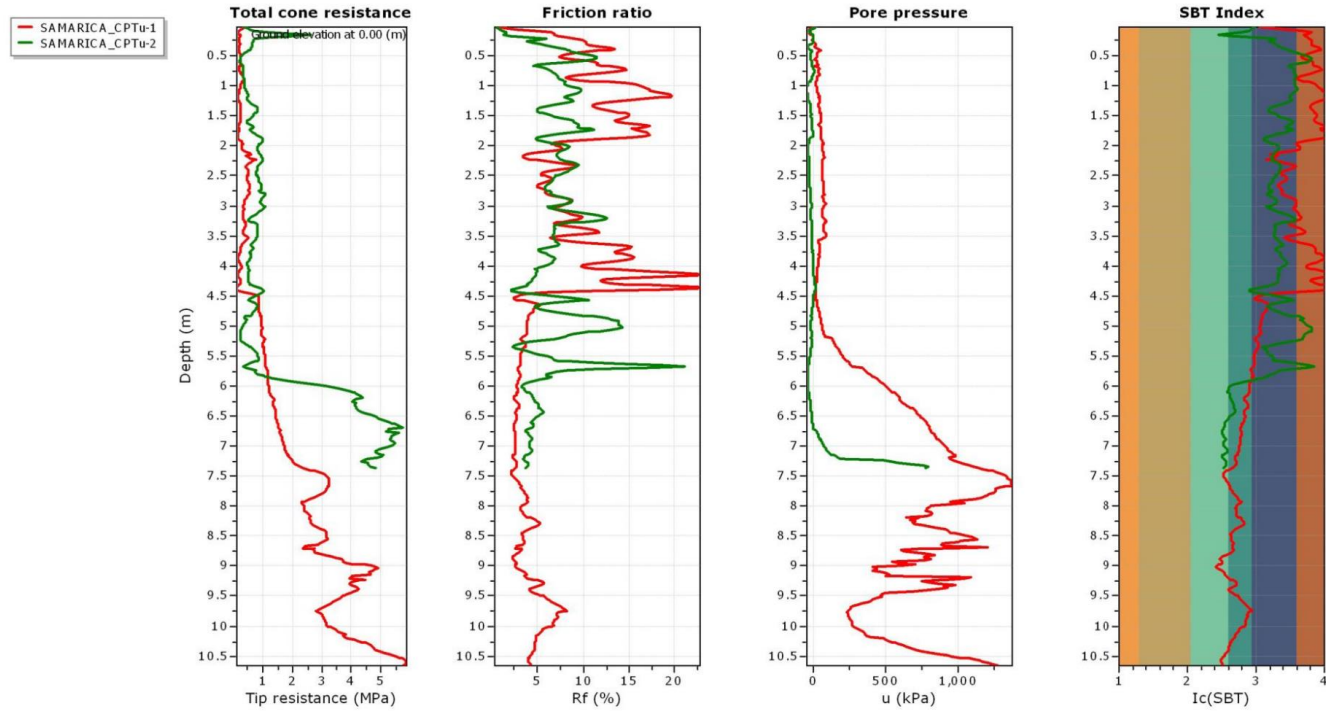


**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D
MODELA KLIZIŠTA**

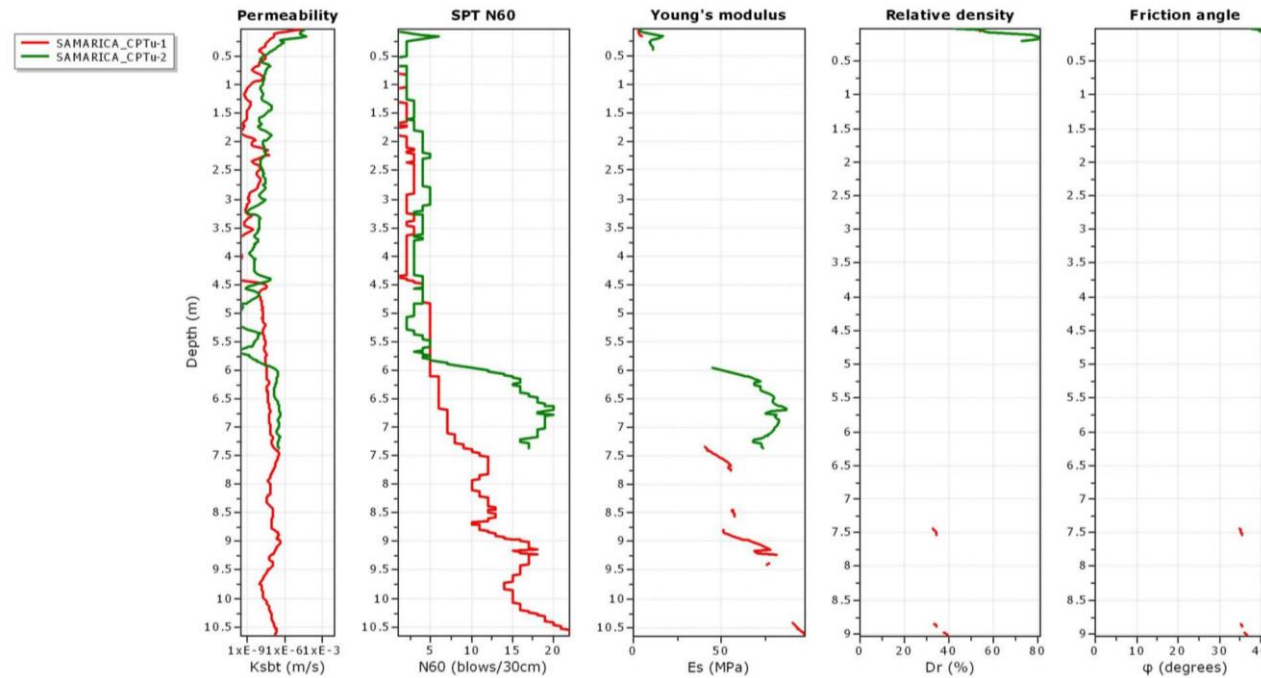
| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Naziv priloga: Prikaz neobrađenih podataka CPTu - 1 sonde (lijevo) i CPTu - 2 sonde (desno) - plava linija- lokalno trenje, zelena - inklinacija, crvena - otpor na vrhu šiljka, ljubičasta - porni tlak, siva - brzina, crna - trenje po plaštu | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 6, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

