

# Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata in situ istraživanja - primjer klizišta u Krivaji

---

**Dregarić, Silvestar**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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:130:717647>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

SILVESTAR DREGARIĆ

IZRADA PROSTORNOG MODELA KLIZIŠTA NA  
TEMELJU REZULTATA IN SITU ISTRAŽIVANJA –  
PRIMJER KLIZIŠTA U KRIVAJI

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

IZRADA PROSTORNOG MODELA KLIZIŠTA NA  
TEMELJU REZULTATA IN SITU ISTRAŽIVANJA –  
PRIMJER KLIZIŠTA U KRIVAJI

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

Silvestar Dregarić

MENTOR:

Prof. dr. sc. Stjepan Strelec

VARAŽDIN, 2019.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: SILVESTAR DREGARIĆ  
Matični broj: 189 - 2017./2018.  
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

IZRADA PROSTORNOG MODELA KLIZIŠTA NA TEMELJU REZULTATA IN SITU  
ISTRAŽIVANJA - PRIMJER KLIZIŠTA U KRIVAJI

Rad treba sadržati: 1. Uvod  
2. Klizišta  
3. Terenski istražni radovi  
4. Laboratorijska ispitivanja  
5. Rezultati istraživanja  
6. Analiza rezultata  
7. Zaključak  
8. Popis literature

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 15.04.2019.

Rok predaje: 05.09.2019.

Mentor:

Prof.dr.sc. Stjepan Strelec

Predsjednik Odbora za nastavu:

Dr.v. prof. dr. sc. Igor Petrović



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

**Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata in situ istraživanja –  
primjer klizišta u Krivaji**

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof. dr. sc. Stjepana Streleca**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljeni način, odnosno 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 obrazovanoj ustanovi.

U Varaždinu, 04.09.2019.

Silvestar Dregarić

(Ime i prezime)

66644382084

(OIB)



(Vlastoručni potpis)

## **SAŽETAK RADA**

**Autor:** Silvestar Dregarić

**Naslov rada:** Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata in situ istraživanja – primjer klizišta u Krivaji

Uz prometnicu u naselju Krivaja, zbog poremećaja stabilnosti na dijelu padine, došlo je do klizanja tla, odnosno do kretanja površinskog sloja, te se formiralo klizište. Da bi se odredio tip, dimenzije, aktivnost klizišta, te uzroci klizanja, provedeni su geotehničko-geofizički istražni radovi kombiniranom primjenom geoelektrične tomografije, istražnog bušenja i geotehničkih penetracijskih metoda (laka udarna sonda, dilatometar, krilna sonda i statički penetracijski test uz mjerenje pornog tlaka). Nakon provedenih terenskih ili in situ istražnih radova, ispitivanja su nastavljena u laboratoriju na poremećenim i neporemećenim uzorcima materijala iz bušotina. Istraživanjima je bilo vrlo važno utvrditi dubinu klizne plohe, te fizikalna i mehanička svojstva materijala kliznog tijela, kao i svojstva nepokrenute mase ispod klizne plohe. Dobiveni parametri poslužili su za proračun stabilnosti padine na klizanje prema metodi „Bishop“. Kao sprega svih provedenih istraživanja kreiran je prostorni model klizišta, te je predloženo sanacijsko rješenje koje predviđa dreniranje procjednih voda. Time će se uvelike poboljšati hidrogeološki uvjeti u tlu, s obzirom da su isti determinirani kao glavni razlog pojave nestabilnosti padine u Krivaji.

**KLJUČNE RIJEČI:** Klizište, terenski istražni radovi, stabilnost kosine, sanacija klizišta

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD.....  | 1  |
| 2. KLIZIŠTA.....  | 2  |
| 2.1. ZNAČAJKE KLIZIŠTA .....  | 2  |
| 2.1.1. Tipovi klizišta i dijelovi klizišta .....                      | 3  |
| 2.1.2. Aktivnost klizišta.....  | 5  |
| 2.1.3. Uzroci klizanja .....  | 8  |
| 2.2. STABILNOST KOSINA.....   | 10 |
| 2.2.1. Metode za određivanje stabilnosti kosina.....                  | 11 |
| 2.2.1.1. Bishopova pojednostavljena metoda .....                      | 13 |
| 2.3. STABILIZACIJA KLIZANJA .....                                     | 16 |
| 3. TERENSKI ISTRAŽNI RADOVI .....                                     | 18 |
| 3.1. GEOLOŠKI ISTRAŽNI RADOVI .....                                   | 18 |
| 3.2 . GEOFIZIČKI ISTRAŽNI RADOVI .....                                | 20 |
| 3.2.1. Geoelektrična tomografija .....                                | 21 |
| 3.3. GEOTEHNIČKA TERENSKA ISTRAŽIVANJA .....                          | 23 |
| 3.3.1. Istražno bušenje.....  | 26 |
| 3.3.2. Terenska istraživanja tla .....                                | 28 |
| 3.3.2.1. Standardni penetracijski pokus.....                          | 28 |
| 3.3.2.2. Laka udarna sonda.....                                       | 31 |
| 3.3.2.3. Plosnati dilatometar .....                                   | 33 |
| 3.3.2.4. Statički penetracijski pokus sa mjerenjem pornog tlaka ..... | 36 |
| 3.3.2.5. Krilna sonda.....  | 38 |
| 4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA.....                                    | 41 |
| 4.1. GRANICE KONZISTENCIJE .....                                      | 42 |
| 4.2. ODREĐIVANJE POSMIČNE ČVRSTOĆE .....                              | 46 |
| 4.2.1. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće.....                             | 47 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2.2. Uređaj za izravni posmik .....                  | 49 |
| 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA .....                        | 53 |
| 5.1. GEOLOŠKA GRAĐA TERENA .....                       | 53 |
| 5.1.1. Hidrogeološki uvjeti u tlu .....                | 53 |
| 5.2. GEOLEKTRIČNA TOMOGRAFIJA.....                     | 55 |
| 5.3. ISTRAŽNA BUŠENJA I TERENSKA ISPITIVANJA TLA ..... | 58 |
| 5.4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA .....                  | 64 |
| 5.4.1. Geomehaničke značajke materijala padine.....    | 67 |
| 5.5. STABILNOST PADINE NA KLIZANJE .....               | 68 |
| 6. ANALIZA REZULTATA .....                             | 70 |
| 6.1. RAZVOJ PROSTORNOG MODELA KLIZIŠTA .....           | 70 |
| 6.2. PRIJEDLOG SANACIJSKOG RJEŠENJA.....               | 72 |
| 7. ZAKLJUČAK .....                                     | 74 |
| 8. POPIS LITERATURE .....                              | 76 |
| Popis slika .....                                      | 79 |
| Popis tablica.....                                     | 80 |
| Popis i objašnjenje kratica korištenih u radu .....    | 81 |
| GRAFIČKI PRILOZI .....                                 | 82 |



## 1. UVOD

Klizišta uzrokuju velike materijalne štete, a izravno ili neizravno ugrožavaju i lokalnu zajednicu. U zadnje vrijeme se zbog ekstremnih hidroloških uvjeta na relativno malom području i u relativno kratkom vremenu aktiviraju mnogobrojna klizišta. Kako bi se pristupilo sanaciji klizišta potrebno je klizišta, ili potencijalna klizišta, najprije istražiti.

U ovom radu prezentirani su terenski istražni radovi i laboratorijska ispitivanja provedeni za potrebe sanacije nestabilnosti kolnika na nerazvrstanoj cesti u mjestu Krivaja. Izvedeni su terenski istražni radovi, počevši sa geološkim i geofizičkim istraživanjima, preko geotehničkih istraživanja in situ metodama, te do laboratorijskih ispitivanja (iz poremećenih i neporemećenih uzoraka iz istražnih bušotina radi utvrđivanja fizikalnih i mehaničkih svojstva tla). Geofizička istraživanja provedena su metodom geoelektrične tomografije. Programom istraživanja predviđeno je i izbušeno šest istražnih bušotina. U bušotinama je ispitana relativna zbijenost tla standardnim penetracijskim pokusom. Izvedeno je i statičko sondiranje CPTu sondom, te sondiranje DMT dilatometrom tipa Marchetti. Od in situ metoda također je izvedeno dinamičko sondiranje lakom udarnom sondom i mjerenje nedrenirane posmične čvrstoće krilnom sondom. Osim samih istražnih radova, u prvom dijelu rada teorijski su opisane i laboratorijske metode koje su korištene pri ispitivanjima uzoraka. Rezultati istraživanja prikazani su drugom dijelu rada kroz geofizičke presjeke, litološke opise (litološki raspored slojeva tla nastao identifikacijom i lab. ispitivanjem materijala iz sondažnih bušotina), te dijagrame penetracijskih in situ istraživanja, kao i povratne analize granične ravnoteže za stabilnost kosine klizišta. Nastali model klizišta rezultat je interpretacije svih rezultata istraživanja, a isti su doveli i do determinacije uzroka koji su pokrenuli nastanak samog klizišta. Prijedlog načina sanacije klizišta tema je završnog poglavlja ovog rada, prije samog zaključka.

## **2. KLIZIŠTA**

Geodinamičke pojave (fenomeni) su ona obilježja geološkog okoliša koja nastaju kao rezultat aktivnih geoloških procesa: erozije i akumulacije, eolskih procesa, klizanja, permafrosta, formiranja krških uvjeta, sufozije, volumnih promjena u tlu, seizmičke i vulkanske aktivnosti. Najčešći geodinamički proces je klizanje, nakon kojega kao posljedica ostaju klizišta. Klizište je dio padine na kojem je zbog poremećaja stabilnosti došlo do klizanja tla odnosno do kretanja površinskog sloja. Najčešći uzrok klizanja tla je promjena razine podzemnih voda, ali i promjena tokova površinskih voda, sezonske promjene vlažnosti i temperature zraka, tektonski poremećaji i potresi, krećenje vegetacije, promjena režima podzemnih voda, oblika padine ili opterećenja na tlu.

Klizanje je kretanja mase stijena ili tla niz padinu (Cruden, 1991). Ono uključuje sve pokrete na padinama, neovisno o mehanizmu pokreta. Klizanje je ili prirodan proces oblikovanja reljefa ili se javlja kao posljedica ljudskih aktivnosti koje narušavaju stabilnost padina u brežuljkasto-brdovitim područjima. To su vrlo raznovrsne pojave po obliku, veličini pokrenute mase, načinu, brzini kretanja i drugim svojstvima.

### **2.1. ZNAČAJKE KLIZIŠTA**

S obzirom da se pod nazivom 'klizanje' podrazumijevaju vrlo raznovrsne pojave po obliku, veličini pokrenute mase, načinu, brzini kretanja i drugim svojstvima, prilikom istraživanja klizišta potrebno je identificirati i opisati značajke klizišta (tip klizanja, dijelove klizišta, aktivnost klizišta, itd.) Da bi se klizišta mogla uspješno sanirati, potrebno je otkloniti uzroke koji su prouzročili klizanje.

### 2.1.1. Tipovi klizišta i dijelovi klizišta

Način distribucije kretanja pokrenute mase stijena/tala, tj. kinematika klizanja, jedan je od osnovnih kriterija za klasifikaciju klizišta. Prema mehanizmu kretanja razlikuje se pet tipova klizanja (Mihalić, 2008):

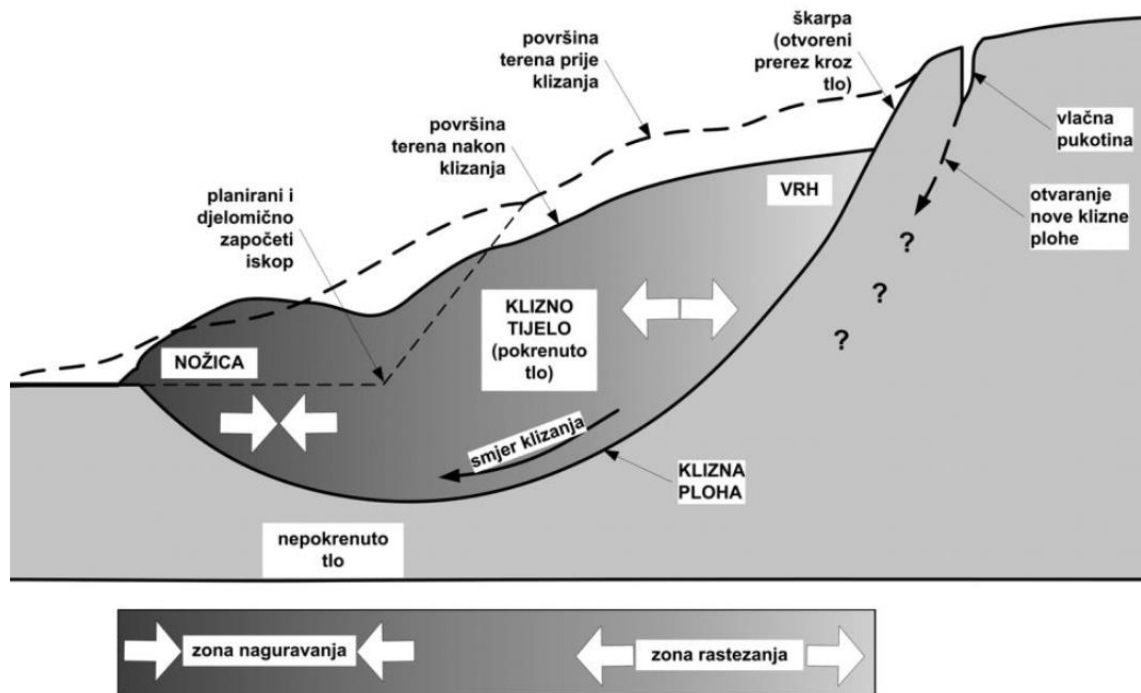
- Odronjavanje - Odvajanje mase sa strmih padina po površini, na kojoj ima malo ili uopće nema smicanja, već dolazi do slobodnog pada materijala, prevrtanja ili kotrljanja.
- Prevrtanje - Rotacija (prema naprijed) odvojene mase oko osi koja se nalazi u njezinoj bazi ili u blizini baze; ponekad može biti izraženo kao još međusobno prislonjeni odvojeni blokovi. Prevrtanje može prethoditi ili slijediti nakon odronjavanja ili klizanja.
- Klizanje - Kretanje manje ili više koherentne mase po jednoj ili više dobro definiranih kliznih ploha (ploha sloma).
- Razmicanje ili širenje - Glavni način kretanja je bočno razmicanje blokova uslijed kojega nastaju smičuće ili tenzijske pukotine.
- Tečenje - Raznovrsna kretanja sa znatnim varijacijama brzine i sadržaja vode, a iskazuje se kao prostorno kontinuirana deformacija. Tečenje često počinje kao klizanje, odronjavanje ili kao prevrtanje na strmim padinama, pri čemu dolazi do brzog gubitka kohezije pokrenutog materijala.

Različita priroda i ekstremna složenost procesa, različiti oblici kretanja i veliki broj drugih faktora koji utječu na formiranje i mehanizam klizišta doveli su do nastanka velikog broja klasifikacija i podjela. Danas je dostupno više od 200 različitih klasifikacija od kojih su neke od najvažnijih one od Savarenskog (1935), Terzaghija (1950) te do novijih kao što su Cruden i Varnes (1996).

1. Podjela prema dubini klizne plohe - Prema dubini klizne plohe klizišta se dijele na:
  1. površinska (<1m);
  2. plitka (1-5m);
  3. duboka (5-20m);

4. vrlo duboka (>20m).
2. Podjela prema mjestu nastanka na padini - Prema mjestu i uzroku nastanka klizišta se dijele na:
  1. delapsivna - klizište nastaje u nožici padine uslijed podsijecanja i razvija se (naviše) uz padinu;
  2. detruzivna - klizište nastaje u višim dijelovima padine, vrši pritisak na niže slojeve opterećujući ih i razvija se naniže.
3. Podjela prema vremenu nastanka - Prema vremenu nastanka klizišta se dijele na:
  1. primarna - na terenima koji nisu ranije bili zahvaćeni klizištima;
  2. sekundarna - u okviru terena koji je ranije bio zahvaćen klizanjem.
4. Podjela prema strukturi i sastavu padine - Prema strukturi i sastavu padine klizišta se dijele na:
  1. asekventna - u jednorodnim i neslojevitim tlima; nastala u istovrsnom materijalu s približno kružno-cilindričnim oblikom klizne plohe;
  2. konsekventna - nastala u stijenskim masama različitih fizičko-mehaničkih značajki, ili u istovrsnom materijalu po slojnim plohama;
  3. insekventna - nastala u stijenskim masama različitih fizičko-mehaničkih značajki, a klizna ploha siječe više slojeva.

Iskustvo i opažanja ukazuju da se nestabilnost kosina u većini slučajeva očituje kao klizanje mase tla, kliznog tijela, po ravnoj ili zakrivljenoj kliznoj plohi (Slika 1). Pri tome se u donjem dijelu kliznog tijela (pri nožici) tlo naguravanjem zbija, dok se u gornjem dijelu (pri vrhu) ono razrahljuje. Zbog vlačnih naprezanja u vrhu i zanemarive vlačne čvrstoće tla obično se, posebno u slučaju sitnozrnatih tala, otvara vlačna pukotina koja se, zbog smjera gibanja, može pri površini otkriti kao škarpa. Pojava takve pukotine jasan je znak nestabilnosti kosine već u ranoj fazi njenog nastanka. Pojava vlačne pukotine upućuje da se ona može nastaviti u novu kliznu plohu. Područje samog kliznog tijela kao i neposredna okolina oko njega naziva se klizištem (Szavits-Nossan, 2006).



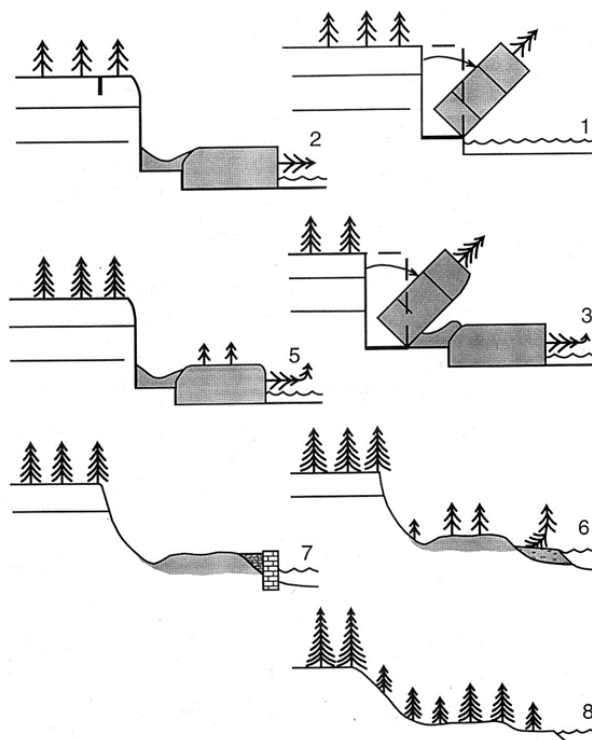
Slika 1. Prikaz dijelova klizišta s zakrivljenom kliznom plohom (Szavits-Nossan, 2006)

### 2.1.2. Aktivnost klizišta

Aktivnost klizišta je širok pojam jer obuhvaća:

- stanje aktivnosti koje opisuje vrijeme kretanja;
- distribuciju aktivnosti koja opisuje smjer kretanja klizišta;
- stil aktivnosti koji ukazuje na tip ili kombinaciju tipova kretanja prema njihovom mehanizmu.

Stanje aktivnosti opisano je terminologijom danom u Tablici 1, a ilustrirano je na Slici 2 na primjeru idealnog klizanja – tip prevrtanje.



Slika 2. Stanja aktivnosti prevrtanja (brojevi se odnose na terminologiju danu u Tablici 1) (Mihalić, 2008)

Tablica 1. Stanja aktivnosti klizišta

| BR. | NAZIV                | DEFINICIJA  |
|-----|----------------------|---|
| 1   | aktivno              | klizište u pokretu  |
| 2   | trenutačno neaktivno | klizište koje se kretalo u posljednjih 12 mjeseci, ali se trenutačno ne kreće   |
| 3   | reaktivirano         | aktivno klizište koje je prije bilo neaktivno   |
| 4   | neaktivno            | klizište koje se nije pokretalo posljednjih 12 mjeseci. Neaktivna klizišta se dijele na: privremeno umirena (5), trajno umirena (6), stabilizirana (7) i reliktna (8) |
| 5   | privremeno umireno   | neaktivno klizište (4) koje se može reaktivirati zbog istih ili nekih drugih uzroka   |
| 6   | trajno umireno       | neaktivno klizište (4) koje više nije pod utjecajem uzroka klizanja   |
| 7   | stabilizirano        | neaktivno klizište (4) zaštićeno mjerama sanacije   |
| 8   | reliktno             | neaktivno klizište (4) koje je bilo aktivno u klimatskim i geomorfološkim uvjetima koji više ne vladaju   |

Smjer kretanja klizišta, odnosno distribucija aktivnosti opisana je u sedam stupnjeva. Ukoliko se ploha sloma razvija u smjeru kretanja klizišta, klizanje se smatra *progresivnim*, što je upravo obrnuto od *retrogresivnih* klizanja kod kojih se ploha klizanja razvija u dijelovima padine iznad klizišta. Klizanja kod kojih se ploha sloma razvija bočno od postojeće nazivaju se *proširujuća* klizanja. Ako se ploha sloma proširuje istovremeno u dva ili više smjerova, klizište se općenito naziva povećavajuće. Suprotan slučaj su *umanjujuća* klizanja, kod kojih se klizanje razvija samo unutar pokrenute mase. Klizanja s nejasno izraženom kliznom plohom, osobito u njezinom nožičnom dijelu nazivaju se *ograničena* klizanja (Mihalić, 2008).