Overlay basic interpretation plots



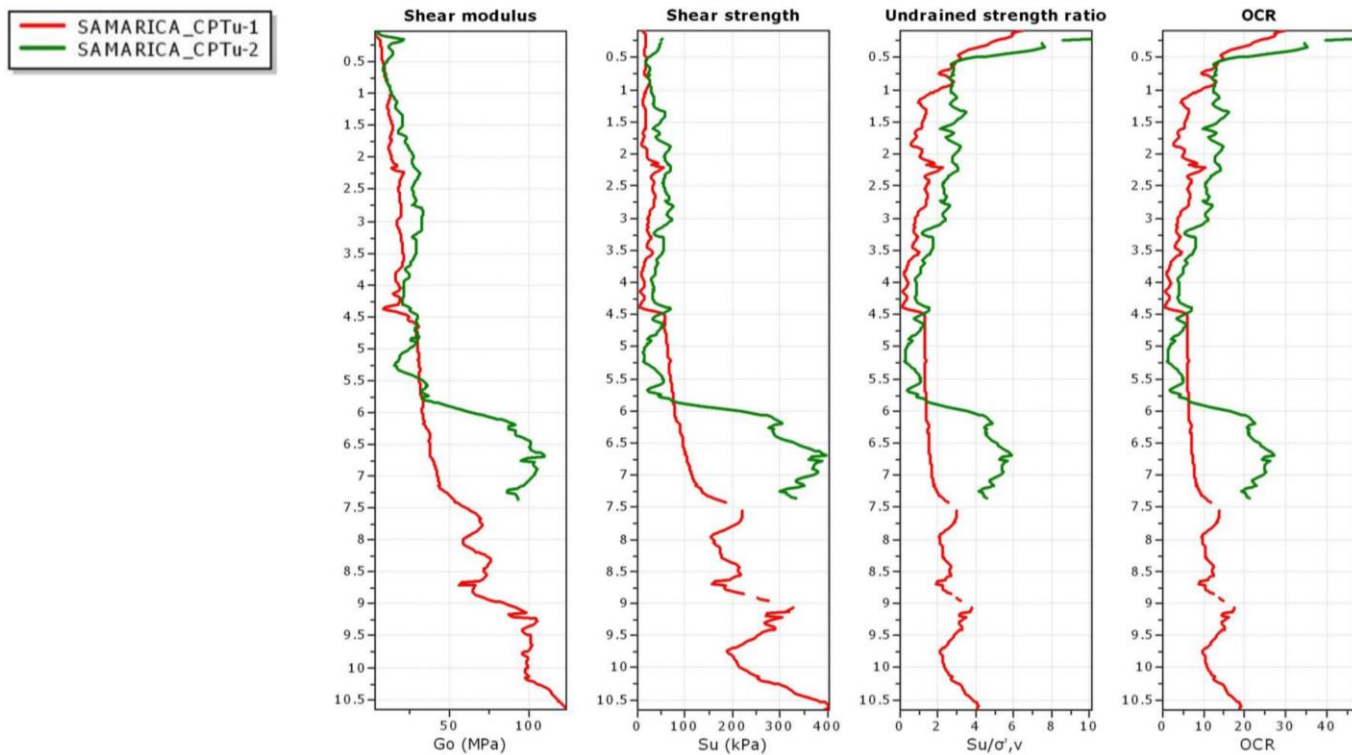
| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Prikaz otpora na šiljku q_c , koeficijenta trenja R_f , pomog tlaka u i indeksa tipa ponašanja tla I_c po dubini kod CPTu-1 i CPTu-2 sonde | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 6, List 2 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

Overlay estimation plots (1)

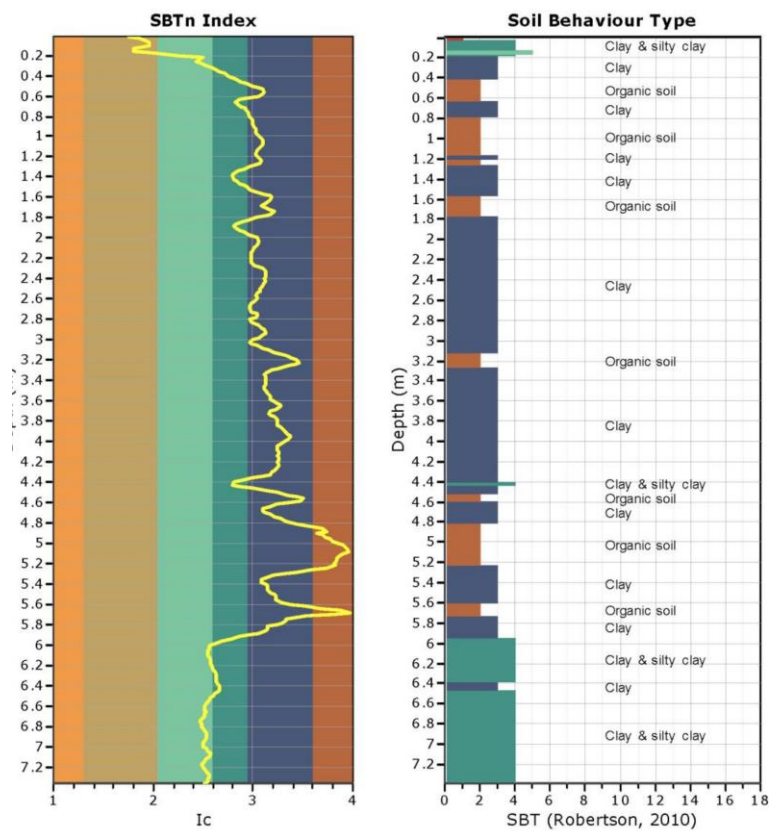
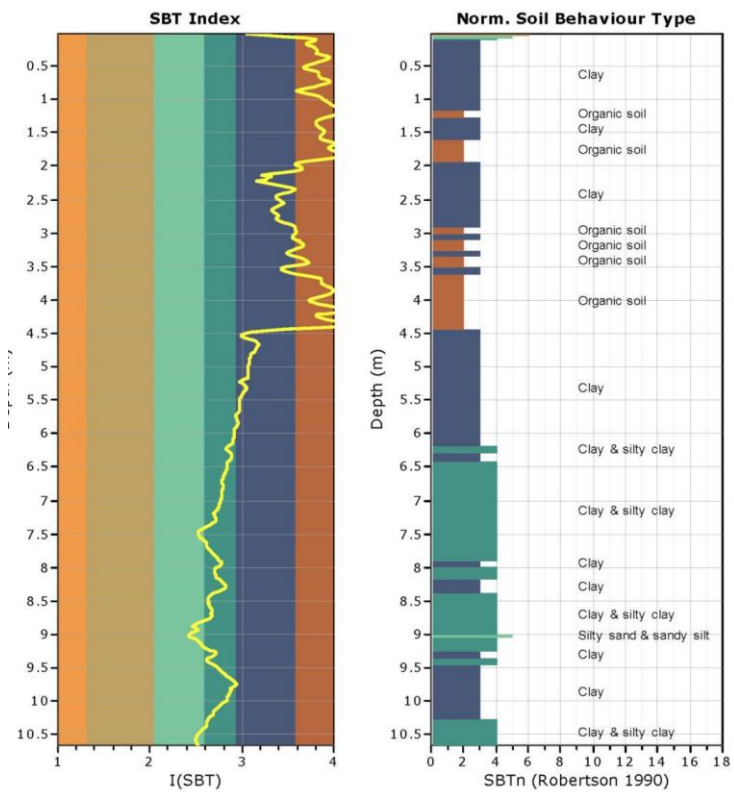


| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Prikaz koeficijenta vodopropusnosti, broja udaraca SPT pokusa N_{60} , Youngov-og modula elastičnosti E_s , relativne zbijenosti D_r , i kuta trenja φ po dubini kod CPTu-1 i CPTu-2 sonde | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 6, List 3 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

Overlay estimation plots (2)



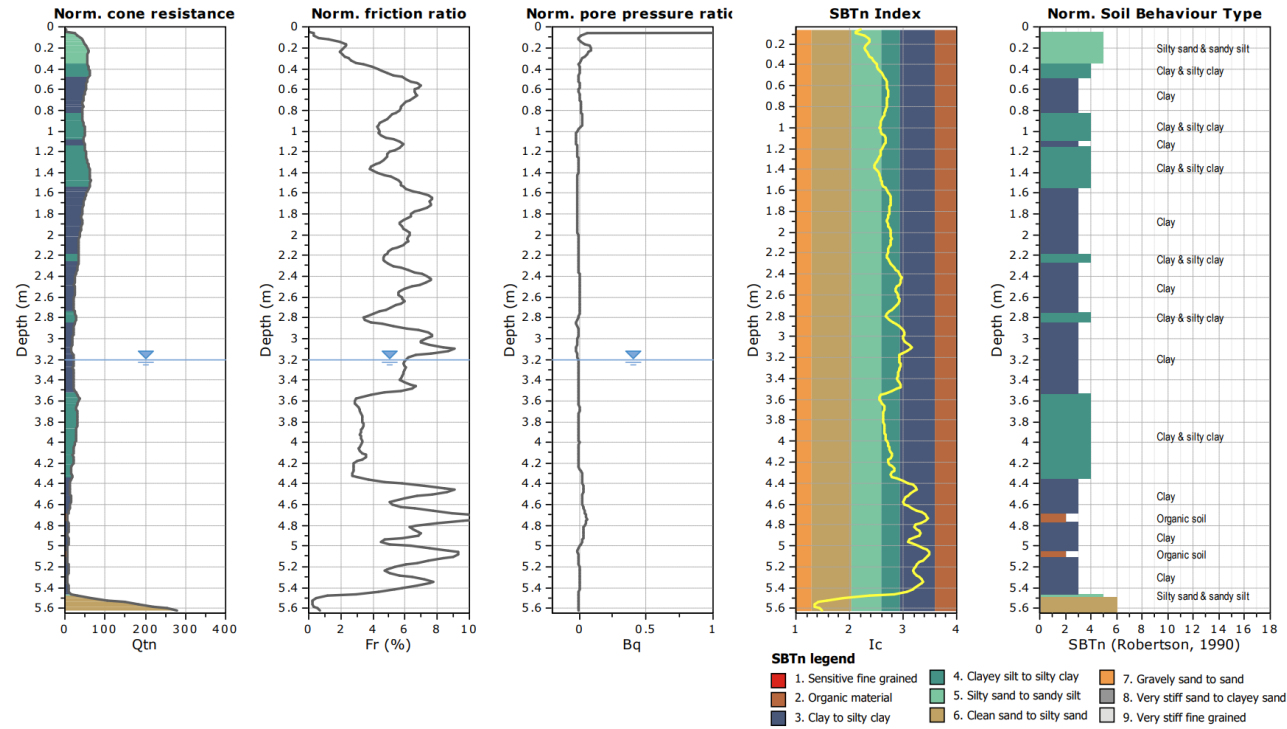
| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Prikaz posmičnog modula G_0 , nedrenirane posmične čvrstoće s_u , nedreniranog omjera čvrstoće s_u/σ'_v i koeficijenta prekonsolidacije OCR po dubini kod CPTu-1 i CPTu-2 sonde | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 6, List 4 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |



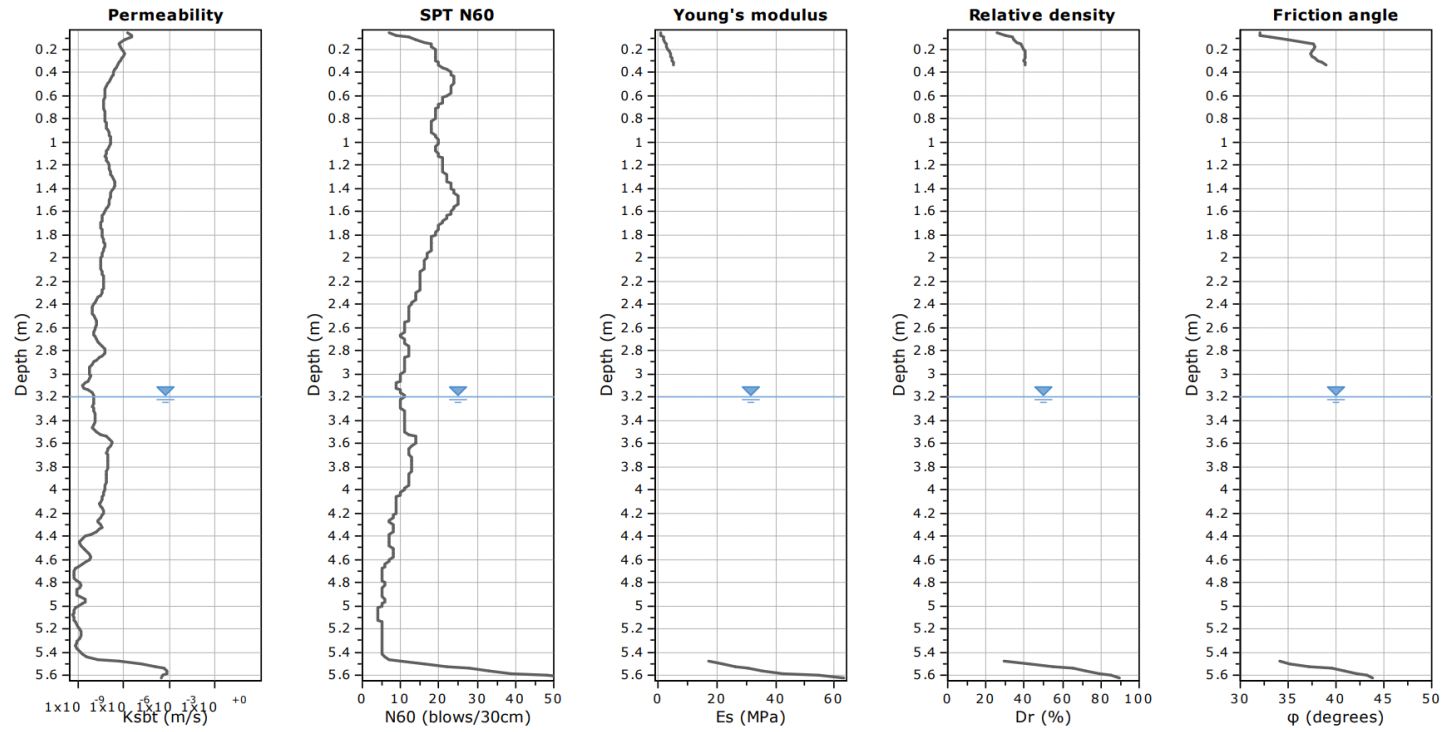
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Litoški profil tla iz rezultata sondiranja statičkom sondom CPTu-1 (lijevo) i CPTu-2 (desno) | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 6, List 5 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 7.