Stil aktivnosti podrazumijeva način ili načine na koje se odvija klizanje. Ovisno o tome sudjeluju li u kretnji pokrenute mase jedan ili više tipova (odron, prevrtanje, klizanje, bočno širenje, tečenje), klizišta se opisuju terminologijom danom u Tablici 2.

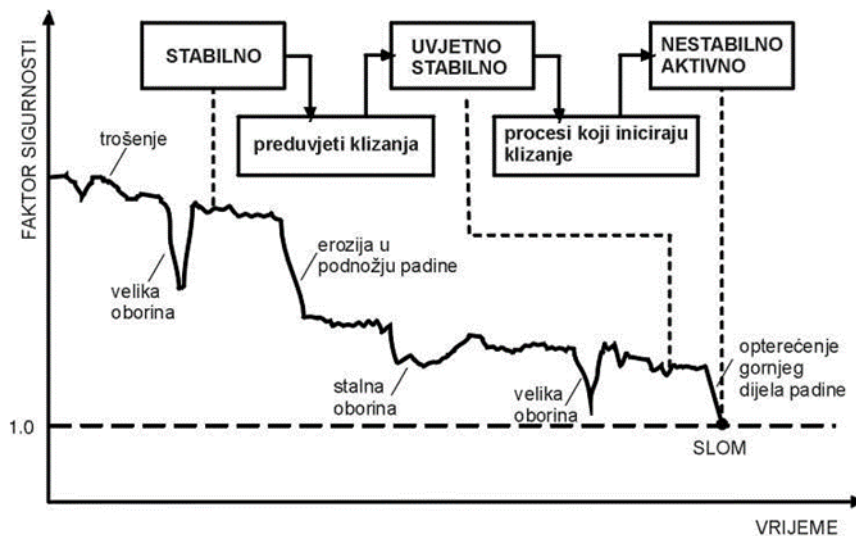
Tablica 2. Terminologija za opis stilova aktivnosti klizanja s pripadajućim definicijama (Mihalić, 2008)

| BR. | NAZIV       | DEFINICIJA  |
|-----|-------------|---|
| 1   | kompleksno  | sastoji se od najmanje dva tipa kretanja (odron, prevrtanje, klizanje, širenje, tečenje) koja se nastavljaju jedno na drugo |
| 2   | mješovito   | sastoji se od najmanje dva tipa kretanja koja se odvijaju simultano u različitim dijelovima pokrenute mase                  |
| 3   | sukcesivno  | dva ili više susjednih klizišta, istog tipa kretanja, ali po odvojenim ploham sloma i sa zasebnim pokrenutim masama         |
| 4   | pojedinačno | pojedinačno kretanje pokrenutog materijala  |
| 5   | višestruko  | opetovani razvoj istog tipa kretanja  |

### 2.1.3. Uzroci klizanja

Opća definicija faktora sigurnosti padine ( $F$ ) daje odnos posmične čvrstoće materijala ( $\tau_f$ ) i posmičnih naprezanja ( $\tau$ ) po pretpostavljenoj ili utvrđenoj plohi sloma:  $F = \frac{\tau_f}{\tau}$

U skladu s ovom definicijom, Terzaghi (1950) je podijelio uzroke klizanja u dvije grupe: (1) vanjski uzroci uslijed kojih se povećavaju posmična naprezanja (npr. geometrijske promjene padine, rasterećenje nožičnog dijela klizišta, opterećenje vrha klizišta, šokovi i vibracije, promjene razine podzemne vode); (2) unutarnji uzroci zbog kojih se umanjuje posmična čvrstoća (npr. progresivni slom, trošenje, erozija procjeđivanja). Međutim, neki od ovih uzroka mogu istovremeno utjecati i na posmična naprezanja i na posmičnu čvrstoću (Mihalić, 2008). Na Slici 3 prikazan je primjer varijacija faktora sigurnosti određene padine u funkciji vremena, a kao posljedica sezonskih oborina i evaporacije.



Slika 3. Primjer promjena faktora sigurnosti s vremenom (Mihalić, 2008)

Pomoću faktora sigurnosti razlikuju se samo stabilne padine od nestabilnih. Međutim, korisnije je promatrati padine s aspekta sljedeća tri stupnja: stabilne, granično stabilne i aktivno nestabilne. Stabilne padine su one kod kojih je granica stabilnosti dovoljno visoka da se mogu oduprijeti silama koje ih destabiliziraju. Granično stabilne padine će doživjeti slom u trenutku kada destabilizirajuće sile dosegnu određenu razinu aktivnosti. Aktivno nestabilne padine su one kod kojih



destabilizirajuće sile uzrokuju kontinuirano ili povremeno kretanje. S obzirom na ova tri stupnja, uzročnici klizanja klasificiraju se u dvije skupine (Slika 4.):

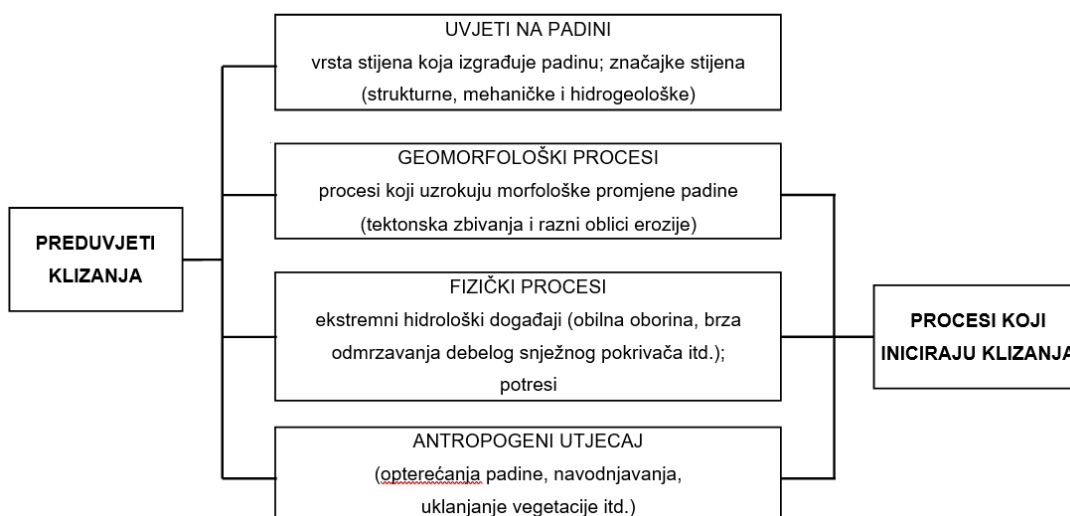
1. Preduvjeti klizanja čine padinu osjetljivom na klizanje, ali ga ne iniciraju, već samo dovode padinu u stanje granične ravnoteže.
2. Inicijalni uzroci su procesi koji iniciraju kretanje, jer padinu iz granično stabilnog stanja dovode u aktivno nestabilno stanje.

Najčešći je slučaj da je klizanje inicirano samo jednim procesom, ali je predisponirano brojnim preduvjetima i procesima. S obzirom na vremensku varijabilnost, destabilizirajući procesi se mogu svrstati u: one koji sporo djeluju (npr. trošenje, erozija) i one koji brzo djeluju (npr. potresi). Prilikom istraživanja uzroka klizanja, pažnja se često posvećuje procesima koji izazivaju najveće promjene u padini. Iako spori procesi djeluju duže vrijeme na način da umanjuju odnos otpornost/posmična čvrstoća, klizanje najčešće iniciraju procesi s brzim djelovanjem.

Uzroke klizanja možemo podijeliti u četiri skupine. Mogući uzroci klizanja iz svih četiriju skupina (Slika 4.) mogu stvoriti predispozicije za klizanje, a inicijatori klizanja mogu biti svi osim uzroka iz prve skupine, tzv. uvjeta na padini. Četiri skupine uzročnika klizanja su (Mihalić, 2008):

- Uvjeti na padini ili značajke materijala/mase stijena/tala istražuju se inženjersko-geološkim kartiranjem klizišta i njegove bliže okolice, istraživačkim bušenjem, in situ pokusima i laboratorijskim pokusima.
- Geomorfološki procesi se očituju se morfološkim promjenama u reljefu, koje se najlakše uočavaju na starijim topografskim kartama, avionskim i satelitskim snimcima, kartiranjem površine klizišta ili se o njima saznaje iz razgovora s lokalnim stanovništvom.
- Fizički procesi su procesi u okolišu, a njih se najčešće zapisuje instrumentalno pomoću seizmografa (potresi), mjernih instrumenata za oborine ili piježometrima.
- Antropogeni procesi se odnose na sve one ljudske zahvate na klizištu ili u neposrednoj blizini. Vrlo je korisno razlučiti klizišta koja su nastala kao

prirodan proces formiranja reljefa od onih koja su posljedica ljudske aktivnosti.



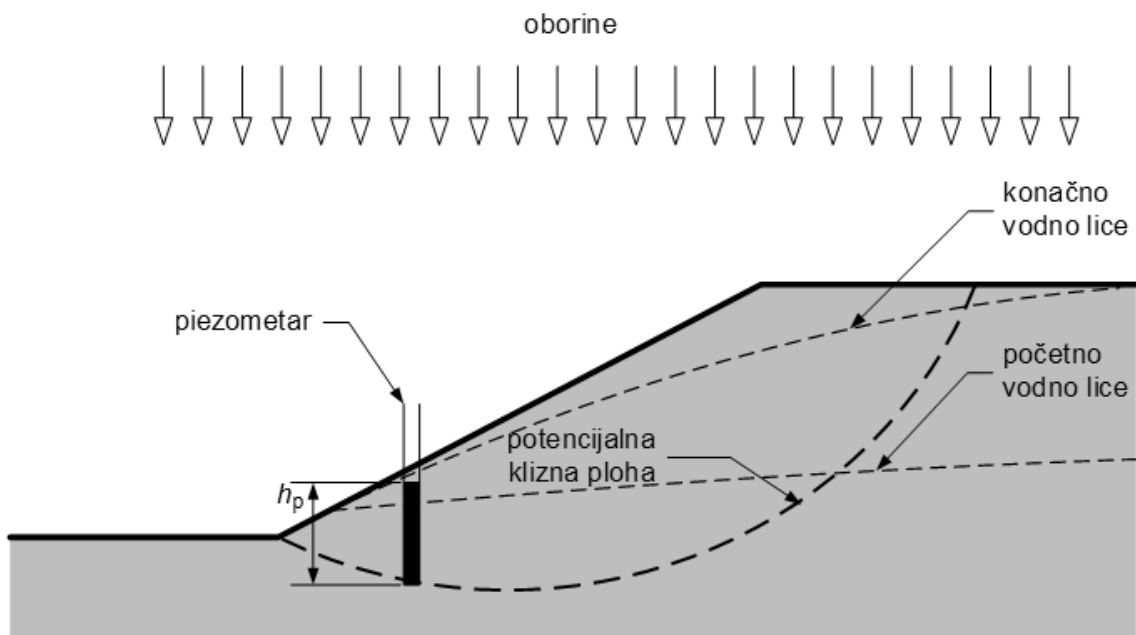
Slika 4. Tipovi uzročnika (faktora) klizanja

## 2.2. STABILNOST KOSINA

Temeljni uvjet stabilnosti kosina je veća čvrstoća tla od posmičnog naprezanja potrebnog za održavanje ravnoteže potencijalnog kliznog tijela. Iz toga slijedi da je temeljni uzrok nastanka nestabilnosti kosina nedovoljna posmična čvrstoća tla koja je iz nekog razloga manja od posmičnog naprezanja potrebnog za održavanje ravnoteže kliznog tijela. To se može dogoditi zbog jednog od sljedeća dva razloga ili zbog njihove kombinacije: ili je čvrstoća pala, iz nekog razloga, ili je, iz nekog razloga, poraslo posmično naprezanje. Kako je čvrstoća funkcija normalnog efektivnog naprezanja, a efektivno naprezanje razlika normalnog naprezanja i pornog tlaka, moguće su mnogobrojne kombinacije uzroka koje dovode do nestabilnosti kosina (Szavits-Nossan, 2006).

Najvažniji uzrok pada čvrstoće je porast pornog tlaka u tlu kosine. Slika 5 prikazuje kosinu izloženu oborinama koje dižu početnu razinu vodnog lica, te time povećavaju porne tlakove u kosini. Budući da normalno ukupno naprezanje u

točkama potencijalne klizne plohe ostaje nepromijenjeno, porast pornih tlakova izaziva pad normalnih efektivnih naprezanja, a time i čvrstoće. Drugi faktor koji dovodi do nestabilnosti kosina je povećanje posmičnih naprezanja na potencijalnoj kliznoj plohi, a to je moguće na sljedeće načine: zakošenje kosine, zasijecanje u njenoj nožici, opterećenje gornjeg dijela kosine i povećanje sile strujanja podzemne vode izazvane nepovoljnom promjenom strujanja podzemne vode od, primjerice, utjecaja kiše.



Slika 5. Porast pornog tlaka i pada čvrstoće u kosini uslijed oborina (Szavits-Nossan, 2006)

### 2.2.1. Metode za određivanje stabilnosti kosina

Postoje različite metode za određivanje stabilnosti kosina. Ovisno o vrsti kosine za koju određujemo stabilnost, odabiremo najprikladniju metodu. Većinom se razmatraju analize stabilnosti kosina za dugačke ravne kosine, tj. beskonačne kosine i kosine kružne klizne plohe. Način rješavanja može biti grafički i grafoanalitički. S razvojem računala je postupak rješavanja ubrzan, a primjena

metoda pojednostavljena. Rezultat klasične metode je tzv. faktor sigurnosti koji se još uvijek primjenjuje kod projektiranja.

Kod beskonačnih kliznih ploha nagib same klizne plohe je paralelan s površinom terena. Već se i takav jednostavan model može primijeniti za neke primjere u praksi. Često se naime događa da je površinski sloj tla do neke manje dubine (4 do 6 m) rastrošan, a ispod njega je čvrst, još neraspadnuti sloj. U određenim se uvjetima promjene stanja (promjene opterećenja, razine podzemne vode) može dogoditi da se rastrošna masa pokrene (Kvasnička i Domitrović, 2007) Kod analize stabilnosti beskonačnih kosina razmatraju se tri slučaja:

- slučaj 1: bez podzemne vode,
- slučaj 2: podzemna voda teče paralelno s površinom terena,
- slučaj 3: potopljena kosina, hidrostatsko stanje.

Za kosine konačne duljine najviše se primjenjuju metode granične ravnoteže, no imamo i grafičku metodu koju je razradio Taylor (1948), koja se koristi za kružne klizne plohe uz pretpostavke koje vrijede i za metode granične ravnoteže:

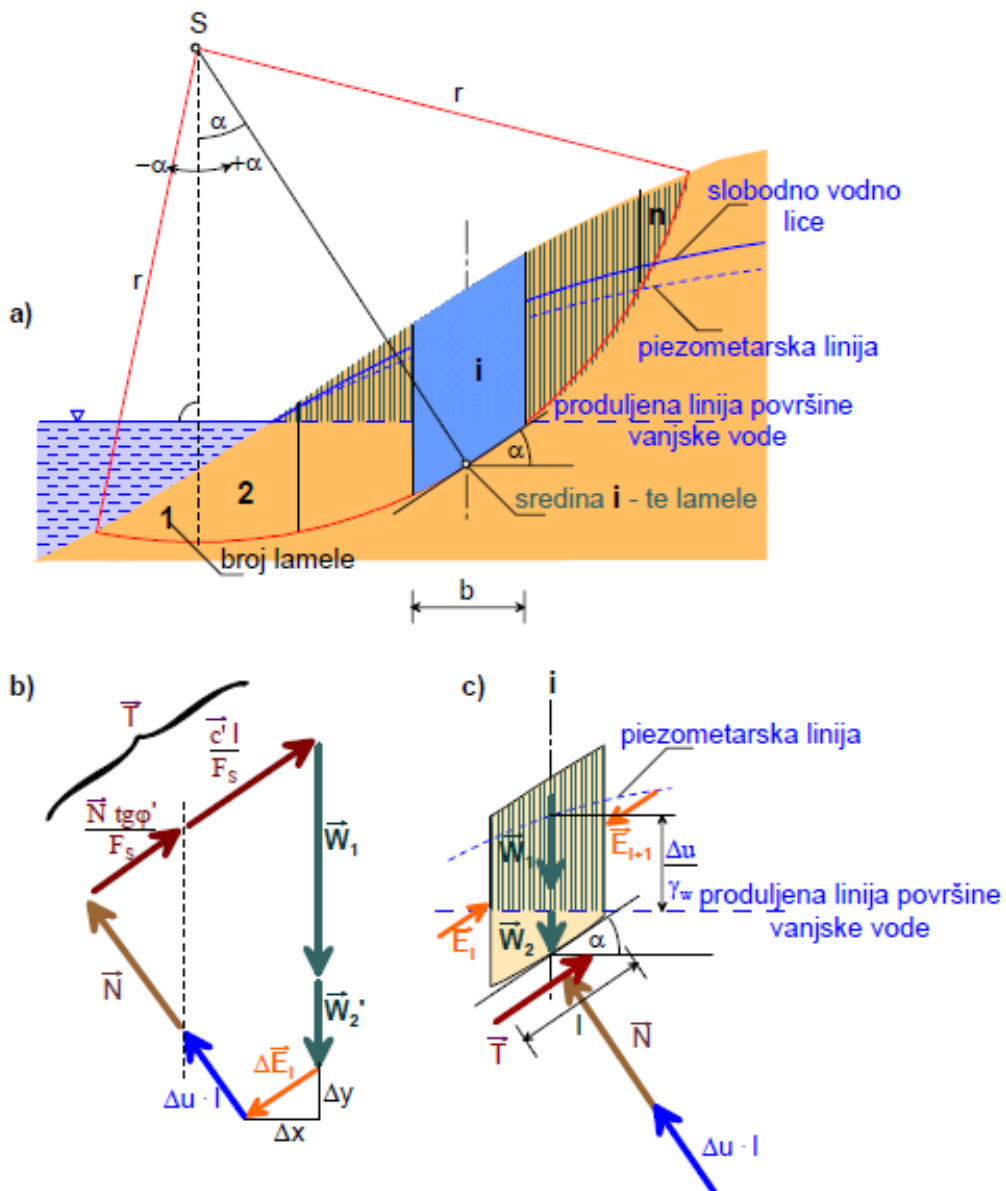
- Ravninski problem – nema promjena u trećem smjeru;
- Klizanje, posmični slom se odvija po plohi (liniji) sloma;
- Odnos posmičnog i normalnog naprezanja na plohi sloma definiran je Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće;
- Klizni segment je kruto tijelo ili sustav krutih tijela;
- Faktor sigurnosti je konstantan duž klizne plohe.

Metodom granične ravnoteže analizira se stabilnost kliznog tijela koje je u sučelju s okolnim tлом preko klizne plohe. Klizno se tijelo razdijeli na niz od vertikalnih lamela pa te metode zovemo i metode lamela. Jedna od poznatijih metoda je „Opća metoda granične ravnoteže“. Opću formulaciju metode granične ravnoteže prvi su razvili Fredlund i Krahn (1977). Opća metoda obuhvaća gotovo sve do sada razvijene varijante koje se međusobno razlikuju po uvedenim pretpostavkama da bi sustav lamela pretvorili u statički određeni sustav. Neke od ostalih varijanti su: Obična ili Felleniusova, Janbuova pojednostavljena, Bishopova pojednostavljena (Bishop, 1955), Morgenstern-Priceova i Spencerova metoda. Obična i Bishopova metoda se koriste za kružne klizne plohe. Na

konkretnom primjeru analiza stabilnosti padine u Krivaji rađena je prema metodi "Bishop" baziranoj na analizi momenta ravnoteže potencijalno nestabilnog segmenta tla kojemu se kao ploha klizanja pretpostavlja cilindrična površina.

### 2.2.1.1. Bishopova pojednostavljena metoda

Od metoda lamela, vrlo je popularna tzv. Bishopova pojednostavljena metoda (Bishop, 1955). Osnovni elementi te metode su prikazani na Slici 6. Počinje se s određivanjem sila koje djeluju na svaku lamelu. Pri tome treba razlikovati sile koje se mogu odrediti unaprijed, što su uglavnom djelovanja (kao vlastita težina, vanjsko opterećenje, opterećenje od vode i sl.) od onih koje se dobiju iz ravnoteže sila i momenata. Promatra se kružni klizni disk, podijeljen na vertikalne lamele i sile koje na njih djeluju. Utjecaj podzemne vode se određuje na osnovi piezometarske linije za taj klizni disk. Razina se vode produži kroz klizno tijelo i razdvaja lamele na "suhi" i "uronjeni" dio, težina  $W_1$  i  $W'_2$ . Vlastita težina lamele,  $W_1$ , dobije se množenjem  $\gamma$  sa zasjenjenom površinom, i  $W'_2$ , množenjem s  $\gamma'$  preostale površine lamele. Preostali dio pronađi tlaka na jednu lamelu odredi se kao udaljenost od produžene razine vanjske vode do piezometarske linije,  $\Delta u$ . Djelovanje tog tlaka se pribroji nepoznatoj normalnoj sili  $N = N' + \Delta u_s l$ . Na bazi lamele djeluje još i nepoznata tangencijalna sila otpora,  $T$ , koja se izrazi, preko Mohr-Coulombovog zakona sloma tla, pomoću parametara čvrstoće, sile  $N$  i nepoznatog  $F_s$ .



Slika 6. Bishopova pojednostavljena metoda i njezini elementi (Kvasnička; Domitrović, 2007)

Preostale su još nepoznate međulamelarne sile,  $E_i$  i  $E_{i+1}$ , koje se mogu rastaviti na horizontalne i vertikalne komponente ( $X_i$  i  $Y_i$ ).

Postavljaju se jednadžbe ravnoteže vertikalnih sila  $\sum Y = 0$  i momenata,  $\sum M_s = 0$  ( $M_s$  moment oko središta klizne plohe, S). Iz sume vertikalnih sila za  $i$ -tu lamelu slijedi (indeksi  $i$  su ispušteni jer se, osim uz faktor sigurnosti  $F_s$ , stavljaju uz svaku veličinu):

$$W_1 + W_2 + \Delta Y = (P' + \Delta u \cdot l) \cdot \cos \alpha + T \cdot \sin \alpha$$

Tangencijalna sila otpora na dnu lamele je:

$$T = \frac{c' \cdot l}{F_s} + N \cdot \frac{\tan \varphi}{F_s}$$

Rješavanjem gornjih jednadžbi po N' i T dobije se:

$$T = \frac{l}{F_s} [c' \cdot b + (W_1 + W'_2 + \Delta Y - \Delta u \cdot b) \cdot \tan \varphi] \cdot \frac{l}{m_\alpha}$$

Gdje je:

$$l = \frac{b}{\cos \alpha}, \quad m_\alpha = \cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{\tan \varphi}{F_s}$$

Iz ravnoteže statičkih momenata sila oko središta kružne klizne plohe:

$$\sum T_i \cdot r = \sum W_i \cdot r \cdot \sin \alpha_i$$

Dijeljenjem s r dobiva se jednadžba:

$$\sum T_i \cdot r = \sum (W_{1i} + (W_{2i}) \cdot \sin \alpha_i$$

Uvrštavanjem izraza za T te pretpostavke da u Bishopovoj pojednostavljenoj metodi vertikalne komponente međulamelarnih sila jednake su i suprotnog su smjera, tj.  $\Delta Y_i=0$ , dobivamo izraz za faktor sigurnosti:

$$F_s = \frac{\sum_i [c' \cdot b + (W_1 + W_2 - \Delta u \cdot b) \cdot \tan \varphi] \cdot \frac{1}{m_\alpha}}{\sum_i (W_1 + W_2) \cdot \sin \alpha}$$

Iako je faktor sigurnosti s lijeve strane, jednadžba se mora rješavati iterativno jer je  $F_s$  sadržan i u izrazu za  $m_\alpha$ . Prikazani izraz je pogodan i za ručno rješavanje, a postoje brojni komercijalni kompjuterski programi za rješavanje stabilnosti kosina po Bishopovoj metodi. Treba ispitati veći broj kliznih ploha. Mjerodavna je ona ploha koja daje najmanji faktor sigurnosti, što je ujedno i faktor sigurnosti za cijelu kosinu.

## 2.3. STABILIZACIJA KLIZANJA

Stabilizacija postojećeg klizanja ili prevencija potencijalnog klizanja provodi se reduciranjem sila koje ga pokreću ili povećanjem sila otpora. Sve mjere sanacije moraju uključivati barem jednu od ovih komponenti, a ponekada i obje. U nastavku nalazi se popis mjera sanacije klizišta, s time da su one razvrstane u četiri skupine: modifikacija geometrije padine; drenaža; potporne građevine; i interno pojačanje padine (Mihalić, 2008).

### 1. MODIFIKACIJA GEOMETRIJE PADINE

- odstranjivanje materijala s klizišta (s mogućom zamjenom materijala)
- dodavanje materijala radi održavanja stabilnosti (berme ili nasipi)
- smanjivanje nagiba kosine

### 2. DRENAŽA

- površinska drenaža radi odstranjivanja vode koja teče po klizištu (pomoću jaraka i kanala)
- plitki ili duboki drenažni jarci ispunjeni slobodnodrenirajućim geomaterijalima (krupnozrnate ispune ili geosintetici)
- podupirući kontrafori od krupnozrnatog materijala (hidrogeološki učinak)
- vertikalne bušotine (malog promjera), iz kojih se voda crpi ili su samodrenirajuće
- vertikalni bunari (velikog promjera) s gravitacijskim dreniranjem
- subhorizontalne ili subvertikalne bušotine
- drenažni tuneli, galerije ili potkopi
- odvodnjavanje vakuumom
- drenaža sifonima
- elektroosmotsko odvodnjavanje
- sadnja vegetacije (hidrogeološki učinak)

### 3. POTPORNE GRAĐEVINE

- masivni (gravitacijski) potporni zidovi
- zidovi od prefabriciranih elemenata
- gabionski zidovi



- pasivni piloti i kesoni
- armirano-betonski zidovi izrađeni na licu mjesta
- armirane zemljane građevine s trakastim/pločastim polimersko/metalnim armirajućim elementima
- potporni kontrafori od krupnozrnatog materijala (mehanički učinak) mreže za zadržavanje materijala na licima padina u stijenama
- sustavi za oslabljivanje ili zaustavljanje odronjavanja (jarci, klupe, ograde i zidovi za skupljanje kamenja)
- zaštitni blokovi od stijena ili betona protiv erozije

#### 4. UNUTARNJE OJAČANJE PADINE

- kratka sidra
- mikropiloti
- čavlorano tlo
- prednapregnuta (geotehnička) sidra
- injektiranje
- kolone od kamena ili vapna/cementa
- termička obrada
- zamrzavanje
- elektroosmotska sidra
- sadnja vegetacije (mehanički efekt povećanja čvrstoće pomoću korijenja bilja)

### **3. TERENSKI ISTRAŽNI RADOVI**

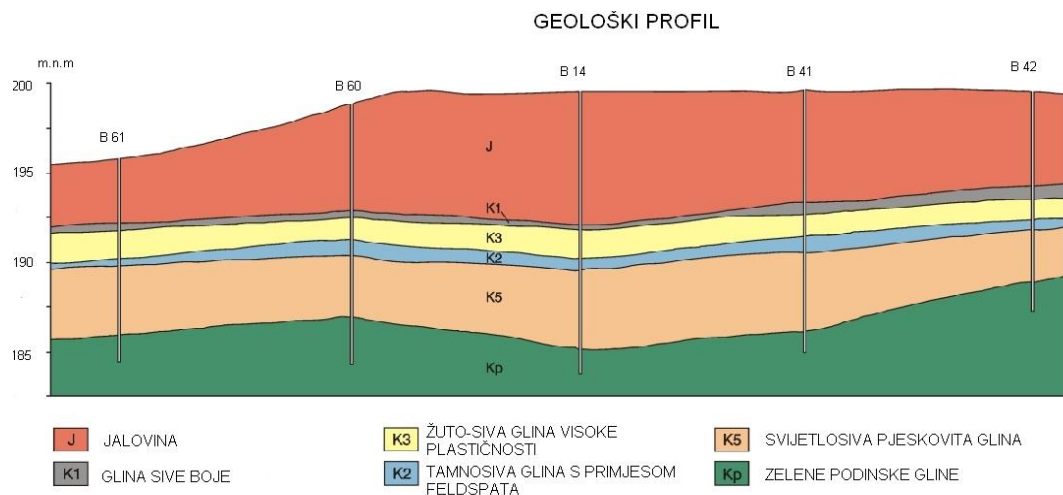
Terenski istražni radovi sastoje se od nerazarajućih i razarajućih postupaka. Nerazarajući postupci sastoje se od detaljnog inženjersko-geološkog i hidrogeološkog kartiranja, geofizičkih i drugih istražnih radova uz korištenje GIS-a, dok su razarajući postupci istražna bušenja, raskopi, jame te terenska istraživanja tla in-situ metodama.

Istražni radovi u geotehnici služe za utvrđivanje rasporeda, debljine i svojstava pojedinih slojeva ispod površine terena na kojem je predviđeno određeni zahvat, a pri tom obuhvaćaju metode istraživanja iz područja mehanike tla, mehanike stijena i inženjerske geologije. Istražnim radovima se utvrđuje stanje površinskih dijelova tla i stijenske mase. Geotehničke istražne radove čini skup postupaka prikupljanja i obrade odgovarajućih podataka o tlu na mjestu budućeg zahvata i bliže okoline, nužan za njegovo ispravno i ekonomično projektiranje, izvođenje i uporabu. Mogu se podijeliti na terenske i laboratorijske, ovisno o mjestu provođenja (započinju na terenu (in situ), a nastavljaju se u laboratoriju).

#### **3.1. GEOLOŠKI ISTRAŽNI RADOVI**

Geološki istražni radovi daju nam raspored i građu tla, a izvode se usporedno s geofizičkim i geotehničkim terenskim istražnim radovima. Prethodni geološki istražni radovi sastoje se od izučavanja postojećih geoloških podloga temeljem kojih je sačinjen „Program istražnih radova“. Ovi podaci služe za odabir mjesta na kojima će se izvoditi detaljni istražni radovi. Postojeće inženjersko-geološke i hidrogeološke karte stoga su vrlo značajne kao osnova za daljnji rad. Prethodni geološki istražni radovi mogu se izvoditi i istovremeno s geofizičkim istražnim radovima. Ukoliko je to slučaj, svi postojeći geološki podaci služe kao podloga, za određivanje mjesta na kojima će se vršiti geofizička ispitivanja. U prethodne geološke istražne radova spada i geološka interpretacija najrazličitijih snimaka iz zraka i podataka iz GIS-a. Detaljno izvedeni prethodni istražni radovi mogu smanjiti potrebnu količinu detaljnih istražnih radova (Roje-Bonacci, 2012).

Detaljni geološki istražni radovi izvode se usporedo s geofizičkim i geotehničkim terenskim istražnim radovima. Ovi radovi obuhvaćaju više područja ispitivanja. Jedan se dio se osim prethodnih geoloških istražnih radova sastoji od detaljnog terenskog inženjersko-geološkog i hidro-geološkog snimanja i kartiranja površine budućeg zahvata. Snimaju se i bilježe rasjedi i rasjedne zone i drugi geološki fenomeni koji se mogu uočiti s površine i utvrditi terenskim istražnim radovima. Svi ovi podaci služe za inženjersko-geološku klasifikaciju stijenske mase potrebnu za geotehničke proračune i dimenzioniranje. Kartiraju se izvori, izvorišne zone, ponori i sve pojave vezane za vodu. Tako nastaju precizne inženjersko-geološke i hidrogeološke karte, koje su neobično važne za daljnji rad. Druga grupa ovih radova obuhvaća geološku reinterpetaciju jezgre izvađene iz bušotina, kartiranje potkopa i stijenki jama, raskopa i bunara. Pri tom se dobivaju podaci bitni za modeliranje (Roje-Bonacci, 2012). Cilj inženjersko-geoloških istražnih radova je izrada geoloških profila (Slika 7.), u kojima su materijali razvrstani prema nekom klasifikacijskom sustavu te su istaknuta njihova bitna svojstva.

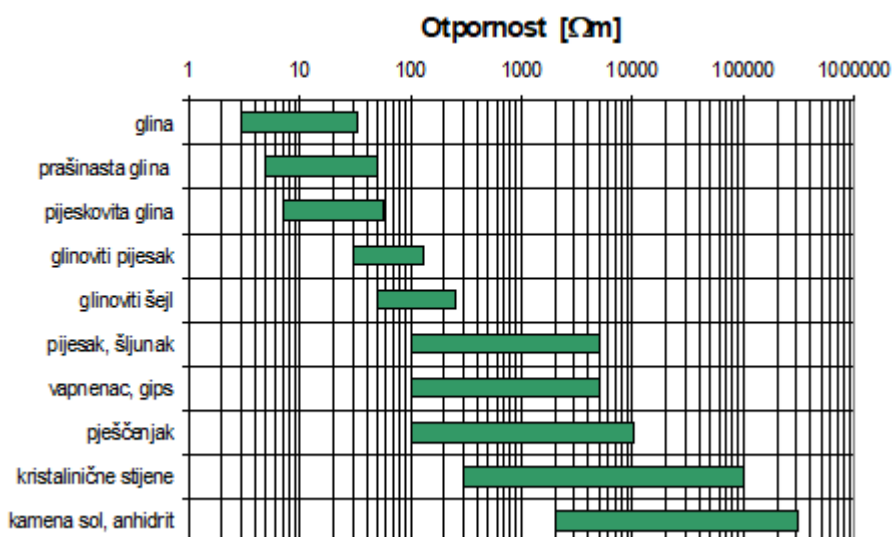


Slika 7. Primjer geološkog profila (Strelec, 2012)

### 3.2 . GEOFIZIČKI ISTRAŽNI RADOVI

Geofizička istraživanja uključuju niz različitih terenskih ispitivanja tla. Obično se provode kao dopuna istražnim bušenjima i in-situ ispitivanjima. Postoje različite vrste geofizičkih metoda, a razlikuju se po tome što mjere različita svojstva tla (elastična, magnetska, električna, radioaktivna i dr.).

Geoelektrične metode su brojnije i raznovrsnije od drugih geofizičkih metoda. Kod geoelektričnih metoda najčešće se primjenjuje galvanska metoda prividnog otpora, koja se zasniva na razlici između električnih otpornosti slojeva, odnosno masa u zahvaćenom dijelu podzemlja. Struja određene jakosti se iz baterije, preko metalnih strujnih elektroda upušta u tlo, te se iz nastale razlike potencijala na mjernim naponskim elektrodama određuje prividna otpornost stijena (Strelec, 2012). Svaka od geoloških sredina ima svoju specifičnu otpornost (Slika 8.). Ovo su neke od najpoznatijih geoelektričnih metoda: geoelektrično sondiranje, geoelektrično profiliranje, geoelektrična tomografija, metoda vlastitog potencijala, metoda inducirane polarizacije, itd. Na konkretnom primjeru geofizička istraživanja obuhvaćaju geoelektrična istraživanja u smislu metode geoelektrične tomografije.



Slika 8. Prikaz otpornosti nekih materijala

Seizmičke metode upotrebljavaju širenje seizmičkih valova karakterističnih brzina za određivanje slojevitosti, elastične stišljivosti i ostalih prigušenih parametara stijena i tla. Ovi testovi su obično provedeni kod vrlo malih naprezanja i kao takvi ostaju u elastičnoj domeni tla. U teoriji širenja seizmičkih valova pretpostavlja se da stijena u svakoj svojoj točki ima jednaka svojstva, te da su ta svojstva u svim smjerovima jednaka. Ovaj slučaj nije nikada u potpunosti zadovoljen, ali se odstupanja zanemaruju. Polazna točka seizmičkih istraživanja je mjerenje vremena u kojem se seizmički valovi šire kroz podzemlje do nekih geoloških granica, na kojima se reflektiraju ili refraktiraju. Neke od metoda su: seizmička refrakcija, SASW metoda, MASW metoda.

Kod elektromagnetskih metoda predmet mjerenja je elektromagnetsko polje koje se inducira u podzemnom geološkom vodiču tokom električne struje na površini. Tok struje ostvaruje se galvanski ili induktivno (pobuđivanjem), a neke od metoda su: metoda odašiljačkog prstena, metoda pomičnog odašiljača.

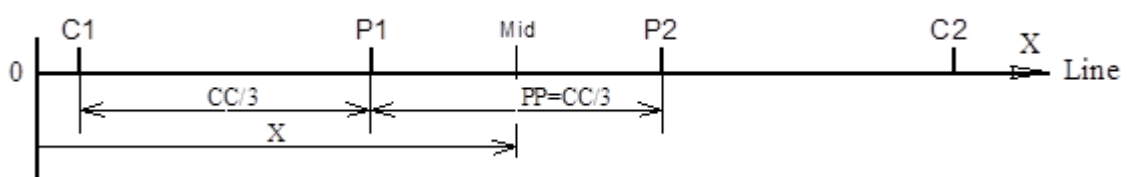
Kod geofizičkih istraživanja moramo spomenuti istraživanja georadarom. Georadar je elektromagnetski uređaj s visokom rezolucijom za istraživanje podzemlja. Georadar šalje kratke impulse elektromagnetskih valova u tlo koristeći antene za prijem i odašiljanje. Elektromagnetski valovi se odbijaju od anomalija u tlu i vraćaju se u prijemnu antenu. Promjene u dielektričnim svojstvima reflektiraju relativne promjene u tlu. Elektromagnetska frekvencija i električna vodljivost tla određuju dubinu georadarskih ispitivanja. Georadar je pretežito namijenjen za ispitivanje kompaktnih stijena, a sastoji se od prijemne antene, odašiljačke antene, vremenske jedinice za kontrolu antena i prijenosnog računala s odgovarajućim softverom (Strelec, 2012).

### **3.2.1. Geoelektrična tomografija**

2D-električna tomografija je površinska geoelektrična metoda kojom se istražuju električne otpornosti stijena, te se najčešće ubraja u metode prividne otpornosti. 2D istraživanja daju bolji i precizniji model podzemlja nego 1D istraživanja jer

uzimaju u obzir i vertikalne i horizontalne promjene otpornosti. 2D-električnom tomografijom se mogu vrlo uspješno istraživati izdužene geološke strukture, ali pri tome treba profil postaviti što više okomito na pružanje struktura. Mjerenja električnih otpornosti 2D-električnom tomografijom izvode se s više dubinskih zahvata, ali se pri tome mijenjaju i središta mjerenja, odnosno 2D-tomografija na neki način kombinira metode sondiranja i profiliranja. Mjerenja se uglavnom izvode sofisticiranim više-elektrodnim sustavima, koji su razvijani usporedno s teorijskim razvojem električne tomografije (Loke et al. 2011).

Geoelektrična tomografija izvedena je na jednom profilu Wennerovim mjernim rasporedom. U Wennerovom mjernom rasporedu za profiliranje koriste se dvije strujne elektrode (C1 i C2) i dvije potencijalne elektrode (P1 i P2) smještene u liniji i centrirane na nekoj lokaciji (Slika 9.). Elektrode se postavljaju u ravnoj liniji profila, na način da se zabode sav više-elektrodni sustav elektroda, a preklopnik geoelektričnog uređaja za mjerenje automatizirano prebacuje raspored strujnih i potencijalnih elektroda (Slika 10.). Mjeri se jakost struje između strujnih elektroda pa se iz razlike potencijala između potencijalnih elektroda, pomoću konstante geometrijskih odnosa elektroda (za Wenner PRF –  $K=2\pi CC/3$ ), određuje prividna otpornost. Interpretacijom se određuju debljine i specifični električni otpor pojedinih geoelektričnih sredina.



Slika 9. Wenner-ov raspored

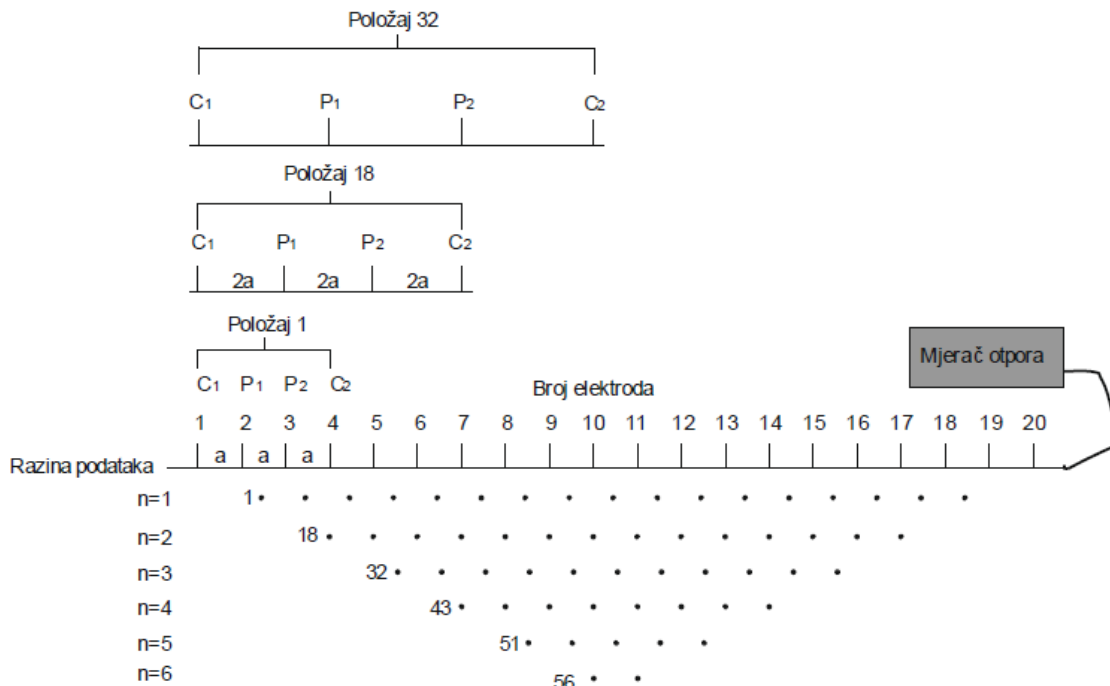
gdje je:

- X - udaljenost u profilu do polovišta P1P2 (Mid)
- $CC/3$  - trećina udaljenosti strujnih elektroda ( $CC/3$ )

Polovište potencijalnih elektroda P1 i P2 nalazi se na udaljenosti X od početka geoelektričnog profila. Pri mjerenju udaljenost P1-P2 iznosi trećinu udaljenosti C1C2 ( $PP=CC/3$ ).

Prednosti geoelektričnog profiliranja:

- nije potrebno razmicanje elektroda sukladno položaju u profilu,
- mjerni raspored se u profilu pozicionira automatizirano.