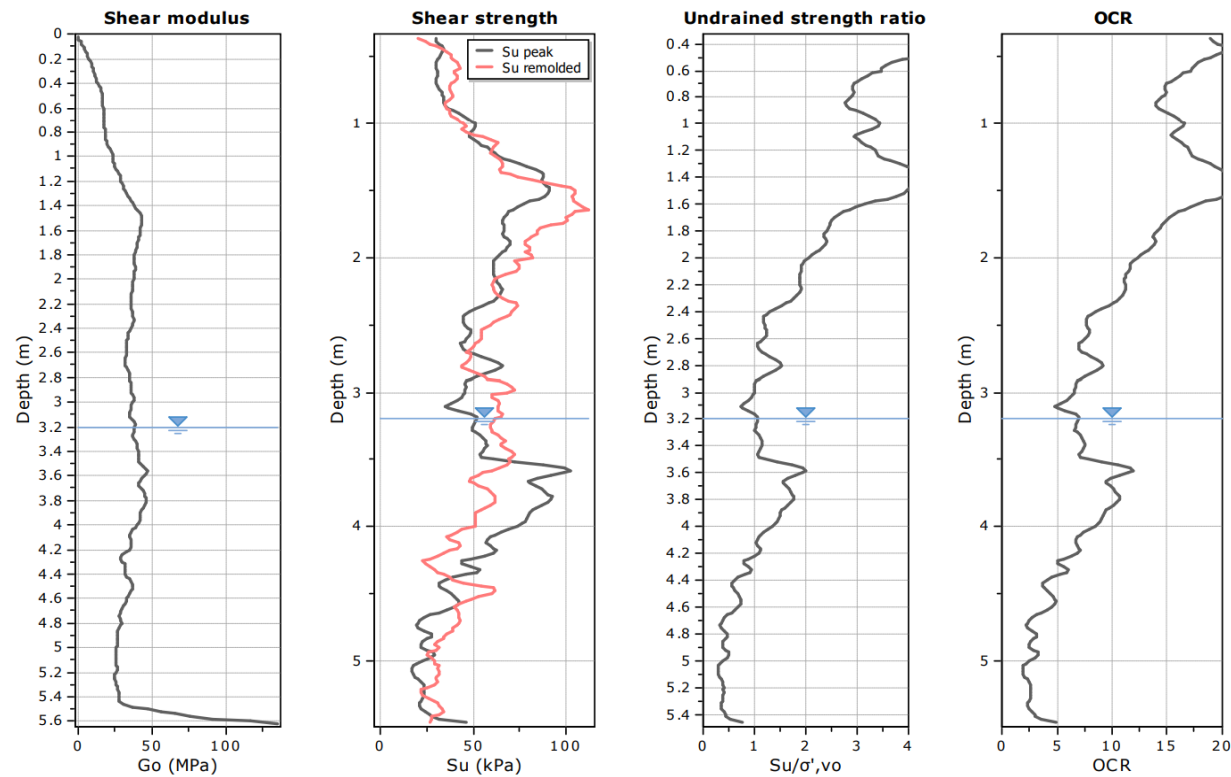
**REZULTATI ISTRAŽIVANJA (DIREKTNI ISPIS IZ SOFTVERA)
CPT_u-1 SONDE - KLIZIŠTE PETROVSKO**



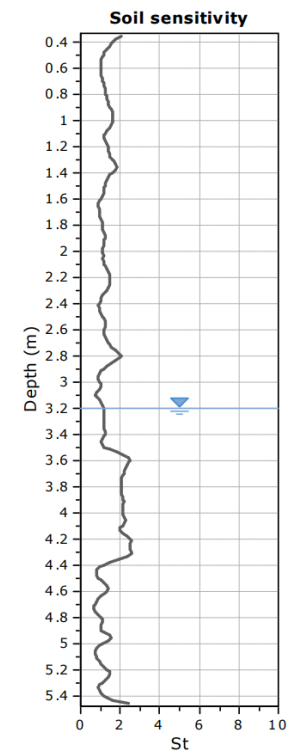
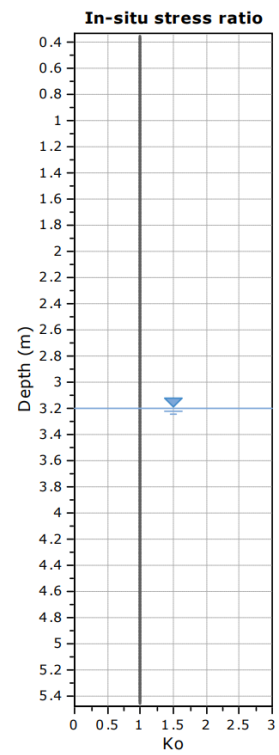
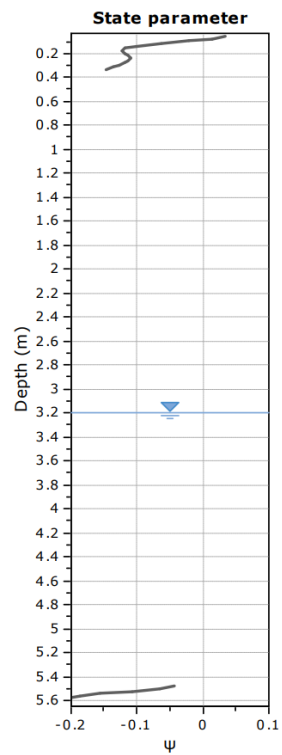
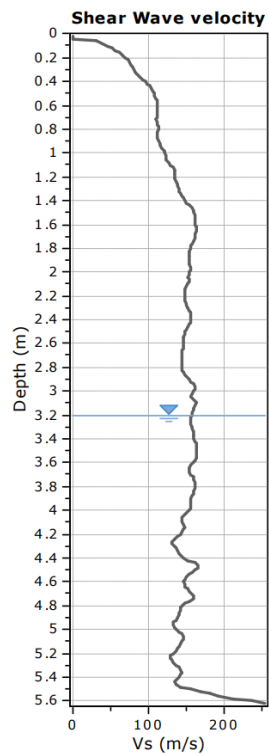
| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Prikaz bezdimenzionalnog neto otpora na šiljku Q_t , normaliziranog koeficijenta trenja F_r , normaliziranog pornog tlaka B_q i indeksa tipa ponašanja tla I_c po dubini te SBTn dijagrama | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 7, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |



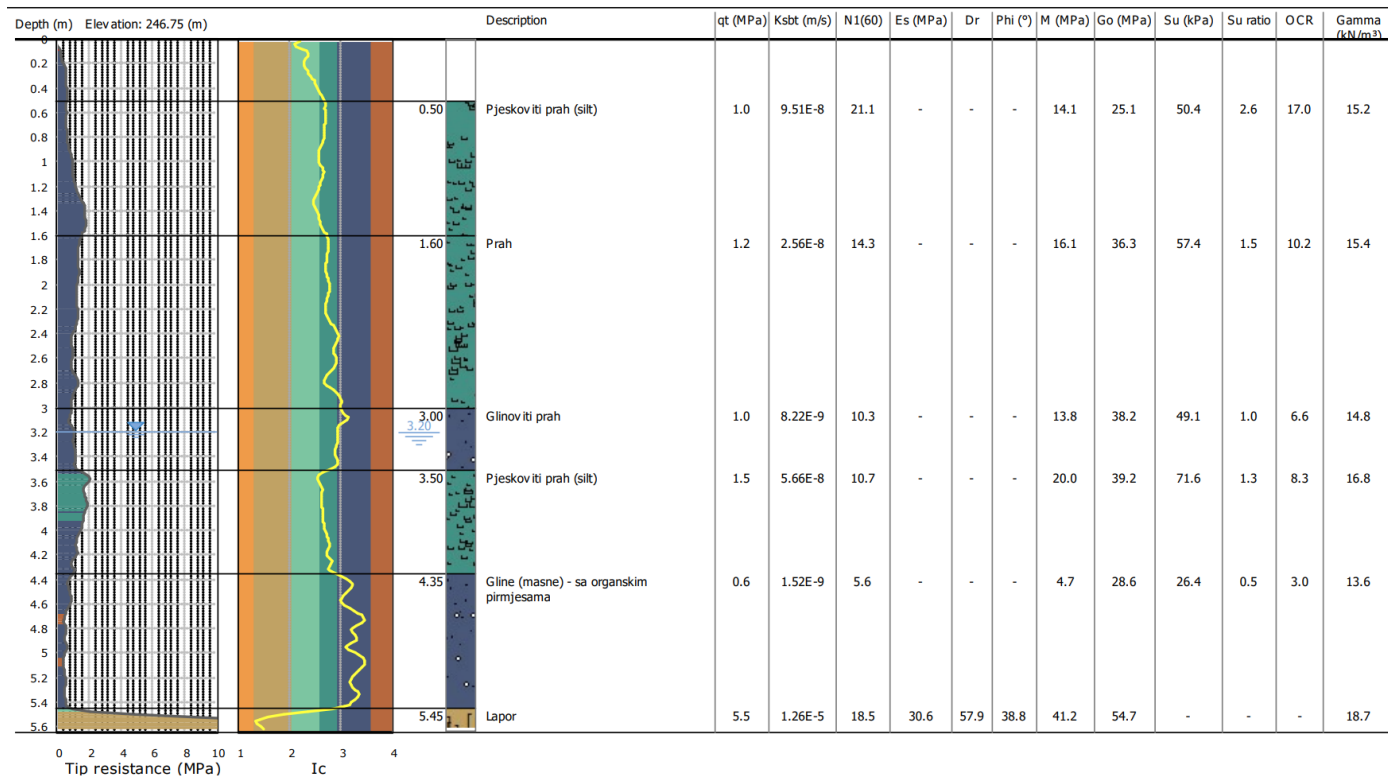
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Prikaz koeficijenta vodopropusnosti, broja udaraca SPT pokusa N_{60} , Youngov-og modula elastičnosti E_s , relativne zbijenosti D_r , i kuta trenja ϕ po dubini | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 7, List 2 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |



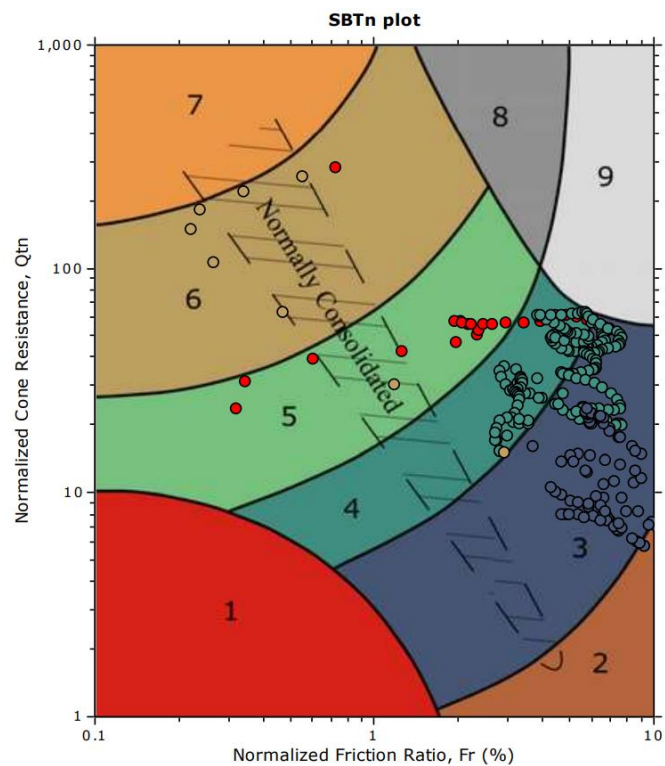
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Prikaz posmičnog modula G_0 , nedrenirane posmične čvrstoće s_u , nedreniranog omjera čvrstoće s_u/σ'_{v0} i koeficijenta prekonsolidacije OCR po dubini | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 7, List 3 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |



| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Prikaz brzine posmičnih valova v_s , parametra stanja ψ , koeficijenta tlaka mirovanja K_0 i osjetljivosti tla S_t po dubini | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 7, List 4 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |



| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Litološki profil tla iz rezultata sondiranja statičkom sondom CPTu-1 | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 7, List 5 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