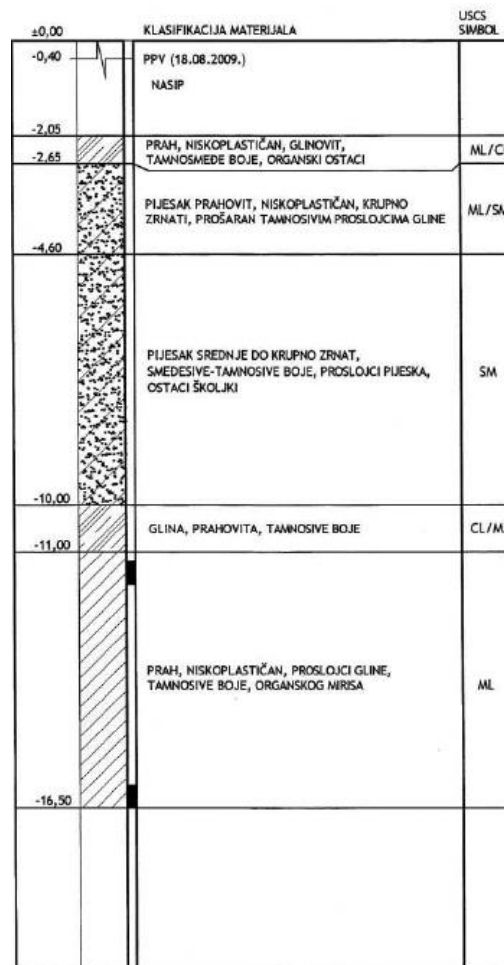


Slika 10. Raspored elektroda kod geoelektrične 2-D tomografije Wenner (prerađeno prema Loke, 2015)

### 3.3. GEOTEHNIČKA TERENSKA ISTRAŽIVANJA

Ovi se radovi sastoje od izvedbe istražnih jama, bušotina, bunara i potkopa. Svi oni služe da se dobije raspored slojeva tla po dubini ispod ili duž buduće trase ili tlocrta neke građevine. Tijekom izvođenja ovih radova bilježi se svaka promjena vrste tla i opisuju njegova svojstva, za koja nisu potrebna složena laboratorijska ispitivanja. Koriste se identifikacijski pokusi i pobliži opis onoga što se može uočiti tokom iskopa ili bušenja. (Roje-Bonacci, 2012). Bilježi se pojava podzemne vode. Najčešće se izvodi bušenje s jezgrovanjem te terenska ispitivanja tijekom bušenja i ispitivanja neovisni o bušenju.

Raspored slojeva tla po dubini prikazuje se u geotehničkim profilima. Geotehnički profil tla je pojednostavljeni model prostorne raspodjele onih svojstava tla, prvenstveno mehaničkih, koja bitno utječu na stabilnost, uporabivost i ekonomičnost razmatrane građevine i njene okoline tijekom izvođenja građevinskih radova i tijekom životnog vijeka građevine. Najčešće se rezultati terenskih i laboratorijskih ispitivanja dokumentiraju u geotehničkom izvješću (elaboratu). Za svaku se istražnu bušotinu, osim opisa i tablica, izvodi tzv. sondažni profil (Slika 11.) u kojem su rezultati istraživanja pregledno prikazani. Na temelju sondažnih profila izrađuje se već spomenuti geotehnički profil kojim se dvodimenzionalno prikazuje raspodjela slojeva, razina podzemne vode, odabrana svojstva materijala relevantna za određenu vrstu problema itd. Opseg istražnih radova definiran je regulativom *Eurocode 7*, a ovisi o složenosti geoloških uvjeta u tlu, složenosti geotehničkog zahvata, složenosti konstrukcije, namjeni i utjecaju na okoliš (Strelec, 2012).



Slika 11. Primjer sondažnog profila (Roje-Bonacci, 2012)



Istražni radovi izvode se temeljem prethodno napravljenog programa (plana) koji je sastavni dio ponude. Da bi se izradio program istražnih radova potrebno je raspolagati s odgovarajućom situacijom terena (topografskom kartom u mjerilu koja odgovara veličini tlocrta planiranog zahvata). Program istražnih radova sadrži broj i predviđa dubinu bušotina, broj i dubinu istražnih jama i/ili potkopa. Propisuje učestalost uzimanja neporemećenih uzoraka i/ili ispitivanja zbijenosti dinamičkim penetracijskim pokusom u bušotinama. Približno predviđa broj i vrstu laboratorijskih ispitivanja i terenskih ispitivanja koja nisu ovisna o bušačem stroju.

Uz bušenje često se u tijeku terenskih istražnih radova koriste i ostale in situ metode (terensko ispitivanje vodopropusnosti, ispitivanje tlačnim jastukom, SPT, CPT i DPH, ispitivanje presiometrom i dilatometrom, ispitivanje krilnom sondom, itd). Te metode sve češće zauzimaju mjesto u programima geotehničkih istražnih radova, prvenstveno zahvaljujući naprednoj tehnici ispitivanja i interpretacije, razumno jeftinom i brzom ispitivanju te postojećem iskustvu u njihovu korištenju, no ipak treba razmotriti prikladnost i primjenjivost pojedine metode za ispitivanje u određenoj vrsti tla, kako bi bili dobili željene i iskoristive rezultate (Look, 2014). Iskoristivost pojedinog tipa pokusa vidimo u tablici 3.

Tablica 3. Iskustvena ljestvica iskoristivosti pojedinog tipa pokusa prema bodovanju od 1 do 5 (Prema preporuci IGH)

| VRSTA<br>ISPITIVANJA            | USPJEŠNOST ODREĐIVANJA |   |   |   |          |   |   |   |                |   |   |   |               |   |   |   |
|---------------------------------|------------------------|---|---|---|----------|---|---|---|----------------|---|---|---|---------------|---|---|---|
|                                 | SASTAV TLA             |   |   |   | ČVRSTOĆA |   |   |   | DEFORMABILNOST |   |   |   | KONSOLIDACIJA |   |   |   |
| Bušenje s<br>laboratorijem      | ■                      | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ | ■              | ■ | ■ | ■ | ■             | ■ | ■ | ■ |
| Geofizička<br>ispitivanja       | ■                      | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ | ■              | ■ | ■ | ■ | ■             | ■ | ■ | ■ |
| CPT - statička<br>penetracija   | ■                      | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ | ■              | ■ | ■ | ■ | ■             | ■ | ■ | ■ |
| SPT - standardna<br>penetracija | ■                      | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ | ■              | ■ | ■ | ■ | ■             | ■ | ■ | ■ |
| DMT - dilatometar<br>Marchetti  | ■                      | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ | ■              | ■ | ■ | ■ | ■             | ■ | ■ | ■ |
| MP - presiometar<br>Menard      | ■                      | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ | ■              | ■ | ■ | ■ | ■             | ■ | ■ | ■ |
| KS - krilna sonda               | ■                      | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ | ■              | ■ | ■ | ■ | ■             | ■ | ■ | ■ |
| Presiopermeametar               | ■                      | ■ | ■ | ■ | ■        | ■ | ■ | ■ | ■              | ■ | ■ | ■ | ■             | ■ | ■ | ■ |

Na predmetnoj lokaciji, programom istraživanja određena su istraživanja koja uključuju:

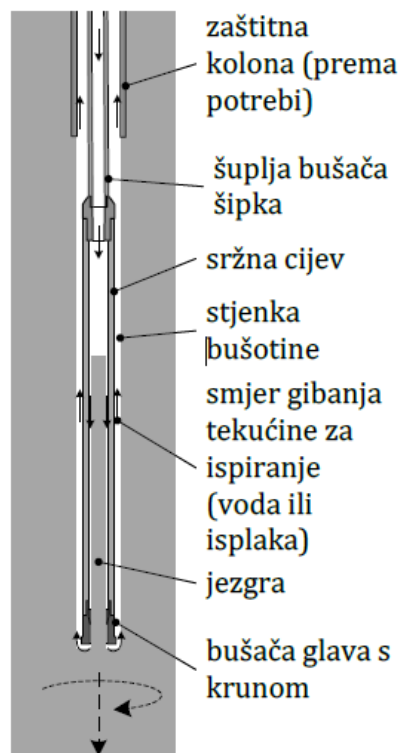
- Sondažno bušenje,
- Statičko sondiranje CPTu sondom, te sondiranje DMT dilatometrom-tipa Marchetti,
- Dinamičko sondiranje lakom udarnom sondom (DPL),
- Mjerenje nedrenirane posmične čvrstoće krilnom sondom,
- Geofizička istraživanja - geoelektrična tomografija ERT,
- Laboratorijska ispitivanja uzoraka.

Izvedeno je šest geomehaničkih istražnih bušotina. Bušenje bušotina izvedeno je motornom rotacijskom bušilicom uz kontinuirano jezgrovanje. Ispitivanje relativne zbijenosti tla izvedeno je standardnim penetracijskim pokusom (SPT). Po završetku bušenja provedena je terenska identifikacija i USC klasifikacija nabušene jezgre. Pored terenskih pokusa (SPT) iz geomehaničkih istražnih bušotina uzeti su poremećeni i neporemećeni uzorci za laboratorijske analize, odnosno za utvrđivanje fizikalnih i mehaničkih svojstva tla. Tijekom istražnog bušenja kartirana je nabušena jezgra. Položaj istražnih radova u odnosu na tlocrtnu situaciju prikazan je na situacijskom planu (Prilog 1).

### **3.3.1. Istražno bušenje**

Bušenje je postupak prodiranja bušaćeg pribora u tlo ili stijenu do određene dubine. Dubina bušenja treba dosegnuti zonu tla u kojoj se ne očekuju znatnije promjene naprezanja i pojave deformacija izgradnjom objekta, ako se rade istraživanja za temeljenje objekta. Istražne se bušotine izvode radi utvrđivanja rasporeda pojedinih slojeva tla i dobivanja uzoraka za ispitivanje u laboratoriju. Tijekom postupka bušenja potrebno je registrirati razinu podzemne vode u svim fazama bušenja. Nakon svih terenskih ispitivanja mogu se u bušotine ugraditi piezometri za kasnije praćenje razina podzemnih voda. Na konkretnom primjeru bušenje je izvedeno motornom rotacijskom bušilicom uz kontinuirano jezgrovanje.

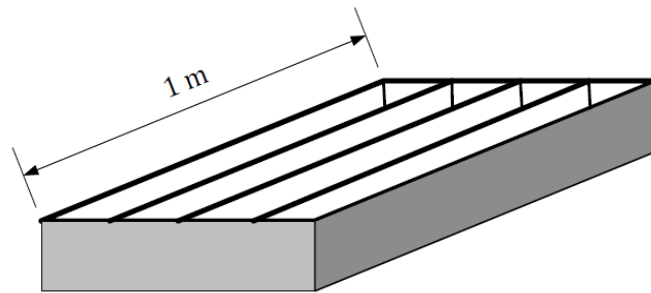
Rotacijsko bušenje ili bušenje jezgrovanjem najčešće se koristi u stijeni, ali je moguća njena primjena i u tlu. Bušači alat, koji je pričvršćen na niz šupljih bušačkih šipki, može biti puno svrdlo ili šuplje svrdlo za jezgrovanje. Alat se strojno rotira i hidraulički utiskuje s površine terena pomoću šupljih bušačkih šipki (Slika 12.). Na dnu šipki pričvršćena je posebna jezgrena cijev na čijem je dnu šuplja bušača glava s krunom. Kruna je nazubljeni alat, čiji su zubi izrađeni od posebno obrađenog čelika (vidija) ili industrijskih dijamanta koji su otporni na habanje. Kroz bušače šipke i jezgrenu cijev utiskuje se voda, koja hladi pribor ugrijan od rada, a iznosi strugotine ispod krune kroz bušotinu do površine terena, s vanjske strane bušačkih šipki. Kao i kod drugih metoda bušenja, bušotina se može zaštititi zaštitnom cijevi (kolonom) od urušavanja kada prolazi kroz pijesak ili šljunak, ili od istiskivanja kada prolazi kroz slojeve meke gline. U jezgrenoj cijevi ostaje jezgra tla u obliku svijeće (Szavits-Nossan, 2006).



Slika 12. Bušenje s jezgrovanjem, jezgrovanje s jednostrukom jezgrenom (sržnom) cijevi (Szavits-Nossan, 2006)

Jezgra iz jezgrene cijevi odlaže se u posebne drvene sanduke (Slika 13.) radi daljnjeg pregleda i uzimanja uzoraka tla za ispitivanje u laboratoriju te se bilježi fotografijama, tj. izrađuje se fotodokumentacija. Dobiveni uzorci smatraju se

poremećenima za potrebe ispitivanja krutosti i čvrstoće tla, ali ako su odmah po vađenju iz tla zaštićeni i poslani u laboratorij, vrlo dobro mogu poslužiti za izvođenje onih laboratorijskih pokusa koji nisu ovisni o pregriječenju (prirodna vlažnost, granice konzistentnih stanja – Atterbergove granice, granulometrijski sastav, Proctorov pokus itd.)



Slika 13. Drveni sanduk za odlaganje jezgre iz jezgrene cijevi (Szavits-Nossan, 2006)

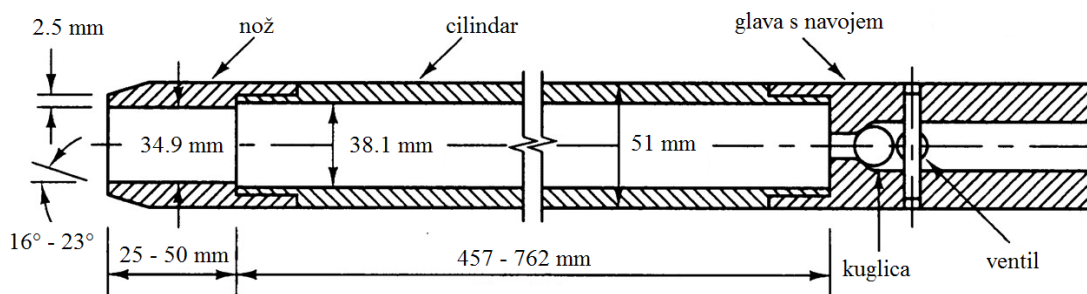
### 3.3.2. Terenska istraživanja tla

Iz nekih je materijala praktički nemoguće izvaditi neporemećeni uzorak. Zbog toga se mehanička svojstva takvih materijala određuju uglavnom posredno, tj. na osnovi rezultata terenskog pokusa zaključuju se svojstva i parametri tla kao što su modul stišljivosti, čvrstoća itd. In situ (na licu mjesta) ispitivanja omogućavaju ispitivanje terena na samoj lokaciji predviđenoj za određeni zahvat, a ovise o vrsti i dimenzijama budućeg zahvata te osobinama terena na kojem se zahvat planira izvoditi.

#### 3.3.2.1. Standardni penetracijski pokus

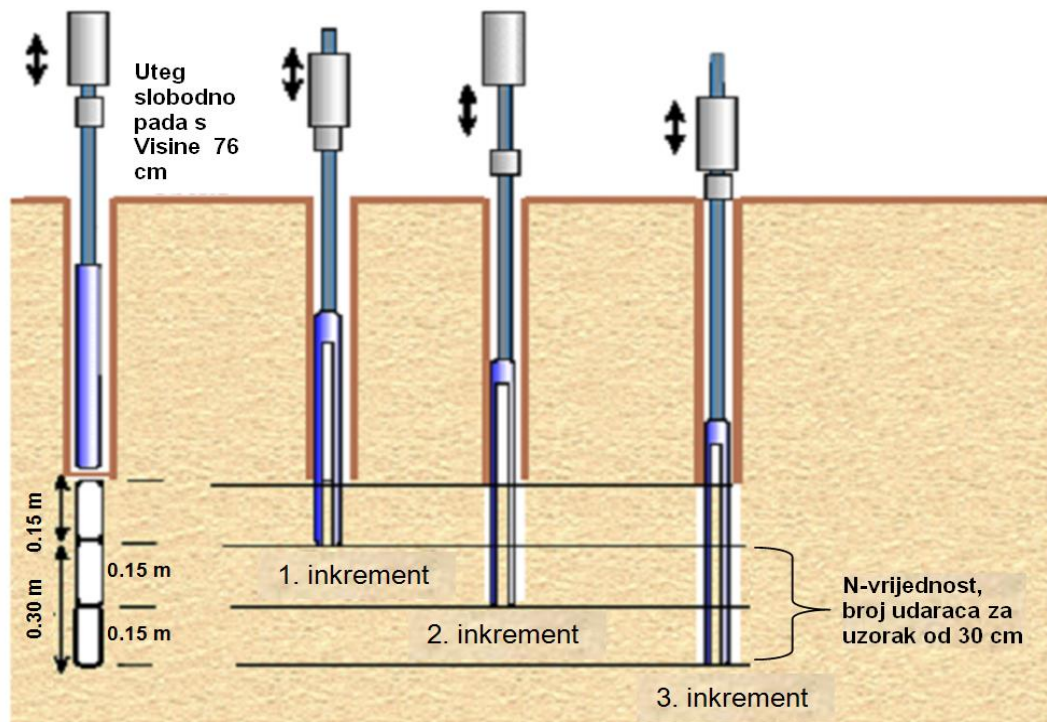
Ovaj se pokus izvodi u bušotini izbušenoj rotacijskom metodom bušenja, spiralnim svrdlima ili metodom bušenja s isplakom. Oprema za provođenje

pokusa sastoji se od bušačih šipki, koje za dubine do 15 m imaju masu od oko 6 kg/m, a za veće dubine oko 8 kg/m; utega od 63,5 kg (622,3 N) na vodilici s mehanizmom za dizanje na visinu od 76,2 cm i spuštanje, da bi se postiglo prodiranje od 30,48 cm; dvodijelnog cilindra s nožem za uzimanje uzorka, vanjskog promjera 51 mm, unutrašnjeg 35 mm i dužine 68,6 cm (Slika 14.) ili punog konusnog šiljka pod kutem od 60°, promjera 51 mm. Cilindar se postavlja na dno bušotine, a preko šipki je spojen s površinom.



Slika 14. Cilindar za SPT standardnih dimenzija prema ASTM (Matešić, 2010)

Standardno se primjenjuje izvođenje SPT-a na svakih 1,5 m dubine. Na očišćeno dno bušotine se spuštaju bušaće šipke sa odabranim nastavkom (nož ili konus). Uteg se diže na visinu od 760 mm s koje se pušta da gravitacijski pada na šipke. Broj udaraca (N-penetracijski otpor) se broji za napredovanje od tri uzastopna prodiranja u inkrementima od 15 cm (Slika 15.). Zbog mogućih poremećaja dna bušotine, broj udaraca za prvih 15 cm prodiranja može biti nepouzdan. Za konačan broj udaraca koristi se zbroj udaraca u drugom i trećem inkrementu kod ukupnog prodiranja od 30 cm. Nakon probijanja, cilindar s nožem se izvlači na površinu, nož i cilindar se odvajaju od bušačih šipki, dvodijelni cilindar se otvara te se iz njega vadi reprezentativan poremećeni uzorak.



Slika 15. Postupak ispitivanja standardnim penetracijskim pokusom (Roje-Bonacci, 2012)

Tablica 4. Povezanost broja udaraca (N) sa zbijenošću pijeska i konzistencijom koherentnog tla

| Broj udaraca N | Zbijenost pijeska | Broj udaraca N | Konzistencija koherentnog tla |
|----------------|-------------------|----------------|-------------------------------|
| 0 do 4         | vrlo rahlo        | 2              | vrlo meko                     |
| 4 do 10        | rahlo             | 2 do 4         | meko                          |
| 10 do 30       | srednje zbijeno   | 4 do 8         | srednje tvrdo                 |
| 30 do 50       | gusto             | 8 do 15        | kruto                         |
| >50            | vrlo gusto        | 15 do 30       | vrlo kruto                    |
|                |                   | >30            | čvrsto                        |

SPT se koristi za određivanje čvrstoće i deformacijskih svojstava koherentnih i nekoherentnih tala. Prvenstveno se određuje relativna gustoća tla, a preko empirijskih korelacija mogu se odrediti posmična čvrstoća, modul elastičnosti,

slijeganja, nosivost temelja i druge veličine. Povezanost broja udaraca (N) sa zbijenošću pijeska i konzistencijom koherentnog tla vidimo u Tablici 4.

Zbog energetske neefikasnosti i različitosti postupka u praksi potrebne su mnogobrojne korekcije vrijednosti N. Najčešće je potrebno vršiti korekcije u odnosu na:

- Stvarni prijenos energije u šipke;
- Stvarnu dužinu šipki;
- Vertikalno efektivno naprezanje na određenoj dubini ispitivanja;
- Promjer bušotine;
- Nivo podzemne vode;
- Upotreba nestandardnog noža ili konusa.

Kad se uzmu u obzir faktori koji utječu na vrijednost N zabilježenu na terenu, korigirana vrijednost se najčešće dobiva kao:

$$N_{korigirani} = N \cdot C_e \cdot \lambda \cdot C_N \cdot C_S$$

gdje su:

- $N_{korigirani}$  - korigirana vrijednost broja udaraca,
- $N$  - broj udaraca izmjeren na terenu,
- $C_e$  - korekcija zbog prijenosa energije,
- $\lambda$  - korekcija zbog dužine šipki,
- $C_N$  - korekcija zbog efektivnog naprezanja,
- $C_S$  - korekcija zbog podzemne vode u pijescima.

### 3.3.2.2. Laka udarna sonda

DPL je kontinuirano dinamičko sondiranje, odnosno kontinuirani SPT. SPT i DPL se razlikuju po tome što se SPT izvodi na dnu bušotine svakih 1,5 m dubine (po potrebi to može biti i manje, ali ne manje od 60 cm i ne više od 3 m), dok se DPL

izvodi duž cijele bušotine. DPL ispitivanje se koristi za određivanje otpora tla prodiranju šiljka. Njime se prvenstveno određuje relativna gustoća tla, a onda se preko empirijskih korelacija ispitivanjem mogu odrediti posmična čvrstoća, modul elastičnosti, slijeganje, nosivost temelja i druge veličine (Strelec, 2012).

Osnovni princip dinamičkog sondiranja je da uteg standardne mase od 10 kg, koji je na vodilici s mehanizmom za dizanje i spuštanje, pada sa standardne visine od 50 cm za koje se kontinuirano mjeri broj udaraca uzastopno svakih 10 cm, tj. mjeri se broj potrebnih udaraca utega da se sonda punog konusnog šiljka površine 10 cm<sup>2</sup> (Slika 16.), pod kutem od 90° utisne u tlo 10 cm. Na kraju svake utisnute bušace šipke mjeri se torzijski moment potreban da se okrene šipka i da se onda na osnovi izmjenjenog momenta utvrdi indikacija o komponenti trenja i koliko ta komponenta utječe na otpor tla pri prodiranju sonde. Izračunava se otpor prodiranju sonde  $R_d$  te na osnovi dobivenog otpora prodiranja u tlo mogu se odrediti i drugi parametri tla: nedrenirana čvrstoća tla ( $c_u$ ), broj udaraca standardnog penetracijskog pokusa ( $N$ ), indeks zbijenosti tla ( $D_R$ ), kut trenja tla ( $\phi$ ), edometarski modul tla ( $E_{oed}$ ). Otpor prodiranju sonde izračunava se:

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

gdje su:

- $R_d$  – otpor tla prodiranju sonde
- $M$  – masa utega (10 kg)
- $M'$  – masa sonde, šipki (3,8 kg)
- $h$  – visina pada utega (50 cm)
- $N_{10}$  – broj udaraca potrebnih za penetraciju sonde od 10 cm
- $T$  – torzijski moment potreban za rotaciju šipke (Nm)
- $r$  – polumjer šipki (22 mm)
- $A$  – površina sonde (10 cm<sup>2</sup>)





Slika 16. Šiljak DPL sonde (Szavits-Nossan, 2006)

### 3.3.2.3. Plosnati dilatometar

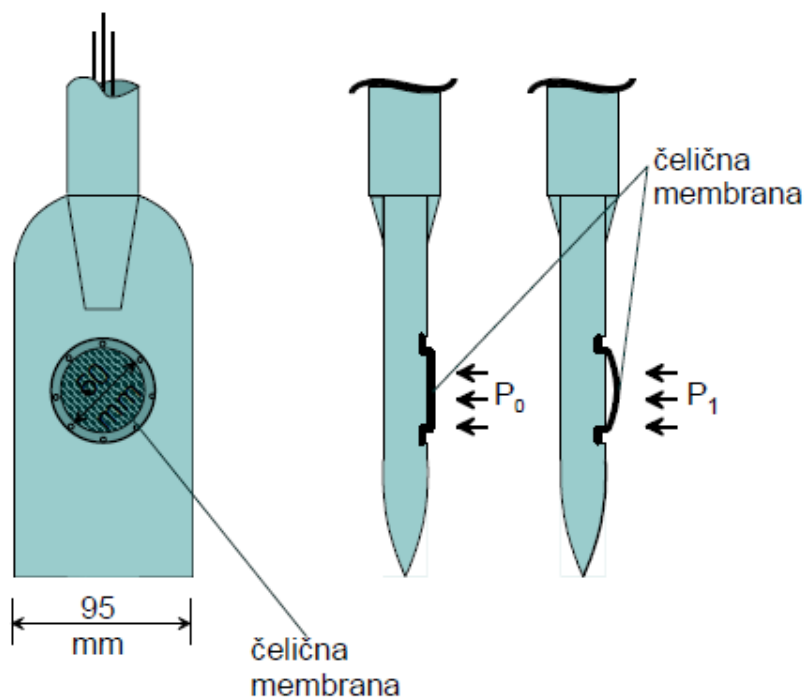
Ispitivanje dilatometrom se zasniva na utiskivanju čeličnog noža u tlo uz periodično zaustavljanje radi mjerenja specifičnih tlakova na određenoj dubini. Sonda se sastoji od čelika vrlo visoke čvrstoće, cijevi, jedinice za mjerenja tlaka i boca sa dušikom (Slika 17.). Sonda je 95 mm široka, 15 mm debljine sa oštricom na dnu. Na sondi se nalazi membrana promjera 60mm.



Slika 17. Oprema za dilatometar

Dilatometarskim ispitivanjem može se odrediti tip tla (glina, prah, pijesak), nedrenirana čvrstoća, modul vertikalne deformacije, te okarakterizirati prekonsolidacija tla. DMT je jedan od rijetkih instrumenata koji nudi modul za proračun slijeganja, pa je uz visoku osjetljivost na horizontalne napone dobar izbor u problemima prognoze slijeganja i ocjene postupka poboljšanja tla. Područje primjene za DMT je vrlo široko, od mekih do tvrdih tala i mekih stijena. Pogodan je za pijesak, prah i glinu, gdje je promjer zrna puno manji u odnosu na promjer čelične membrane (60 mm) (Strelec, 2012).

Ispitnu metodu ravnog dilatometra (DMT), opremu i izvorne korelacije opisao je Marchetti (1980). Ispitivanje se provodi tako da se sonda u vertikalno utiskuje u tlo. Sonda je s kontrolnom jedinicom na površini spojena pomoću elektro-pneumatskog kabla, koji prolazi kroz šipke za utiskivanje ili je izvana pričvršćen na njih. Određuje se kontaktno naprezanje tla -  $p_0$ , na membranu dok je poravnata s jednom plohom sonde, te još jedanput kad se izboči za 1,10 mm -  $p_1$ , tj. tlak  $p_0$  je tlak potreban da se membrana nađe u ravnotežnom položaju, a tlak  $p_1$  je tlak potreban da se membrana u svojem središtu izbaci za 1,1 mm horizontalno prema tlu (Slika 18.).



Slika 18. Mjerenja tlakova,  $p_0$  i  $p_1$  (Kvasnička i Domitrović, 2007)

Očitavanja moraju biti korigirana za efekt krutosti membrane da se dobije tlak odizanja  $p_0$  i tlak ekspanzije  $p_1$ . Korekcija se radi prema izrazima:

$$p_0 = 1,05 \cdot (A + \Delta A - z_m) - 0,05 \cdot (B - \Delta B - z_m)$$

$$p_1 = B - \Delta B - z_m$$

Gdje su:

- $\Delta A$  i  $\Delta B$  kalibracijski faktori za primijenjenu sukciju i ekspanziju membrane na atmosferskom zraku,
- $z_m$  je odstupanje mjernog uređaja od očitavanja 0. Kod novih uređaja to  $z_m=0$ .

Dva dilatometarska tlaka,  $p_0$  i  $p_1$  se kombiniraju sa hidrostatskim tlakom vode ( $u_0$ ) da se odrede tri indeksa.

Indeks materijala ( $I_D$ ) povezan sa klasifikacijom tla :

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0}$$

Indeks horizontalnog naprezanja ( $K_D$ ) povezan je sa in-situ horizontalnim stanjem naprezanja. Indeks  $K_D$  je stalno veći od  $K_0$  zbog poremećaja u tlu uslijed utiskivanja sonde:

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v'0}}$$

Dilatometarski modul ( $E_D$ ) je povezan sa stišljivošću tla :

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

Pomoću ta tri indeksa i korelacijama na osnovi dilatometarskog testa možemo odrediti: Naprezanje konsolidacije ( $\sigma_p'$ ), Nedrenirana posmična čvrstoća ( $c_u$ ), Kut

trenja tla ( $\Phi$ ), Stupanj prekonsolidacije (OCR), Tangentni modul stišljivosti (M), Young-ov sekantni modul kod 25% vrijednosti naprezanja kod sloma ( $E_{25}$ ), a preko empirijskog dijagrama i klasifikaciju tla.

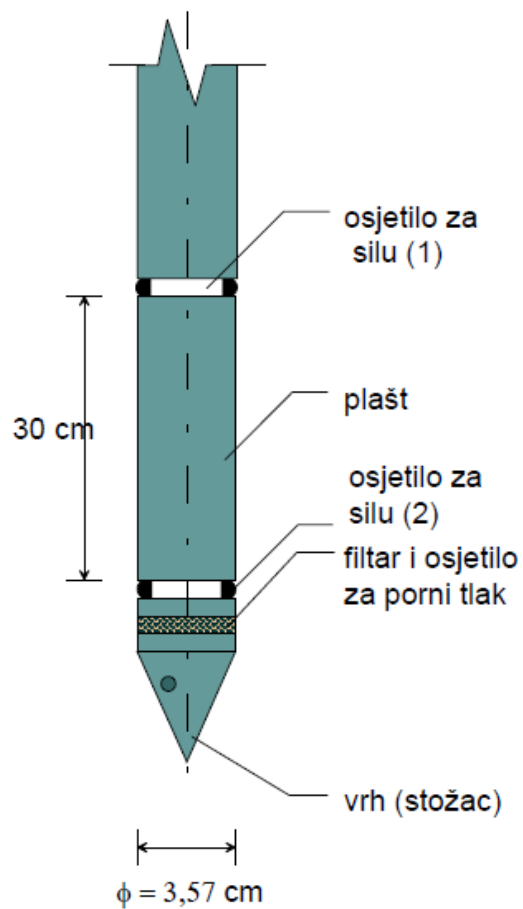
#### **3.3.2.4. Statički penetracijski pokus sa mjerenjem pornog tlaka**

Statički penetracijski pokus sa mjerenjem pornog tlaka ima velike prednosti u odnosu na tradicionalne metode istraživanja na terenu, poput bušenja i uzorkovanja, jer je brz, ponovljiv i ekonomičan. Pored toga, pruža gotovo kontinuirane podatke i ima snažnu teorijsku pozadinu. Te su prednosti dovele do stalnog porasta upotrebe i primjene ove metode u mnogim dijelovima svijeta (Robertson, Cabal, 2014). Ovaj pokus provodi se utiskivanjem u tlo posebne električne sonde promjera 35,7 mm (površine poprečnog presjeka 10 cm<sup>2</sup>), pomoću šipki istog promjera, brzinom 20 mm/s. Sonda na svom dnu ima šiljak konusnog oblika s vršnim kutom od 60°, koji mjeri otpor prodiranju kroz tlo, bilježen kao  $q_c$  (kN/m<sup>2</sup>). Sonda je opskrbljena električnim mjerenjima, koja omogućuju kontinuirano prikupljanje podataka tijekom prodiranja. Oprema za izvođenje testa uključuje mjernu sondu, uređaj za utiskivanje, šipke, električni kabel i sistem za prikupljanje izmjerenih podataka. Uređaj za utiskivanje mora imati dovoljnu težinu ili osigurati sidrenjem dovoljnu silu da može utisnuti sondu na predviđenu dubinu ispitivanja (Slika 19.).

Na plaštu sonde, iznad šiljka, nalazi se čelična košuljica koja mjeri silu trenja po svojoj površini,  $f_s$  (kN/m<sup>2</sup>). Kod CPT-u pokusa sonda je opskrbljena i uređajem za mjerenje tlaka vode (Slika 20.). Ovaj uređaj može biti smješten na samom šiljku (tlak vode se označava s  $u_1$ ), ili iza šiljka, neposredno ispod košuljice (tlak vode se označava s  $u_2$ ) (Szavits - Nossan, 2006). Rezultati ispitivanja se trenutno mogu pratiti na površini od strane operatera što omogućava donošenje odluke o odvijanju disipacijskog testa pornih tlakova u nekom sloju.



Slika 19. Hidraulički cilindar i oprema za utiskivanje, Van Der Berg, model Hyson LW100



Slika 20. Prikaz CPT-u sonde (Kvasnička i Domitrović, 2007)

Otpor na šiljku sonde ( $q_c$ ) je izmjerena sila na površini vrha sonde. To je izravno povezano sa nosivošću tla. U pijescima, otpor na vrhu sonde primarno je povezana sa efektivnim kutem trenja ( $\Phi'$ ), relativnom zbijenošću ( $D_r$ ) i efektivnim horizontalnim naprezanjem ( $\sigma_{ho}'$ ). Kod glinovitih materijala, otpor po vrhu sonde je povezan prvenstveno sa nedreniranom posmičnom čvrstoćom ( $c_u$ ) i naprezanjem prekonsolidacije ( $\sigma_p'$ ). Posebno u glinama i prahovima izmjereni otpor po vrhu sonde ( $q_c$ ) mora biti korigiran za porni tlak tako da dobivamo korigirano naprezanje na vrhu sonde ( $q_t$ ):

$$q_t = q_c + (1 - a_n) \cdot u_2$$

Gdje je:

- $a_n$  - odnos površina u ovisnosti sa tehničkom izvedbom sonde,
- $u_2$  - porni tlak uslijed utiskivanja sonde.

Trenje po plaštu sonde ( $f_s$ ) je posmično naprezanje određeno kao opterećenje koje djeluje na cilindričnu površinu plašta. Ta se vrijednost često izražava kao odnos trenja (FR) a dobiva se iz izraza:

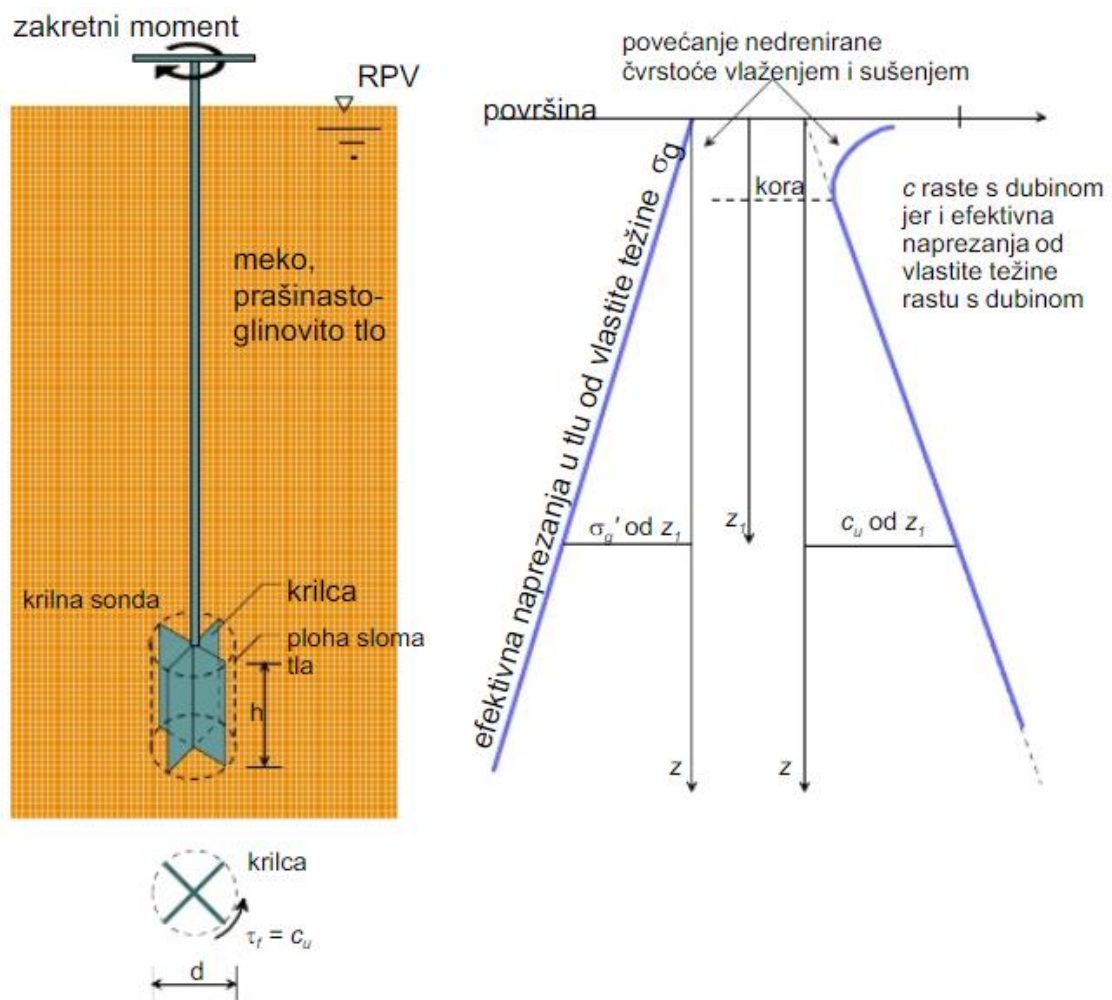
$$FR = \frac{f_s}{q_t} \cdot 100$$

U čistim pijescima  $FR < 1\%$ , a u glinama i prahovima  $FR > 4\%$ . Porni tlak izmjeren u poroznom filteru ( $u_2$ ) je približno jednak hidrostatskom tlaku ( $u_0$ ) u pijescima, dok je znatno veći (od 3-10 puta) od hidrostatskog tlaka ( $u_2 > u_0$ ) u mekanim do krutim glinama i prahovima.

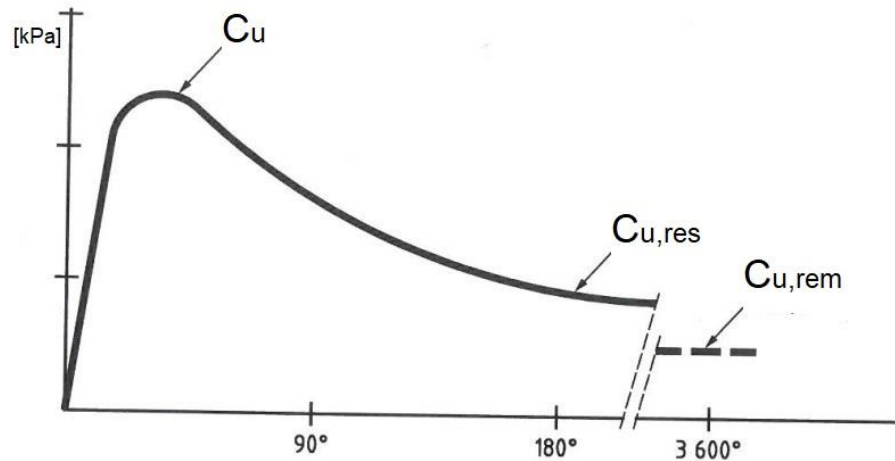
### 3.3.2.5. Krilna sonda

Krilna sonda služi za određivanje nedrenirane čvrstoće ( $c_u$ ) na terenu. Sonda se sastoji od dvije metalne ploče visine H i širine D, koje su međusobno poprečno pričvršćene za metalnu šipku pod kutom od  $90^\circ$ . Za tla veće čvrstoće koriste se krila manje, a za mekša tla veće širine i visine.

Pokus se izvodi tako da se sonda utiskuje, izravno u tlo ili kroz bušotinu (Slika 21.), do zadane dubine, a zatim zakreće s momentom, tako da do sloma tla dođe u nedreniranim uvjetima (tj. u vodi se mogu povećati porni tlakovi). Krilnu sondu treba okretati stalnom brzinom. Da se ostvare nedrenirani uvjeti, brzina okretanja u koherentnom tlu treba biti od  $0,1^\circ/\text{s}$  do  $0,2^\circ/\text{s}$  ( $6^\circ/\text{min}$  do  $12^\circ/\text{min}$ ). U mekom koherentnom tlu male osjetljivosti, brzina okretanja može biti i do  $0,5^\circ/\text{s}$  (Kvasnička i Domitrović, 2007). Prilikom rotacije određuje se moment torzije, odnosno ovom metodom određuje se vršna, rezidualna i pregnječena čvrstoća tla (Slika 22). Nakon postizanja maksimalnog momenta torzije, sonda se brzo okrene za otprilike 10 punih krugova, da bi se postigao i zabilježio moment pregnječenog tla.



Slika 21. Prikaz krilne sonde i rezultata ispitivanja (Kvasnička i Domitrović, 2007)



Slika 22. Odnos posmične čvrstoće i okreta sonde

- Vršna posmična čvrstoća  $c_u$  je maksimalna postignuta posmična čvrstoća.
- Rezidualna posmična čvrstoća  $c_{u,res}$  je posmična čvrstoća nakon rotacije sonde za  $180^\circ$ .
- Pregnječena posmična čvrstoća  $c_{u,rem}$  je posmična čvrstoća nakon rotacije sonde za  $3600^\circ$ .

Interpretacija rezultata slijedi pretpostavku da je oko sonde nastao slom tla, te je po površini valjka sonde (plaštu i obje baze) aktivirana nedrenirana čvrstoća  $c_u$ . Za standardne krilne sonde dimenzija  $D/H = 1/2$  nedrenirana posmična čvrstoća određuje se preko izraza:

$$c_u = 0,273 \cdot T_{max,u}/D^3$$

Gdje je:

- $T_{max,u}$  - izmjereni moment reduciran za otpor šipki,
- $D$  - promjer krilne sonde.



## 4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Laboratorijskim ispitivanjima obuhvaćeni su pokusi za određivanje općih i mehaničkih obilježja na poremećenim i neporemećenim uzorcima koherentnih i nekoherentnih tala.

Za nekoherentno tlo karakteristični uzorci tla, uzeti prilikom terenskih radova, osuše se do konstantne mase i siju kroz sita standardnih veličina otvora, nakon čega se važu pojedine frakcije i izračuna njihov odnos prema ukupnoj masi uzorka. Sijanje se provodi tako da se uzorak suhog tla mehaničkim trešenjem prosijava kroz niz sita, od kojih svako slijedeće ima manje otvore (Slika 23.).