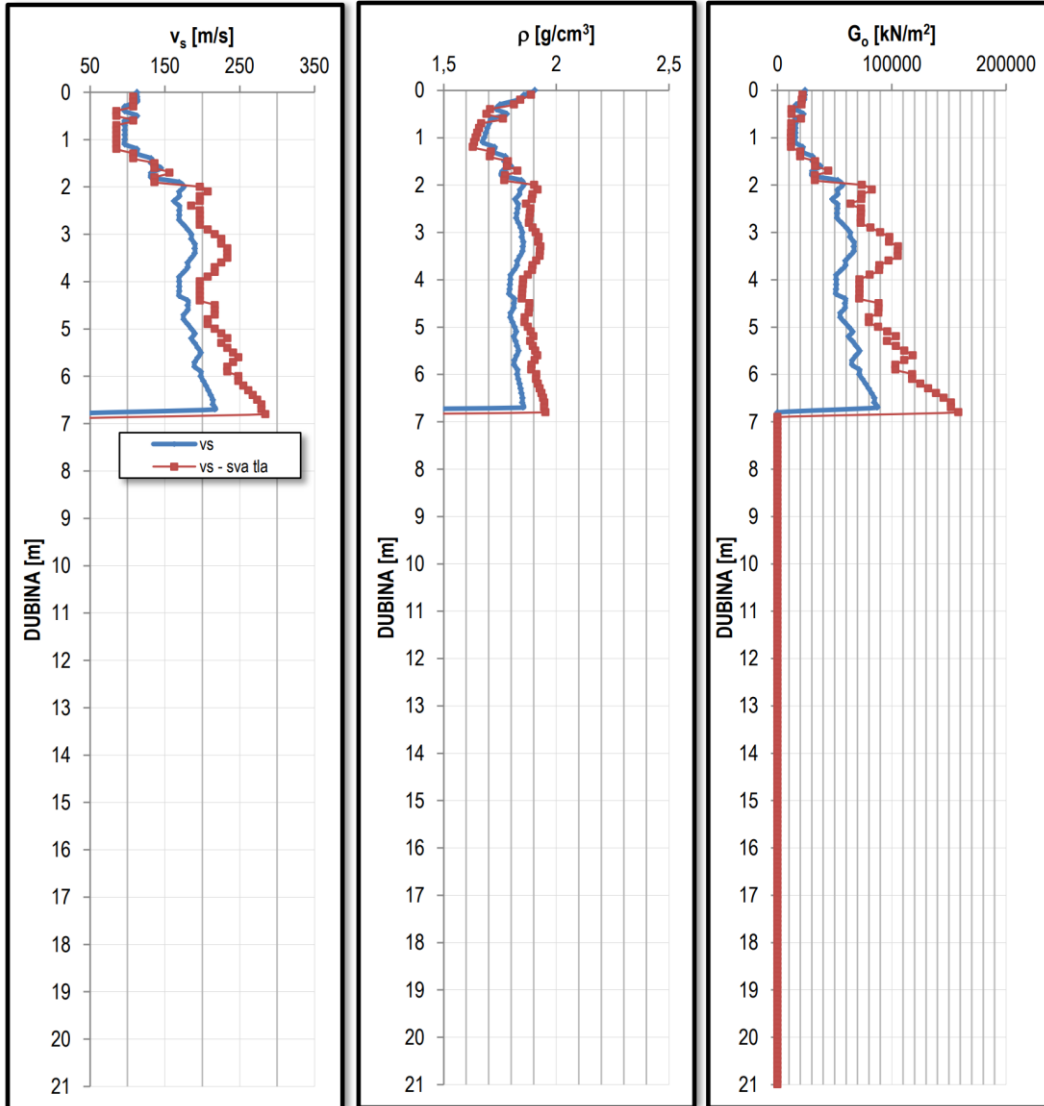


| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: SBTn dijagram raspodjele zona prema tipu ponašanja tla na temelju dobivenih rezultata | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 7, List 6 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 8
REZULTATI UDARNIH SONDI

DPH (TUS) - TEŠKA UDARNA SONDA (HRN EN ISO 22476-2:2008)

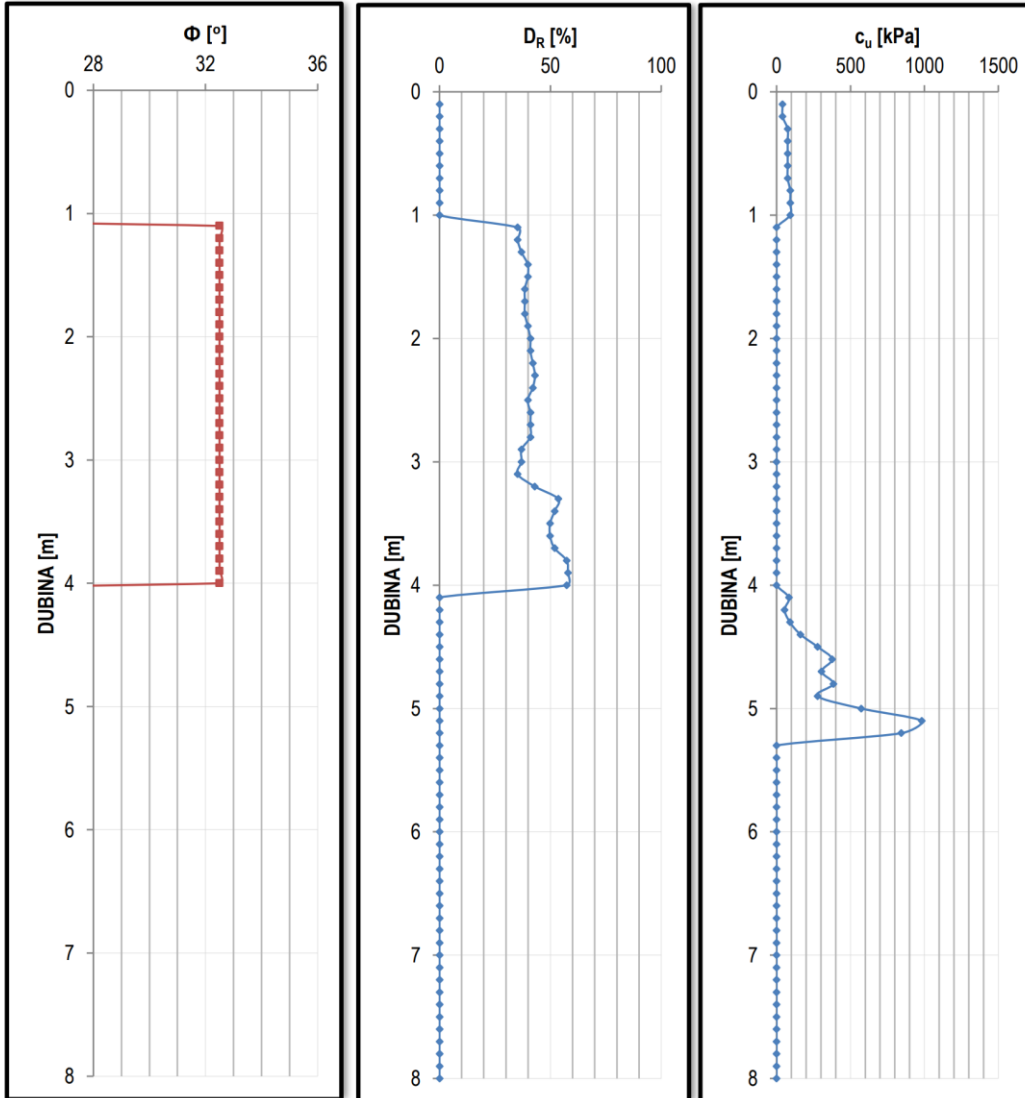
| | |
|--------------|--------------------------------------------------------|
| Oznaka : | DPH-1 |
| Građevina: | CESTOVNO KLIZIŠTE SAMARICA |
| Mjesto : | Samarica, LC37069 |
| Investitor : | |
| Sadržaj : | ODREĐIVANJE BRZINE I KRUTOSTI TLA NA OSNOVI DPH |



| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Rezultati ispitivanja teške udarne sonde DPH-1 - klizište Samarica | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 8, List 2 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

DPL (LUS) - LAKA UDARNA SONDA (HRN EN ISO 22476-2:2008)

| | | |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Oznaka : | DPL-2 | |
| Građevina: | Klizište "Preseka - Petrovsko" | |
| Mjesto : | Preseka - Petrovsko | |
| Investitor : | | |
| Sadržaj : | ODREĐIVANJE INDEKSA ZBIJENOSTI (D_R) I KUTA TRENJA TLA (Φ) | |



| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Rezultati ispitivanja lake udarne sonde DPL-2 - klizište Petrovsko | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 8, List 4 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 9