Slika 23. Mehanička tresalica sa odgovarajućim sitima različitih promjera otvora

Na temelju dobivenih podataka o veličini čestica i njihovom udjelu u tlu, izrađuju se granulometrijski dijagrami koji prikazuju granulometrijski sastav tla (sastav tla prema veličini zrna). Dalje definiramo promjer efektivnog zrna  $D_{10}$  i promjer dominantnog zrna  $D_{60}$ . Promjer efektivnog zrna je onaj promjer zrna za dani uzorak tla od kojeg je 10% zrna tla manje, a promjer dominantnog zrna je onaj promjer od kojeg je 60% zrna tla manje, odnosno za dani uzorak je 10% zrna manje od  $D_{10}$ , a 60% zrna je manje od  $D_{60}$ .

Koeficijent jednoličnosti definiran je sa:  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

a koeficijent zakrivljenosti sa:  $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$

Tlo za koje je koeficijent zakrivljenosti granulometrijske krivulje između 1 i 3, dakle  $1 < C_c < 3$ , dobro je graduirano, uz uvjet da je također  $C_u > 4$  za šljunak, odnosno  $C_u > 6$  za pijesak. U slučaju da jedan od ova uvjeta nije ispunjen onda je šljunak odnosno pijesak slabo graduiran (simbol GP ili SP), (Kavur, 2015).

U geomehaničkom laboratoriju na neporemećenim i poremećenim uzorcima tla najčešće se ispituju slijedeća svojstva:

|                                     |                |                      |
|-------------------------------------|----------------|----------------------|
| - sadržaj prirodne vlage            | $w_o$          | (%)                  |
| - obujamska težina                  | $\gamma_{w,d}$ | (kN/m <sup>3</sup> ) |
| - specifična težina                 | $\gamma_s$     | (kN/m <sup>3</sup> ) |
| - Atterbergove granice plastičnosti | $w_{L,P}$      | (%)                  |
| - izravno standardno smicanje       |                |                      |
| a) kohezija                         | $c$            | (kN/m <sup>2</sup> ) |
| b) kut unutrašnjeg trenja           | $\varphi$      | (°)                  |
| - kompresija u edometru             |                |                      |
| a) koeficijent pora                 | $e$            | -                    |
| b) modul stišljivosti               | $M_v$          | (MN/m <sup>2</sup> ) |

Na konkretnom primjeru klizišta u Krivaji, uzeti su poremećeni i neporemećeni uzorci koherentnih tala te su izvedeni klasifikacijski pokusi, određivala se kohezija i kut unutrašnjeg trenja metodom izravnog posmika.

#### 4.1. GRANICE KONZISTENCIJE

Fizikalna svojstva koherentnog tla (prašine i gline) mijenjaju se s promjenom sadržaja vode. O sadržaju vode ovisi konzistencija tla čije se aktualno stanje iskazuje pomoću indeksa konzistencije ( $I_c$ ).

Granice konzistencije koherentnih materijala određuju se relativno jednostavnim geomehaničkim laboratorijskim ispitivanjima a korisni su pokazatelj za pouzdanu klasifikaciju raznih vrsta tla i njihovo raspoređivanje u skupine tla sličnih osnovnih fizikalno-mehaničkih svojstava.

U geomehanici se koriste tri vrste granica konzistencije:

- Granica tečenja (liquid limit), oznaka  $w_L$  ili LL - (raspon vrijednosti od 0% do 100%, uglavnom  $< 100\%$ );
- Granica plastičnosti (plasticity limit), oznaka  $w_p$  ili PL - (raspon vrijednosti od 0% do 100%, uglavnom  $< 40\%$ );
- Granica stezanja (shrinkage limit), oznaka  $w_s$  ili SL - (raspon vrijednosti do 30%).

**Granica tečenja** je mjera potencijalne kohezivnosti tla, a definirana je sadržajem vode (vlažnosti) na prijelazu koherentnog tla iz tekućeg u plastično konzistentno stanje. Odnosno, granica tečenja predstavlja onaj sadržaj vode pri kome koherentni materijal tla prelazi iz tekućeg u plastično konzistentno stanje (Strelec, Štuhec, 2011).

Pomoću ovog pokazatelja sitnozrnata tla se mogu podijeliti na sljedeće osnovne grupe:

- $w_L < 20\%$  - neplastično;
- $20\% < w_L < 50\%$  - niska plastičnost;
- $w_L > 50\%$  - visoka plastičnost.

#### Određivanje granice tečenja pomoću konusnog penetrometra

Ova metoda koristi se za ispitivanje granice tečenja koherentnih tla, a sastoji se u tome da se mjeri prodiranje konusa u homogenizirani uzorak tla koji se nalazi u posudi standardizirane visine 55 mm, kroz vrijeme od 5 sekundi. Postoje dvije

izvedbe konusnog penetrometra. Mehanički, kojem se vrijeme mjeri ručno i automatski, kod kojeg vrijeme mjeri sam uređaj. Granica tečenja metodom konusnog penetrometra postiže se kod dubine prodiranja konusa od 20 mm. Konzistentno stanje ispitivanih uzoraka mora odgovarati dubini prodiranja konusa od 15 do 25 mm.

**Granica plastičnosti** definirana je sadržajem vode na prijelazu iz plastičnog u polučvrsto konzistentno stanje tla, dok granicu stezanja definira vlažnost na prijelazu iz polučvrstog u čvrsto konzistentno stanje. Za određivanje granice plastičnosti nije potrebna aparatura.

#### Određivanje granice plastičnosti pomoću valjčića

Kod određivanja granice plastičnosti od uzorka tla se oblikuje valjčić, i rola sve dok se ne dobije valjčić promjera 3 mm. Kada se dosegne promjer od 3 mm, na valjčiću moraju biti vidljive dijagonalne pukotine. U slučaju da pukotina na valjčiću nema, postupak rolanja se ponavlja (Strelec, Štuhec, 2011).

#### **Indeks plastičnosti**

Dodaje li se sitni pijesak ili prah glinovitom materijalu, mnogo više se smanjuje granica tečenja nego granica plastičnosti, pa se smanjuje i indeks plastičnosti. S druge strane, granica plastičnosti znatno raste s povećanjem udjela organskih tvari, što opet nema učinka na granicu tečenja, pa se indeks plastičnosti smanjuje, povećava li se količina organskih tvari.

Razlika sadržaja vlage između granice tečenja i granice plastičnosti naziva se indeks plastičnosti:

$$I_p = w_L - w_p$$

Gdje je :

- $w_p$  - granica plastičnosti;
- $w_L$  - granica tečenja.

### Indeks konzistencije

Za koherentne vrste tla stanje konzistencije određuje se indeksom konzistencije, koji je definiran preko izraza :

$$I_C = \frac{w_L - w}{I_p}$$

Gdje je:

- $I_C$  - indeks konzistencije;
- $I_p$  - indeks plastičnosti ( $I_p = w_L - w_p$ );
- $w_L$  - granica tečenja;
- $w_p$  - granica plastičnosti
- $w$  - aktualna vlažnost tla (npr. prirodna vlažnost)

Kada je  $I_C$  jednak nuli, tada je materijal u konzistentnom stanju na granici tečenja, a kad je  $I_C$  jednak jedan, tada je materijal u konzistentnom stanju na granici plastičnosti.

### Indeks tečenja

Indeks tečenja je alternativni pokazatelj konzistentnog stanja koji se ponekad koristi umjesto indeksa konzistencije. Ukoliko je indeks tečenja negativan, vlažnost tla je manja od granice plastičnosti i zato je tlo u polučvrstom ili čvrstom stanju.

### Granica stezanja

Granica stezanja opisuje stanje vlažnosti pri kojemu se postignuti volumen uzorka ne smanjuje daljnjim sušenjem. Granica stezanja se dobiva polaganim sušenjem potpuno zasićenog uzorka volumena. Uzorak se važe prije sušenja i

nakon sušenja, kad se ponovno mjeri njegov volumen, obično uranjanjem u živu (Strelec, Štuhec, 2011).

Vlažnost na granici stezanja može se izračunati i pomoću izraza:

$$w_s = w - \frac{(V - V_d) \cdot \rho_w}{M_d} \cdot 100$$

gdje je:

- $w$  - vlažnost tla prije sušenja;
- $V$  - volumen tla prije sušenja;
- $V_d$  - volumen tla nakon sušenja (najmanji volumen);
- $M_d$  - masa tla nakon sušenja;
- $\rho_w$  - gustoća vode.

## 4.2. ODREĐIVANJE POSMIČNE ČVRSTOĆE

Posmična čvrstoća može se odrediti u laboratoriju i na terenu. Najčešće korišteni uređaj za ispitivanje posmične čvrstoće u laboratoriju je uređaj za izravni posmik. Osim tog uređaja koristi se i triaksijalni uređaj koji je složeniji za rukovanje, ali ima znatno bolje mogućnosti od uređaja za izravni posmik. Tako na primjer, u uređaju za izravni posmik nije moguće mjeriti porni tlak pa nije moguće razlikovati totalna i efektivna naprezanja; geometrija uređaja nameće plohu smicanja tj. zonu smicanja; kutija u kojoj se smiče uzorak ima trenje između okvira koje utječe na konačne parametre tla. Unatoč tim nedostacima, uređaj za izravan posmik daje zadovoljavajuće rezultate za potrebe projektiranja. Kako bi bolje razumjeli princip ispitivanja i interpretaciju rezultata kod izravnog posmika, moramo znati Mohr-Coulombov zakon čvrstoće.

#### 4.2.1. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće

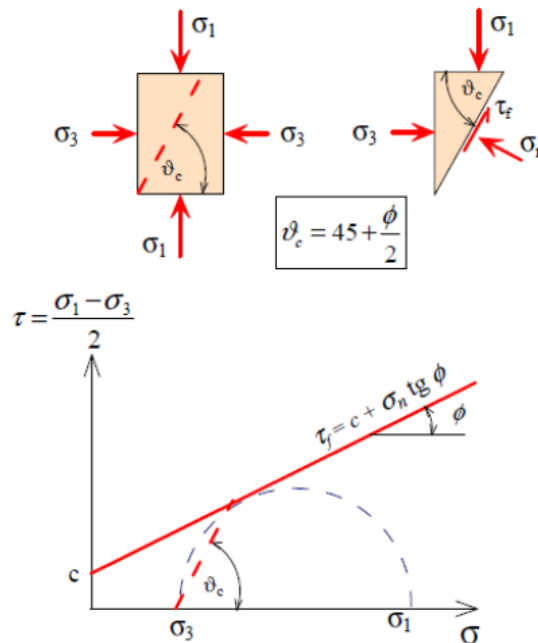
Posmična čvrstoća je kombinacija kohezije i kuta unutarnjeg trenja. Kut unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ) je posljedica trenja među česticama; viši je u šljuncima i pijescima nego u glinama i prahu, dok je kohezija ( $c$ ) posljedica veze između čestica; značajna je u glinama, dok je nema u čistim pijescima i šljuncima. Kohezija je osobina vrlo sitnozrnatih tala (čestice tla manje od  $0,06 \text{ mm}$ ), koja se zbog toga nazivaju koherentnim. Kako se smanjuje veličina čestica tla, tako se povećava njihov broj u jedinici volumena pri jednakom koeficijentu pora. Na dodirnim točkama, među česticama, djeluju električne i Van der Waalsove sile. Njihov je intenzitet veći što je manji razmak među česticama, a ukupni im je utjecaj u jedinici volumena to veći što u njemu ima više čestica i više točaka međusobnih dodira. Dakle, što su čestice manje, bit će dominantnije djelovanje Van der Waalsovih i električnih sila s obzirom na gravitacijske sile među česticama. Te sile ovise i o elektrokemijskim svojstvima vode u porama i mijenjaju se s njenim sastavom (Strelec i Štuhec, 2011).

Pod pojmom čvrstoća u području geotehnike općenito se podrazumijeva posmična čvrstoća zbog toga što do slučaja sloma kod građevina izgrađenih od zemljanih materijala, te ostalih objekata temeljenih na tlu, dolazi prekoračenjem posmične čvrstoće tla. Dovoljno dobar opis ponašanja tla pruža Coulombov zakon čvrstoće koji u totalnim napreznjima ima sljedeći oblik:

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi$$

- $\tau_f$  - posmična čvrstoća u trenutku sloma
- $\sigma_n$  - totalno normalno napreznje na plohi sloma
- $c$  - kohezija određena za totalna napreznja
- $\varphi$  - kut unutarnjeg trenja određen za totalna napreznja

Do sloma u tlu dolazi kada Mohr-ova kružnica naprezanja dodirne anvelopu sloma (Slika 24.). Uobičajeno se Coulomb-ov zakon čvrstoće naziva još i Mohr-Coulombov zakon posmične čvrstoće.



Slika 24. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće - grafički prikaz sloma (Matešić, 2010)

Terzagi je 1923. godine prvi uočio ulogu efektivnih naprezanja i potrebu uvođenja veličine pornog pritiska, ali je pri tome zadržao konstantu, koheziju. Efektivno normalno naprezanje ( $\sigma'$ ) predstavlja razliku između totalnog normalnog naprezanja ( $\sigma$ ) i pornog tlaka ( $u$ ) (Slika 25.) te posmična čvrstoća sada glasi:

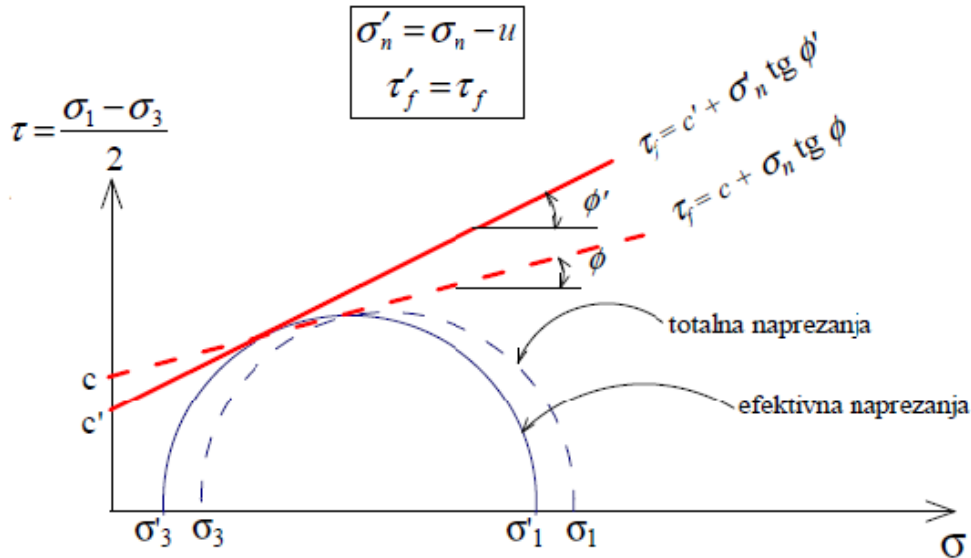
$$\tau_f = c' + \sigma'_n \cdot \tan \varphi'$$

gdje je:

- $\tau_f$  - posmična čvrstoća u trenutku sloma
- $\sigma'$  - efektivno normalno naprezanje na plohi sloma
- $c'$  - kohezija



-  $\phi'$  - kut unutarnjeg trenja

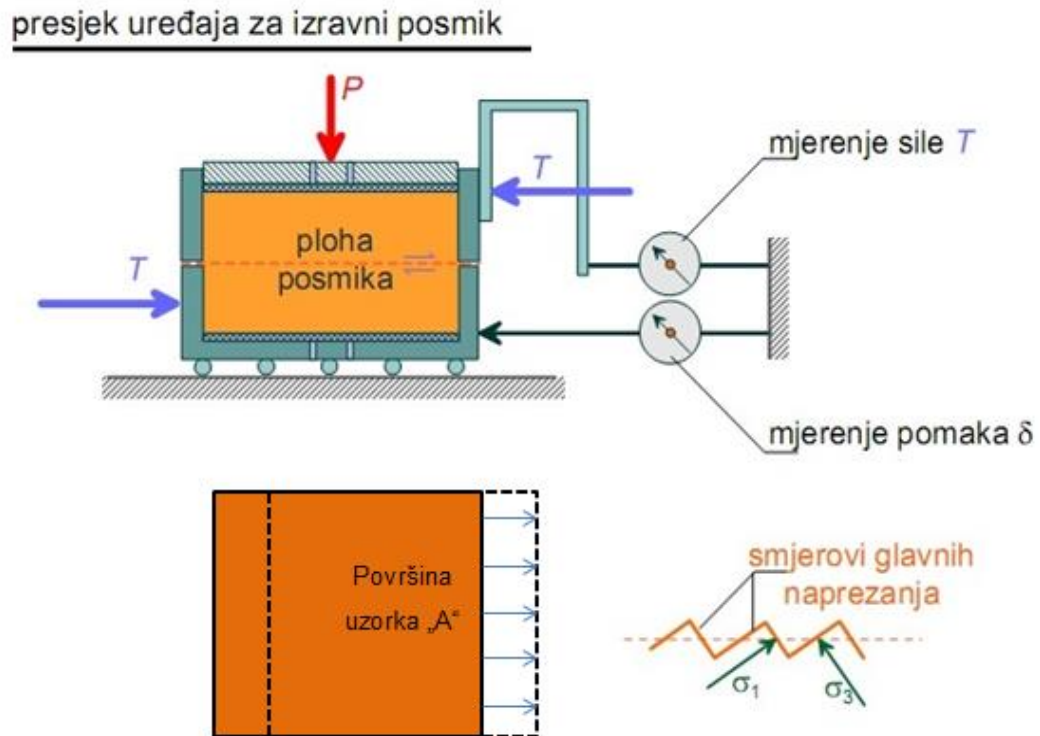


Slika 25. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće za totalna i efektivna naprezanja  
(Matešić, 2010)

#### 4.2.2. Uređaj za izravni posmik

Uređaj za izravni posmik (Slika 26.) jednostavni je i često korišteni laboratorijski uređaj. Sastoji se od dvodijelne čelične kutije razdijeljene horizontalno u koju se ugradi neporemećeni uzorak veličine 60×60×25 mm između dviju poroznih ploča. Kako se nanosi vertikalno opterećenje i uzorak se konsolidira. Nakon smirivanja vertikalne deformacije, koja se prati slično kao u edometarskom ispitivanju, izaziva se posmik: gornji i donji dio kutije pomiču se u horizontalnom smjeru jedan u odnosu na drugi. Deformacija uzorka koncentrirana je na usko područje oko horizontalne ravnine spoja dijelova kutija. Niti stanje naprezanja niti deformiranje uzorka nisu homogeni, ali tijekom smicanja razvija se klizna ploha slično kao u nekim procesima u tlu. Da bi se dobio zakon čvrstoće na smicanje, treba ispitati

najmanje tri uzorka, svaki pri različitom vertikalnom opterećenju  $P$  (Strelec, Štuhec, 2011). Iz parova vertikalnih i maksimalnih horizontalnih opterećenja formira se Coulombov pravac smicanja i iz njega preračunava kohezija ( $c$ ) i kut unutrašnjeg trenja ( $\varphi$ ).



Slika 26. Uređaj za izravni posmik (Kvasnička i Domitrović, 2007)

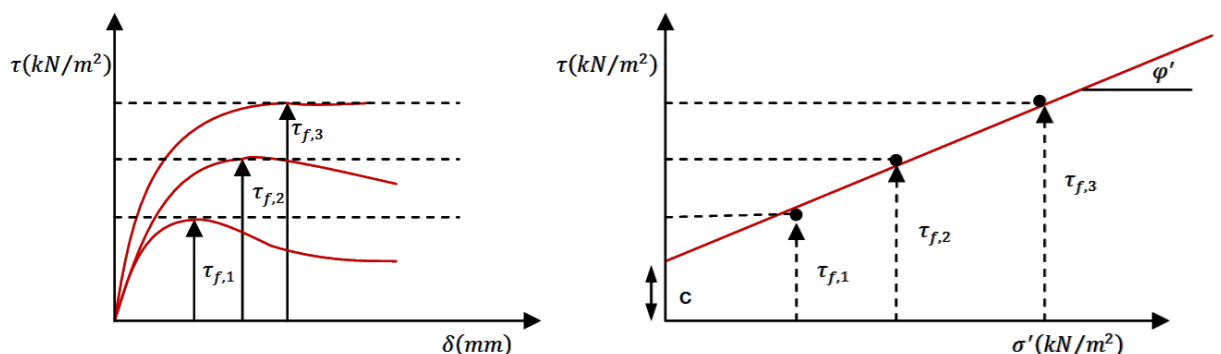
Rezultati pokusa izravnog posmika izražavaju se u totalnim napreznanjima koja su jednaka efektivnim kod pokusa s dovoljno sporom deformacijom da se omogući disipacija porenog tlaka i prethodna konsolidacija.

Prema načinu ispitivanja u aparatu za izravni posmik primjenjuju se tri standardna postupka koji se, prije svega, razlikuju po načinu dreniranja u pojedinim fazama opterećivanja:

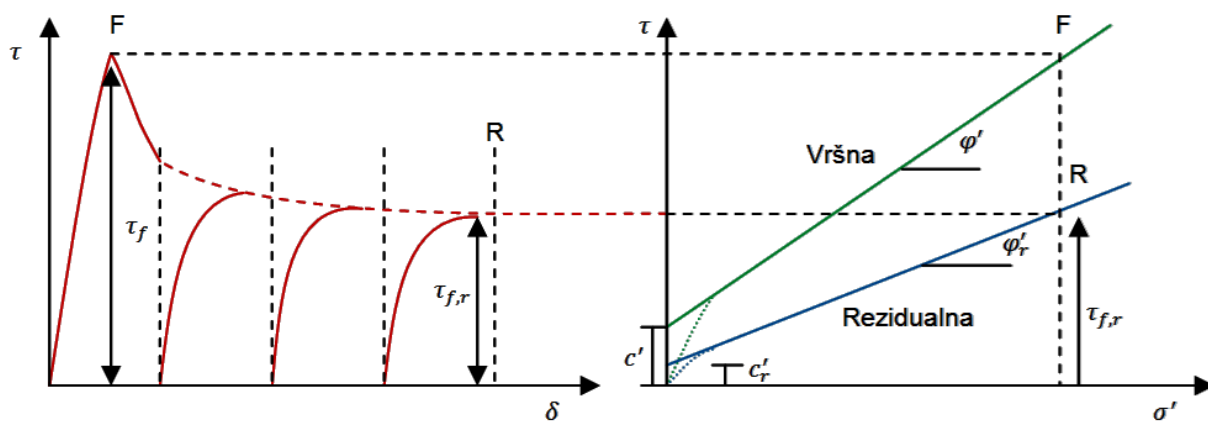
- DRENIRANI ili SPORI pokus (CD pokus) - postupak s dreniranjem u obje faze pokusa. Služi za određivanje vršne čvrstoće tla za efektivna napreznja (Slika 27.).

- NEDRENIRANI ili BRZI pokus (UU pokus) - postupak bez dreniranja u obje faze pokusa. Služi za mjerenje nedrenirane čvrstoće koja se izražava preko totalnih napreznja.
- POVRATNI ili REVERSNi pokus - drenirani pokus smicanja za određivanje rezidualne posmične čvrstoće za efektivna napreznja. Nakon dostizanja relativnih posmičnih pomaka, ne većih od oko 10% smicajne dužine uzorka, obično oko 5 mm, posmik se zaustavlja, okviri se vraćaju polako u početni položaj prije početka posmičnog opterećenja. Pričeka se vrijeme za ponovnu konsolidaciju i nakon toga ponovo polako smiče brzinom od oko 0,003 do 0,010 mm/min. Ovaj postupak ponavlja se sve dok nakon nekoliko ponovljenih ispitivanja posmična čvrstoća dalje ne opada (Slika 28.).

U svakom od navedenih vrsta pokusa se za nekoliko nivoa normalnih napreznja uspostavlja zavisnost između posmičnog napreznja u funkciji relativnih posmičnih pomaka između gornjeg i donjeg dijela uzorka. Zavisno od vrste pokusa, normalna napreznja mogu biti ili efektivna ili totalna. Maksimalne veličine napreznja smicanja se nanose na dijagram tako da one definiraju točke na anvelopi napreznja loma koja se najčešće aproksimira Coulombovim pravcem (Strelec, 2012).



Slika 27. Pomaci i napreznja kod pokusa izravnog posmika (Strelec, Štuhec, 2011)



Slika 28. Rezultati reversnog pokusa izravnog posmika (Strelec, Štuhec, 2011)

## 5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

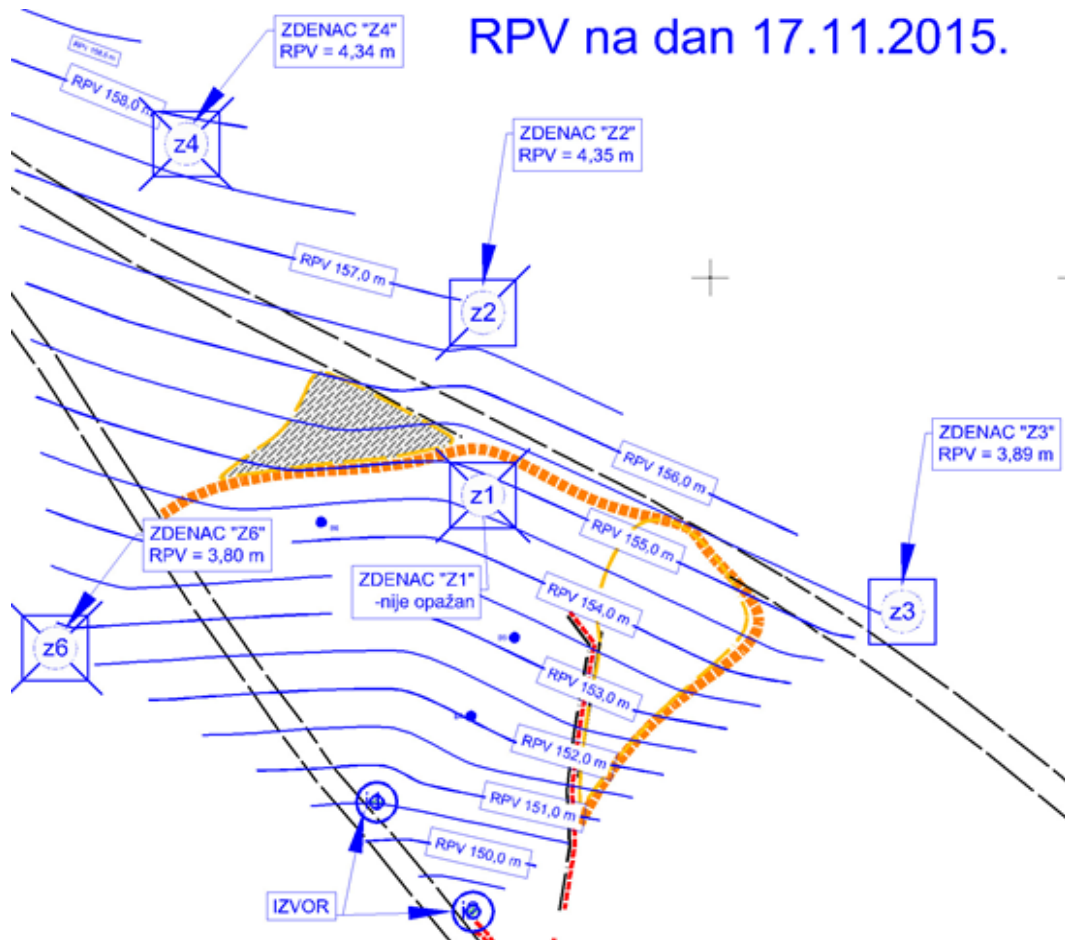
### 5.1. GEOLOŠKA GRAĐA TERENA

Lokaciju grade pleistocenske naslage (I<sub>g</sub>), a zastupljene su glinovitim siltom s proslojcima organske komponente. Osnovno tlo s geotehničkog klasifikacijskog aspekta grade uglavnom gline niske plastičnosti (CL), granice tečenja od  $w_L = 43-48\%$ , bez izražene slojevitosti, žuto-smeđe boje. Prelazna zona prema dubljim "šarim" glinama (proslojenost sivom glinom), dublje od 7,0 m, je gradacijska bez izražene oštre sedimentacijske granice. Gline sadrže malo do srednje dispergirane organske supstance (tamne mrlje). Kod bušotine B-2 u intervalu 5,30 do 7,70 m identificirana je iznimno šupljikava struktura sedimenta glina, što pokazuje geološku pripadnost grupi glinovitih siltova, a čime prema strukturi padine nestabilnost klasificira kao asekventno klizište, klizna ploha unutar jednorodnog tla.

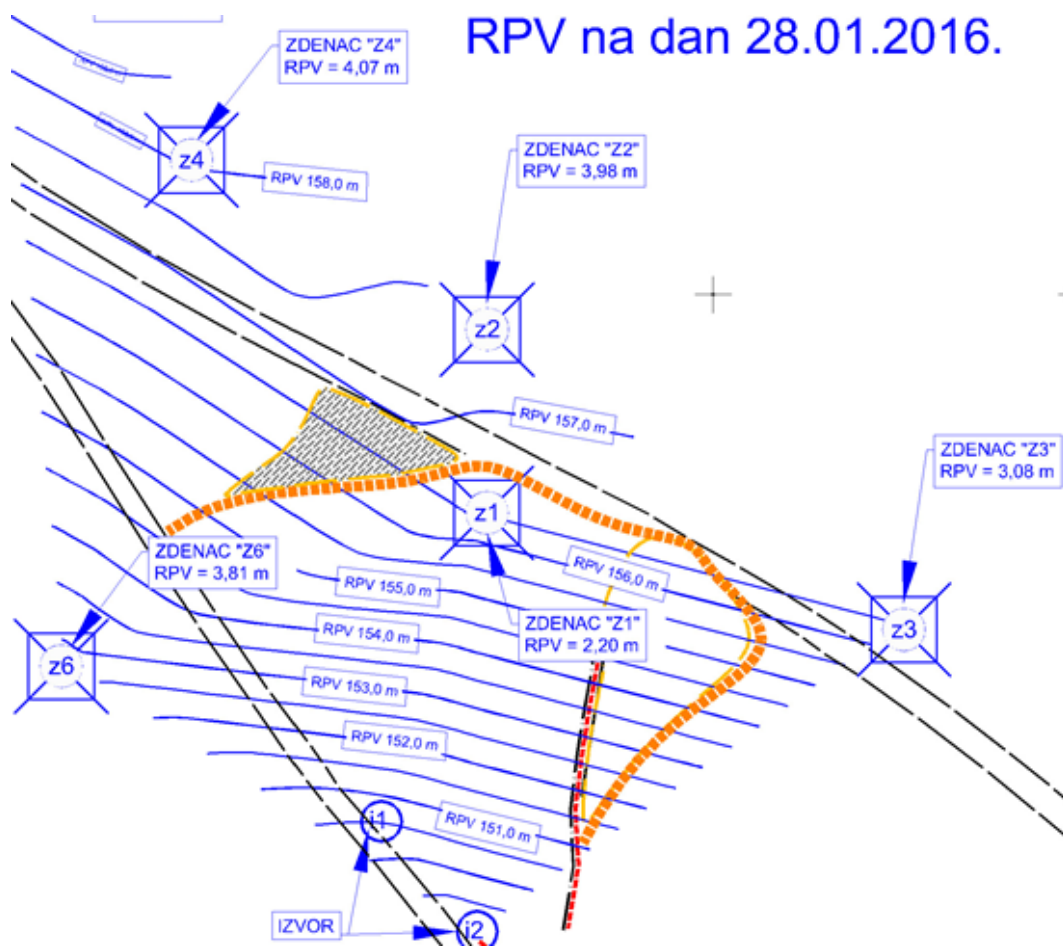
#### 5.1.1. Hidrogeološki uvjeti u tlu

Proslojci koji su sedimentacijski predisponirani omogućavaju lakše procjeđivanje vode u dublje slojeve, a što je karakteristika sedimentacije siltita, te tako i silitnih glina. Voda se u ove slojeve prihranjuje iz viših dijelova terena, te su tlakovi i fluktuacije vezane u topografiju i u pravilu su velikih iznosa. Isklinjavanjem opisanih slojeva, procijeđena voda nema mogućnost brze evakuacije iz padine, te se počne nakupljati u tlu, što povećava porne pritiske. Proslojak pjeskovitih glina utvrđen je na istražnim bušotinama B-1 i B-2 u intervalu od 5,30 do 7,70 m. Ovaj interval u pravilu je malih tlačnih čvrstoća i koincidira sa pojavom podzemne vode prilikom bušenja. U bušotinama u vrijeme istražnog bušenja zabilježena je pojava podzemne vode RPV od 2,60 do 6,0 m. Na predmetnoj lokaciji postoji niz zdenaca u kojima je opažana razina podzemne vode u svrhu izrade hidrogeološke karte (Slika 29. i 30.). Iz tih se podataka jasno vidi da se najveće fluktuacije razina podzemnih voda realiziraju upravo na prostoru klizišta, tako se u periodu od cca. 2 mjeseca, nakon otapanja snijega, razina podzemne vode na

klizištu podigla za preko  $>1,0$  m, dok je na "uzvodnim" zdencima "Z4" i "Z5" promjena minimalna.



Slika 29. Hidrogeološka karta sa hidroizohipsama na dan 17.11.2015



Slika 30. Hidrogeološka karta sa hidroizohipsama na dan 28.01.2016.

## 5.2. GEOELEKTRIČNA TOMOGRAFIJA

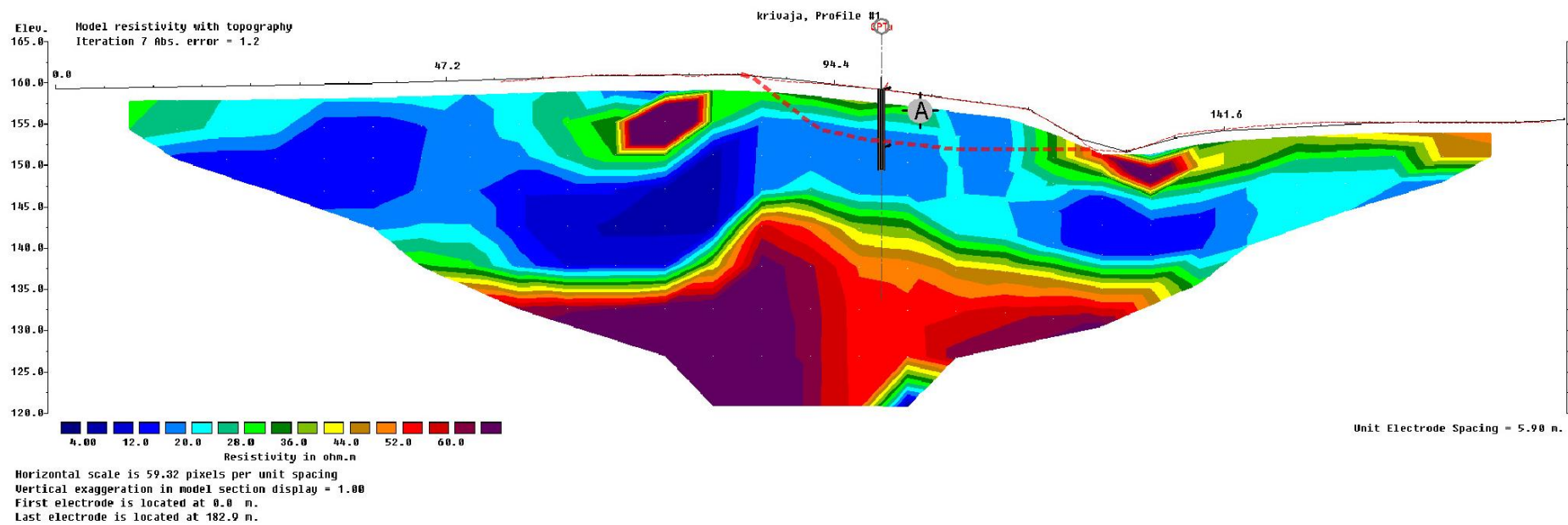
Geoelektrična tomografija izvedena je na jednom profilu ERT-1 Wennerovim mjernim rasporedom. Interpretirani rezultati prikazuju se kao grafički prikaz profila otpornosti sa dubinom. Profil se prikazuje u različitim bojama, koje prema legendi prikazuju zone različitih otpornosti. Trapezasti oblik grafičkog prikaza, gdje se sa udaljenošću od središta profila smanjuje dubina interpretacije, razlog je u postepenom smanjivanju prikupljenih podataka kako se razmak strujnih i potencijalnih elektroda povećava. Vrste temeljnog tla razlučene su sukladno profilu električne tomografije snimljene na lokaciji, kako je prikazano na Prilogu 1. U Tablici 5 su prikazane kategorije tla prema izmjerenim električnim otpornostima.

Na Slici 31 crtkanom linijom ograničen je prostor kliznog tijela koji odgovara nalazima statičke sonde CPTu-1. Iz profil električne tomografije ERT identificirano je da se klizno tijelo formiralo unutar jednorodnih naslaga glina (CL). Također su jasno vidljivi lokalizirani pjeskoviti sedimenti kojima odgovaraju povišene električne otpornosti u odnosu na osnovno tlo glina (CL). Zdenci uz sjeverni rub prometnice vjerojatno prate pjeskoviti sediment identificiran do dubine 10 m.

Tablica 5. Kategorije tla prema električnim otpornostima

| ELEKTRIČNA<br>OTPORNOST              | KLASIFIKACIJA TLA  | HIDRAULIČKE<br>KARAKTERISTIKE            |
|--------------------------------------|--|--|
| <b>&lt; 20 <math>\Omega</math>m</b>  | gline (osnovno tlo)  | slabo propusno                           |
| <b>20 - 50 <math>\Omega</math>m</b>  | prašinate gline  | slabo propusno                           |
| <b>50 - 100 <math>\Omega</math>m</b> | prašinski materijali kojima s povećanjem otpornosti u zadanom intervalu raste udio pijeska | slabo do srednje propusno, (promjenjivo) |





Slika 31. Model otpornosti u profilu elektricne tomografije ERT-1 Krivaja

### 5.3. ISTRAŽNA BUŠENJA I TERENSKA ISPITIVANJA TLA

Na lokaciji klizišta u mjestu Krivaja izvedeno je istražno bušenje s ukupno šest geomehaničkih istražnih bušotina. Tlocrtni razmještaj lokacija bušotina prikazan je na Prilogu 1. Bušenje bušotina izvedeno je motornom rotacijskom bušilicom uz kontinuirano jezgrovanje. Prilikom bušenja snimljena je fotodokumentacija (Slika 32.) sondažnih jezgri te su izrađeni sondažni profili bušotina (Slika 33.). Na sondažnim profilima bušotina, osim opisa slojeva i konzistencije koherentnog tla, prikazani su rezultati ispitivanja relativne zbijenosti tla, izvedeno standardnim penetracijskim pokusom (SPT), razina podzemne vode prilikom bušenja ali i neki rezultati laboratorijskih ispitivanja uzoraka kao što je: vlažnost, kut unutrašnjeg trenja, kohezija i indeks konzistencije. Na slikama 32. i 33. nalaze se primjeri za bušotinu B-2, dok su rezultati (sondažni profili) ostalih bušotina u Prilogu 2.



Slika 32. Prikaz sondažne jezgre bušotine B-2



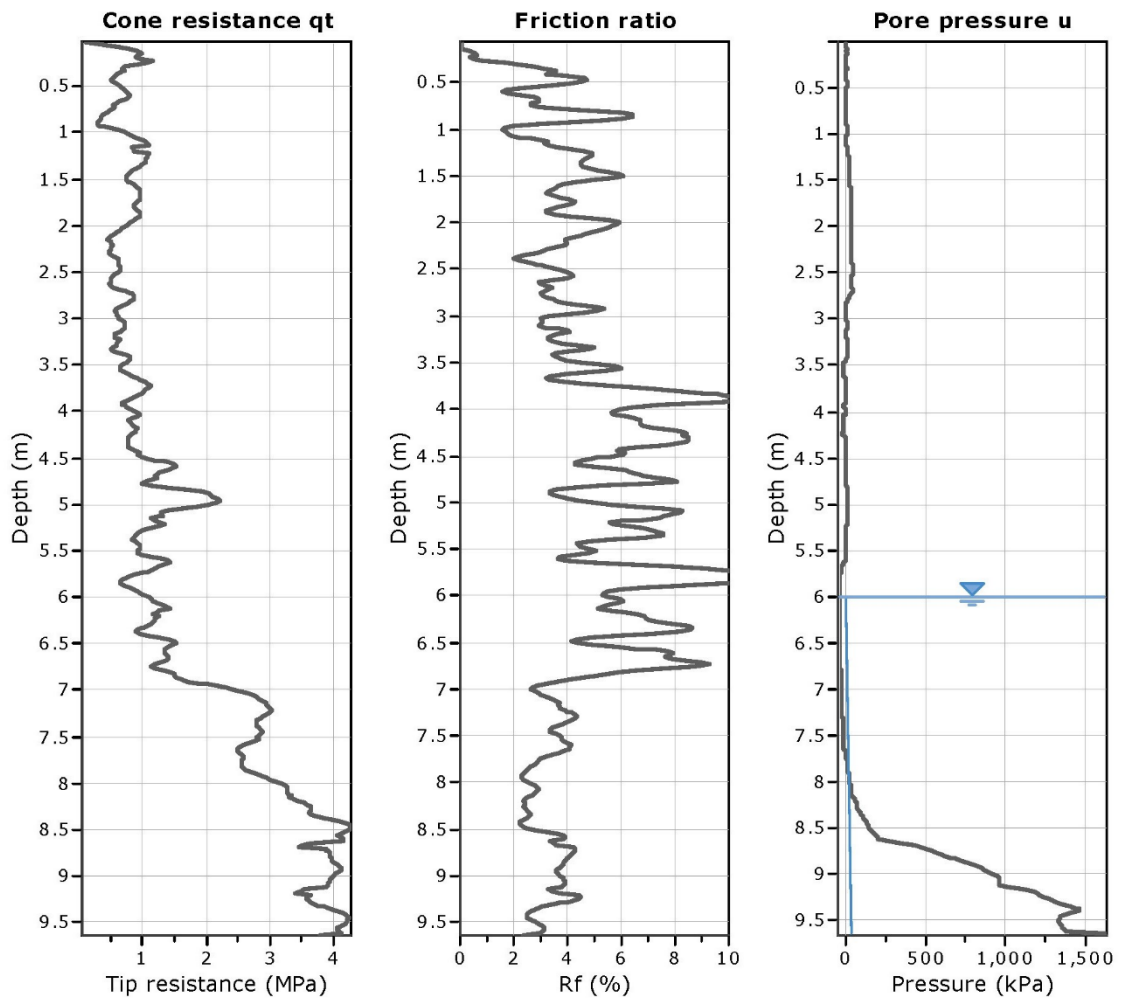
Provedeno je i statičko sondiranje CPTu sondama kao i dilatometarskim DMT sondama, tipa "Marchetti". Rezultati mjerenih parametara CPTu sondom prikazani su na slici 34, a mjereni rezultati dilatometarskom DMT sondom na slici 35. Ukupno je izvedena jedna (1) CPTu i jedna (1) DMT sonda, položajno pozicionirane na tijelu klizišta (Prilog 1).