**SONDAŽNI PROFILI BUŠOTINA I FOTO PRILOZI
JEZGRA - KLIZIŠTE SAMARICA**

| | | |
|---------------------|----|-------|
| Građevina: KLIZIŠTE | | |
| Lokacija: SAMARICA | | |
| Bušotina: B - 3 | | |
| Koordinate: | x: | y: z: |

| Dubina (m) | Oznaka | OPIS SLOJEVA | Dubina (m) | SPT graf | | | Uzorak | Sadržaj vlage | | | Kut unutrašnjeg trenja | kohezija | Ic | RPV | Zbijenost (nekoher. tla) Konzistencija (koheren. tla) |
|------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|---|----|--------|---------------|----|------|------------------------|----------|----|---------------------|----------------------------------------------------------|
| | | | | udaraca/stopa | 5 | 10 | | 15 | Wp | 0 | | | | | |
| 0 | | Površina terena | 0 | | | | | | | | | | | | |
| -0.5 | | Nasip | -0.5 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | Glina niske plastičnosti (CL) Glina niske plastičnosti, srednje do kruto plastičnog stanja, žuto-smeđe boje. Karakteristično za ovaj interval je porozna, šupljikava struktura glina, te provlaženost gotovo u cijelom intervalu. | | | | | ■ | ○ | | 26.1 | 9.4 | 0.85 | | kruto pl. konz. st. | |
| 5 | | | -5.4 | | | | ■ | ○ | | 26.5 | 13.8 | 0.78 | | kruto pl. konz. st. | |
| 7 | | | | | | | ■ | ○ | | 28.8 | 8.6 | 0.86 | | kruto pl. konz. st. | |
| 10 | | Glina niske plastičnosti (CL) Glina niske plastičnosti, kruto plastične konzistencije, žuto-smeđe boje. Gline su tanko proslojene sivom glinom - "šare gline". | | | | | ■ | ○ | | | | 0.89 | | kruto pl. konz. st. | |
| 13 | | | | | | | ■ | ○ | | | | 1.0 | | kruto pl. konz. st. | |
| -15 | | Kraj bušotine | -15 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Sondažni profil bušotine B-3 | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 9, List 2 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |



B-1 (0.00 – 5.00)



B – 3 (0.00 – 5.00)



B-1 (5.00 -10.00)



B – 3 (5.00 – 10.00)



B-1 (10.00 – 15.00)

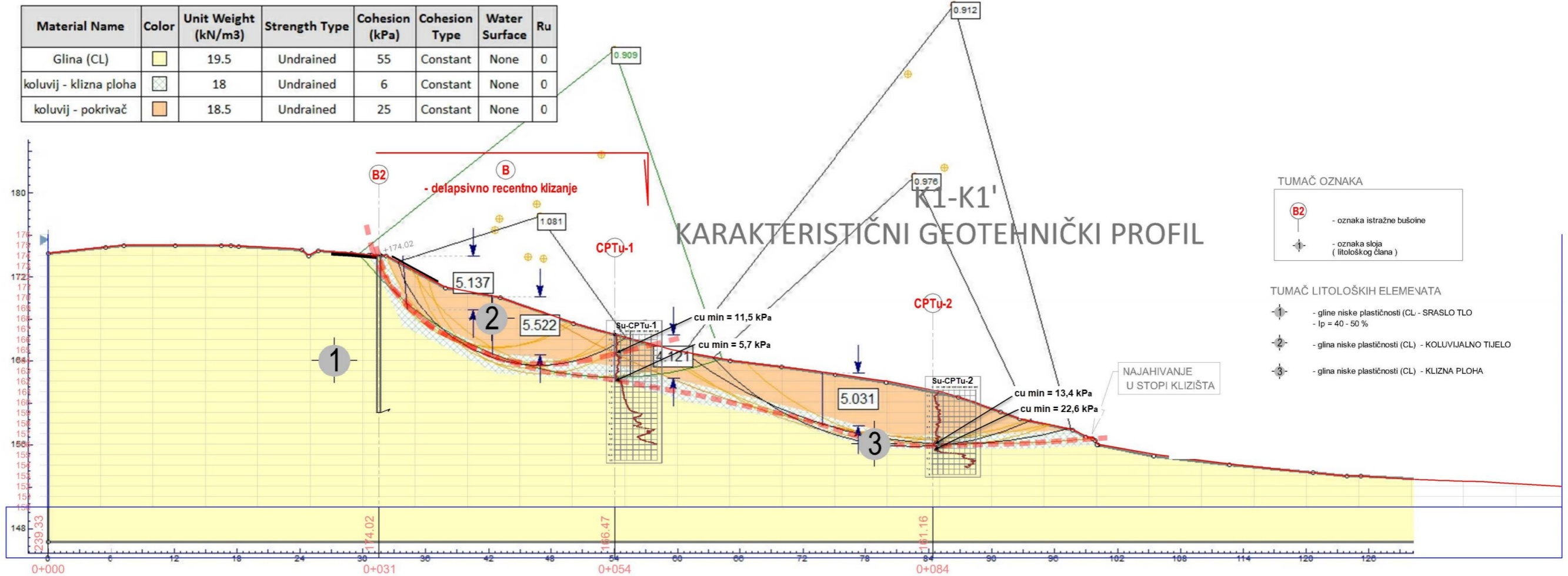


B – 3 (10.00 – 15.00)

| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Foto prilog jezgri iz bušotina B-1 i B-3 | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: - | Broj priloga: Prilog 9, List 3 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 10

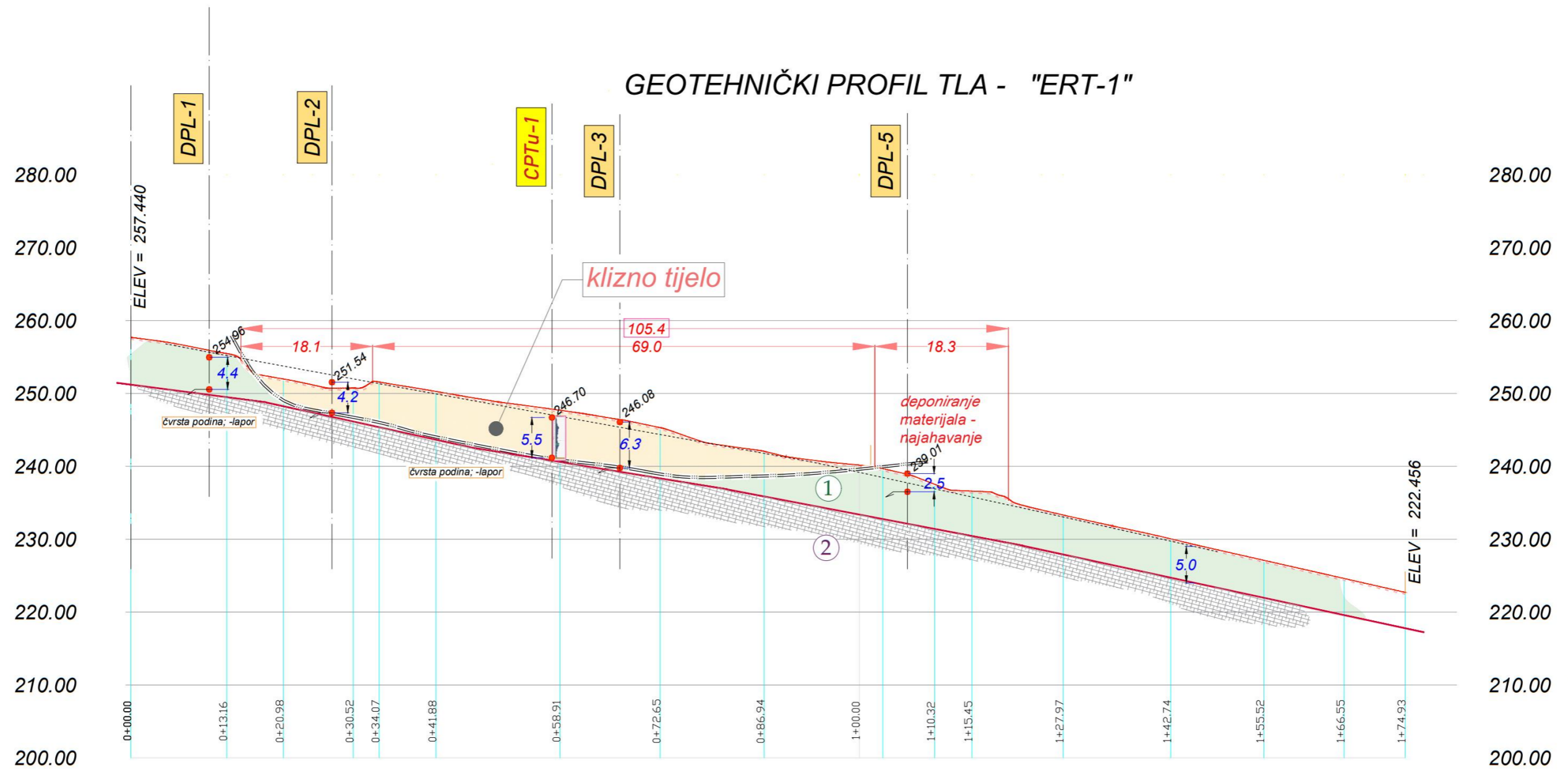
GEOTEHNIČKI PROFIL TLA – KLIZIŠTE SAMARICA



| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Karakteristični geotehnički profil - klizište Samarica | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: 1:300 | Broj priloga: Prilog 10, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 11

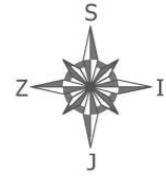
GEOTEHNIČKI PROFIL TLA „ERT-1“ – KLIZIŠTE PETROVSKO



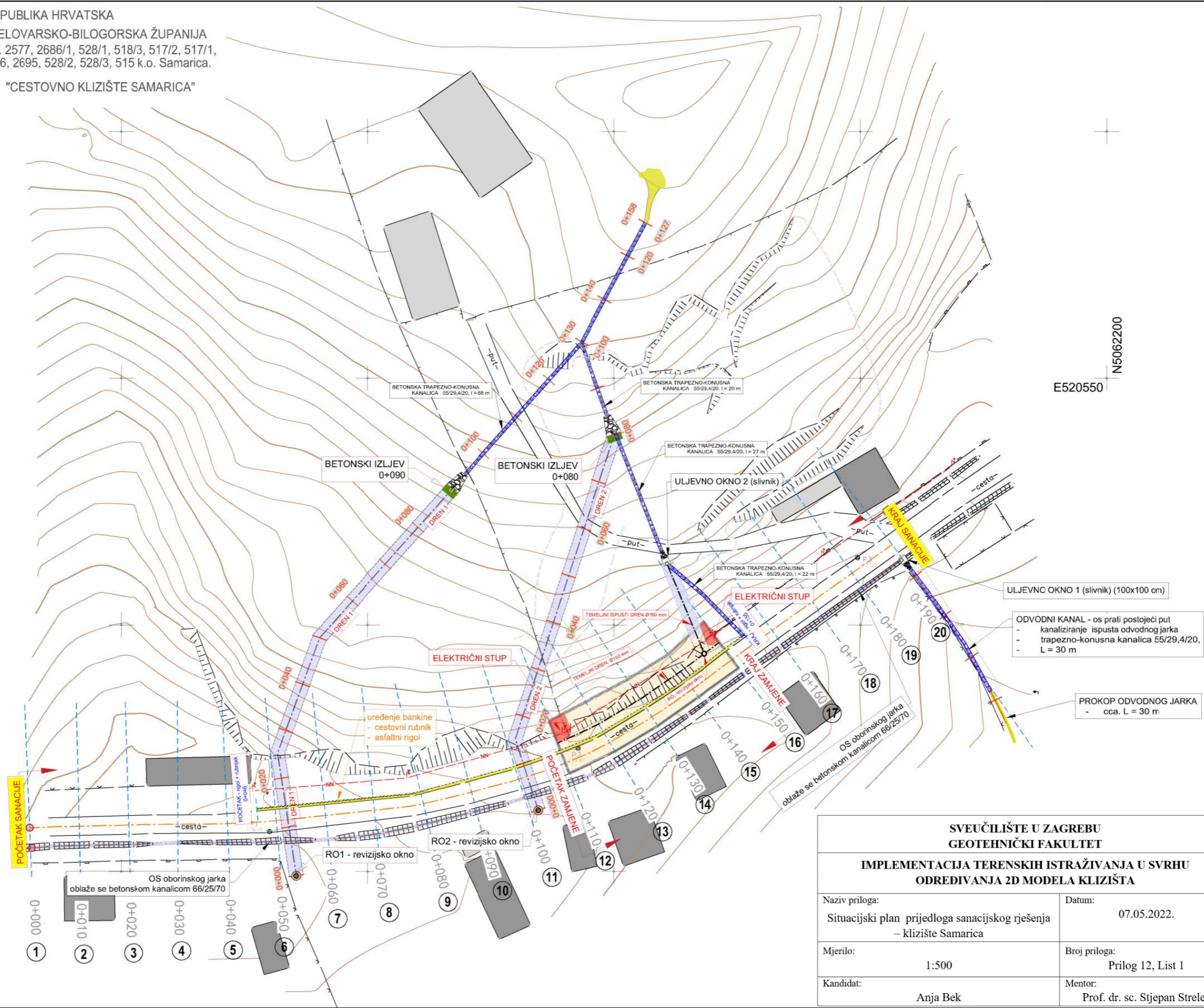
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA | |
| Naziv priloga: Geotehnički profil tla „ERT-1“ - klizište Petrovsko | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: 1:400 | Broj priloga: Prilog 11, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |

PRILOG br. 12

**SITUACIJSKI PLAN PRIJEDLOGA SANACIJSKOG RJEŠENJA -
KLIZIŠTE SAMARICA**



REPUBLIKA HRVATSKA
BJELOVARSKO-BILOGORSKA ŽUPANIJA
k.č. 2577, 2686/1, 528/1, 518/3, 517/2, 517/1,
516, 2695, 528/2, 528/3, 515 k.o. Samarica.
"CESTOVNO KLIZIŠTE SAMARICA"



E520550
N5062200

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

**IMPLEMENTACIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA U SVRHU
ODREĐIVANJA 2D MODELA KLIZIŠTA**

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Naziv priloga: Situacijski plan prijedloga sanacijskog rješenja – klizište Samarica | Datum: 07.05.2022. |
| Mjerilo: 1:500 | Broj priloga: Prilog 12, List 1 |
| Kandidat: Anja Bek | Mentor: Prof. dr. sc. Stjepan Strelec |