Tablica 6. Rezultati ispitivanja nedrenirane posmične čvrstoće krilnom sondom na poziciji uz DPL-1:

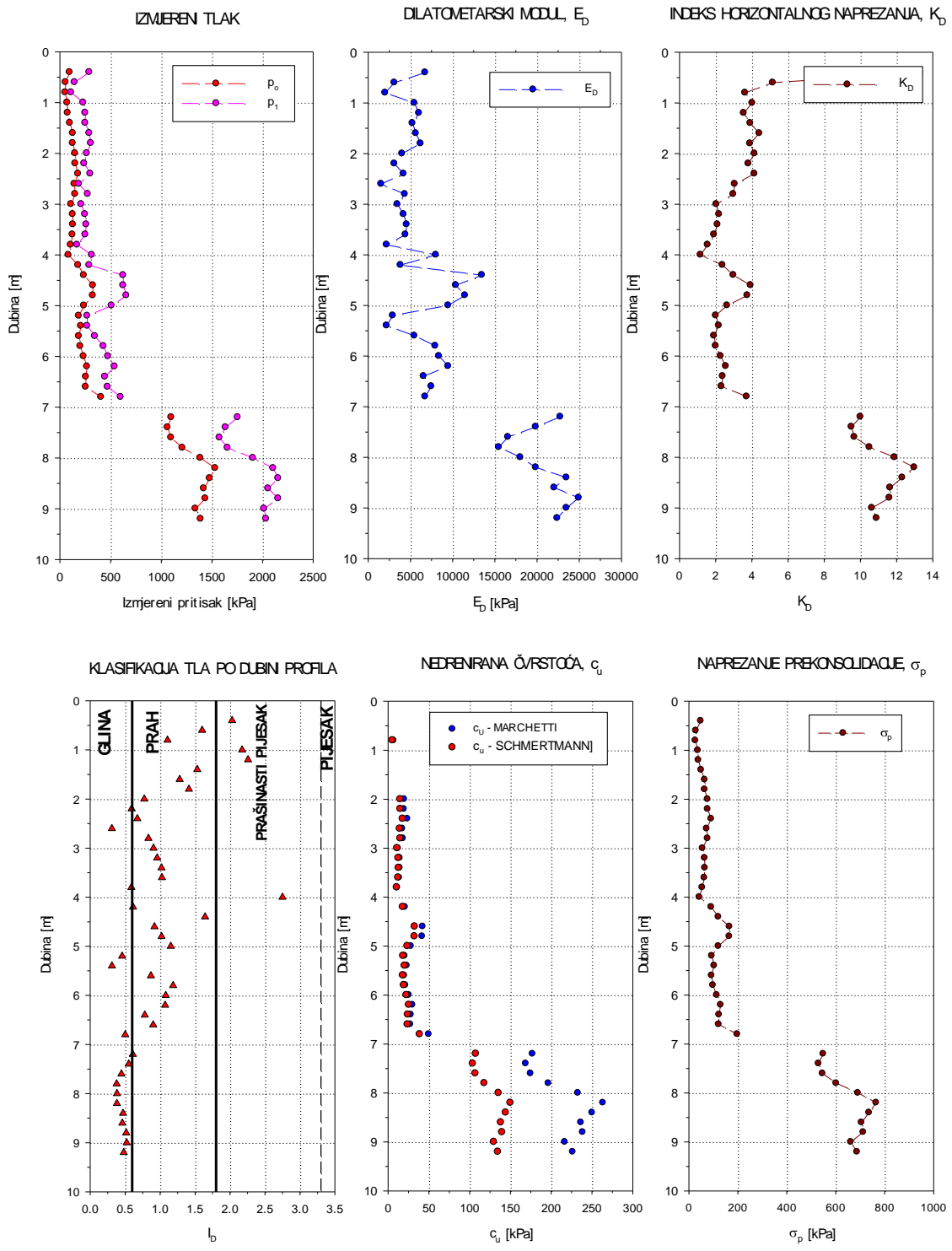
| DUBINA | $C_u$ (max)            | $C_u$ (rem) - pregnječeno |
|--------|------------------------|---------------------------|
| 1,80 m | 65,2 kN/m <sup>2</sup> | 55,3 kN/m <sup>2</sup>    |
| 1,50 m | 59,0 kN/m <sup>2</sup> | 31,0 kN/m <sup>2</sup>    |

Tablica 7. Rezultati ispitivanja nedrenirane posmične čvrstoće krilnom sondom na poziciji uz DPL-2:

| DUBINA | $C_u$ (max)            | $C_u$ (rem) - pregnječeno |
|--------|------------------------|---------------------------|
| 4,00 m | 24,0 kN/m <sup>2</sup> |                           |

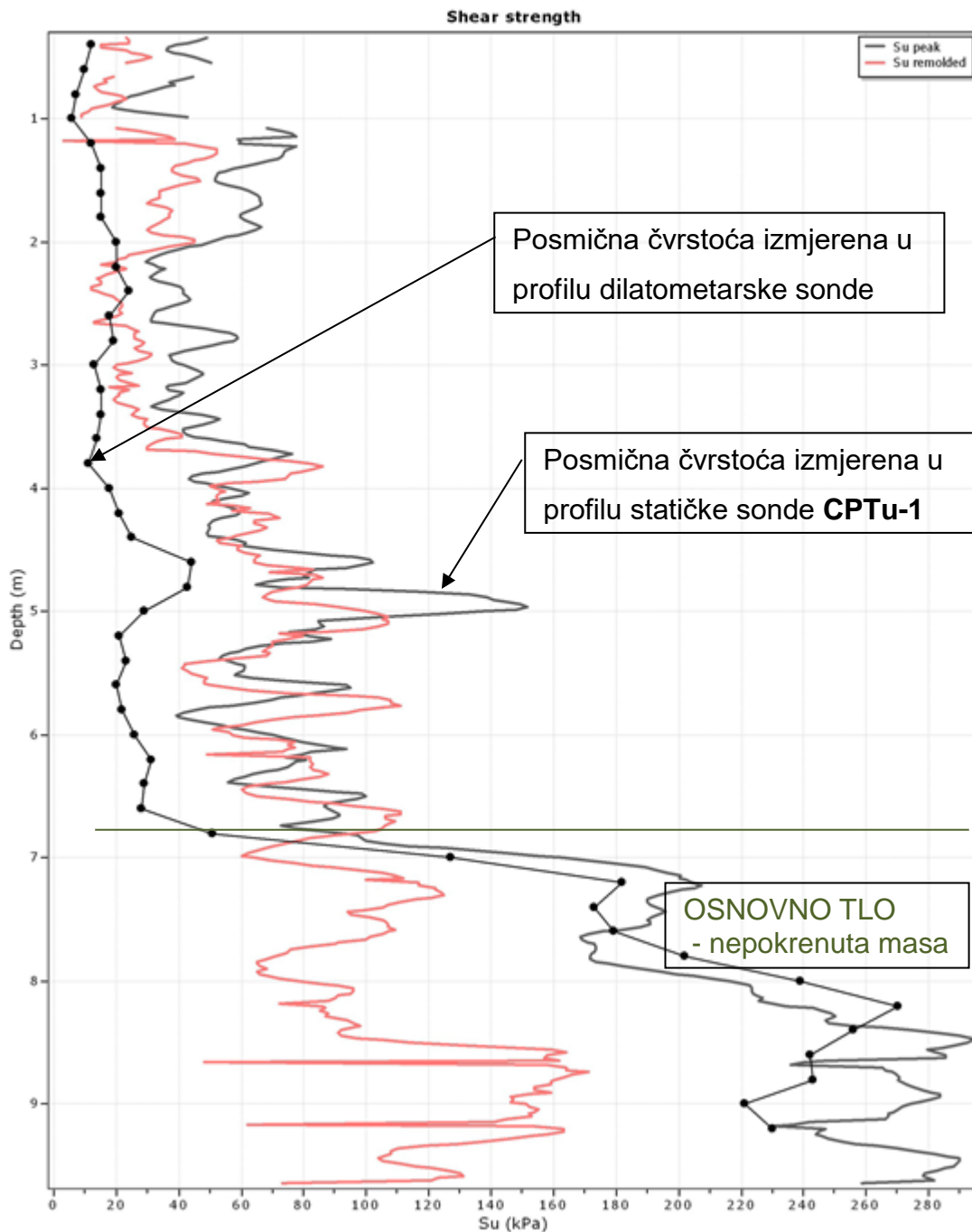


Slika 34. Rezultati mjerenja CPTu sondom (Cone resistance – otpor prodiranju šiljka; Friction ratio – indeks trenja; Pore pressure – porni tlak)



Slika 35. Rezultati ispitivanja dilatometrom DMT-1

Project:  
Location:



Slika 36. Nedrenirane posmične čvrstoće izmerene na sondama CPTu-1, te DMT-1.

Koluvijalna masa u tijelu klizišta malih je rezidualnih čvrstoća koje se kreću u rasponu od  $c_u = 20$  do  $30 \text{ kN/m}^2$  posmične čvrstoće tla (Slika 36.).

## 5.4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

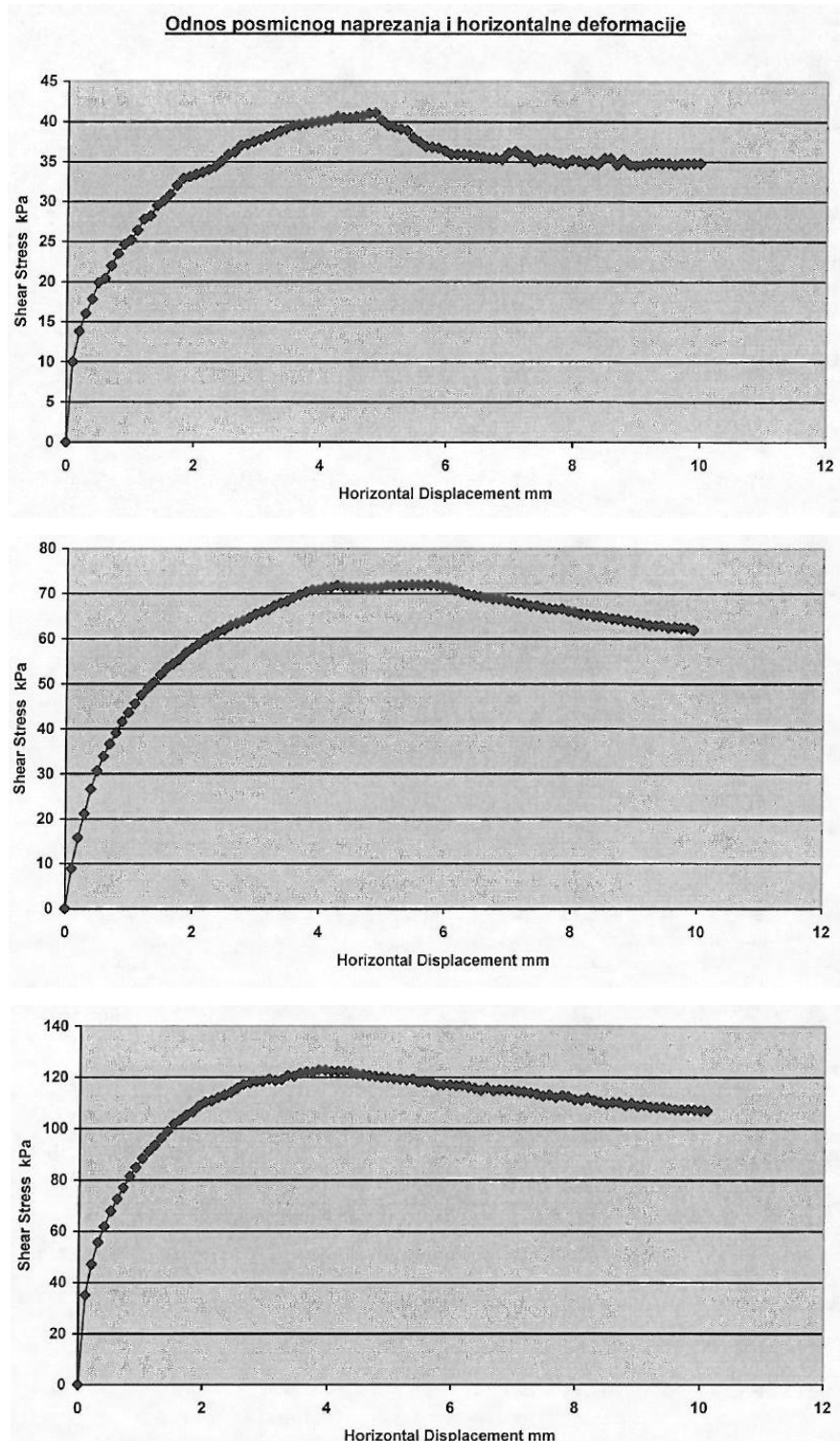
U geotehničkom laboratoriju ispitivani su neporemećeni uzorci (NU) i poremećeni uzorci iz jezgre (PU<sub>JEZ</sub>) s lokacije klizišta Krivaja. Ispitano je ukupno 13 uzoraka (6 NU i 7 PU). Laboratorijska ispitivanja provedena su u cilju utvrđivanja traženih fizikalnih i mehaničkih svojstava relevantnih za uvid u postojeće stanje tla, a prilagođena su stanju i dubini vađenja uzoraka. Određene su sljedeće geomehaničke karakteristike tla: zatečena vlažnost, vlažna i suha obujamska gustoća, granica tečenja i plastičnosti, indeks jednoosne tlačne čvrstoće i parametri posmične čvrstoće metodom izravnog posmika (kohezija i kut unutrašnjeg trenja).

Vlaga je u dostavnom stanju određena sušenjem uzoraka na temperaturi  $110 \pm 5$  °C do stalne mase. Obujamska gustoće uzoraka određivana je prema dimenzijama i masi probnih tijela za ispitivanje izravnim posmikom. Radi točne laboratorijske klasifikacije, određivane su granice konzistencije uzoraka tla. Granica tečenja  $w_L$  određivana je pomoću laboratorijskog statičkog konusnog penetrometra, a granica plastičnosti  $w_p$  izradom valjčića promjera 3 mm. Iz dobivenih vrijednosti za granice konzistencije i vlagu, izračunao se indeks plastičnosti  $I_p$  i indeks konzistencije  $I_c$ . Dobivene vrijednosti služe za klasifikaciju uzorkovanog tla te ocjenu stanja plastičnosti. Klasifikacija je provedena prema USC sustavu.

Jednoosna tlačna čvrstoća određena je indirektno, pomoću džepnog penetrometra. Kohezija i kut unutrašnjeg trenja određivani su na neporemećenom uzorku. Ispitni uzorci dimenzija 60\*60\*20 mm konsolidirani su u prepravljenom stanju pod vertikalnim opterećenjem od 54,6; 109,2; 2018,4 i 436,8 kN/m<sup>2</sup>. Smicanje je izvršeno pod istim opterećenjima u kutijastom, kompjuterski nadziranom aparatu za izravni posmik s kontroliranom deformacijom. Smicanje je izvršeno u dreniranim uvjetima pa se totalna vertikalna opterećenja mogu smatrati efektivnima. Rezultati izravnog posmika na uzorku iz bušotine B-1, uzorkovanog na dubini 6,10-6,30 m, prikazani su na Slici



37. i tablici 8, dok su rezultati ostalih laboratorijskih ispitivanja prikazani u tablici 9 i 10.



Slika 37. Odnos posmičnog naprezanja (Shear Stress) i horizontalne deformacije (Horizontal Displacement) na uzorku B-1 pod vertikalnim opterećenjem od 54,6; 109,2 i 2018,4 kN/m<sup>2</sup>

Tablica 8. Skupno izvješće rezultata izravnog posmika na uzorku iz bušotine B-1

| Skupno izvješće                              |               |               |               |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Uzorak                                       | A             | B             | C             |
| Normalno naprezanje                          | 56,6 kPa      | 109,2 kPa     | 218,3 kPa     |
| Vršna posmična čvrstoća                      | 41,1 kPa      | 71,8 kPa      | 122,9 kPa     |
| Horizontalna deformacija pri vršnoj čvrstoći | 4,840 mm      | 4,264 mm      | 3,837 mm      |
| Rezidualno posmično naprezanje               | -             | -             | -             |
| Brzina posmika                               | 0,0100 mm/min | 0,0100 mm/min | 0,0100 mm/min |
| Visina uzorka nakon ispitivanja              | 17,98 mm      | 17,53 mm      | 16,66 mm      |
| Ukupna horizontalna deformacija              | 9,983 mm      | 9,923 mm      | 10,096 mm     |
| Broj izvršenih posmika na uzorku             | 1             | 1             | 1             |

Tablica 9. Rezultati laboratorijskih ispitivanja

| UZORAK   |             |              | VRSTA ISPITIVANJA  |                       |                      |                     |                      |
|----------|-------------|--------------|--------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Bušotina | Dubina      | Vrsta uzorka | Vlažnost tla       | GRANICE KONZISTENCIJE |                      | INDEKSI             |                      |
|          |             |              |                    | Granica tečenja       | Granica plastičnosti | Indeks plastičnosti | Indeks konzistencije |
|          | (m)         |              | w <sub>0</sub> [%] | w <sub>L</sub> [%]    | w <sub>p</sub> [%]   | I <sub>p</sub> [%]  | I <sub>c</sub> [1]   |
| B - 1    | 4,10 - 4,40 | NU           | 24,5               | 47,7                  | 22,7                 | 25,0                | 0,93                 |
| B - 1    | 6,10 - 6,30 | NU           | 30,4               | 44,4                  | 20,5                 | 23,9                | 0,59                 |
| B - 1    | 9,70 - 9,90 | NU           | 23,2               | 45,9                  | 22,2                 | 23,7                | 0,96                 |
| B - 2    | 2,50 - 2,70 | NU           | 25,0               | 47,5                  | 22,4                 | 25,1                | 0,90                 |
| B - 2    | 6,60 - 6,80 | NU           | 29,2               | 43,3                  | 20,4                 | 22,9                | 0,62                 |
| B - 2    | 8,60 - 8,80 | NU           | 19,6               | 37,8                  | 18,0                 | 19,8                | 0,92                 |
| B - 3    | 4,00        | PU           | 26,1               | 45,7                  | 19,6                 | 26,1                | 0,75                 |
| B - 3    | 7,00        | PU           | 24,5               | 47,2                  | 21,2                 | 26,0                | 0,87                 |
| B - 4    | 3,00        | PU           | 24,4               | 43,1                  | 20,2                 | 22,9                | 0,82                 |
| B - 4    | 5,00        | PU           | 24,8               | 48,6                  | 20,8                 | 27,8                | 0,86                 |
| B - 5    | 3,20        | PU           | 22,9               | 42,8                  | 21,2                 | 21,6                | 0,92                 |
| B - 5    | 5,50        | PU           | 24,6               | 42,0                  | 19,7                 | 22,3                | 0,78                 |
| B - 6    | 2,00        | PU           | 29,6               | 40,0                  | 20,0                 | 20,0                | 0,52                 |

Tablica 10. Rezultati laboratorijskih ispitivanja

| UZORAK   |             |              | VRSTA ISPITIVANJA    |                      |                      |                |                              |                              |
|----------|-------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|
| Bušotina | Dubina      | Vrsta uzorka | GUSTOĆA              |                      | IZRAVNI POSMIK       |                | TLAČNA ČVRSTOĆA penetrometar | Klasifikacija po USC sustavu |
|          |             |              | vlažna               | suha                 | Kohezija             | Kut un. trenja |                              |                              |
|          | (m)         |              | [g/cm <sup>3</sup> ] | [g/cm <sup>3</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] | φ [°]          | [kN/m <sup>2</sup> ]         |                              |
| B - 1    | 4,10 - 4,40 | NU           |                      |                      |                      |                | 260                          | CL                           |
| B - 1    | 6,10 - 6,30 | NU           | 1,97                 | 1,51                 | 15,5                 | 26,5           | 50                           | CL                           |
| B - 1    | 9,70 - 9,90 | NU           | 2,03                 | 1,65                 | 25,7                 | 21,8           | 330                          | CL                           |
| B - 2    | 2,50 - 2,70 | NU           |                      |                      |                      |                | 280                          | CL                           |
| B - 2    | 6,60 - 6,80 | NU           | 1,96                 | 1,52                 | 7,8                  | 26,7           | 70                           | CL                           |
| B - 2    | 8,60 - 8,80 | NU           | 2,05                 | 1,71                 | 11,7                 | 29,0           | 350                          | CL                           |
| B - 3    | 4,00        | PU           |                      |                      |                      |                |                              | CL                           |
| B - 3    | 7,00        | PU           |                      |                      |                      |                |                              | CL                           |
| B - 4    | 3,00        | PU           |                      |                      |                      |                |                              | CL                           |
| B - 4    | 5,00        | PU           |                      |                      |                      |                |                              | CL                           |
| B - 5    | 3,20        | PU           |                      |                      |                      |                |                              | CL                           |
| B - 5    | 5,50        | PU           |                      |                      |                      |                |                              | CL                           |
| B - 6    | 2,00        | PU           |                      |                      |                      |                |                              | CL                           |

#### 5.4.1. Geomehaničke značajke materijala padine

Identifikacijom nabušene jezgre iz sondažnih bušotina, provedenog statičkog sondiranja, te laboratorijskih ispitivanja utvrđen je sljedeći litološki sastav tla na lokaciji:

#### SRASLO TLO (nepokrenuta masa)

- Gline niske plastičnosti (CL) dubine 0,00 - 10,00 m

Sraslo tlo na lokaciji grade gline niske plastičnosti (CL,  $w_L=43-48\%$ ), žuto-smeđe boje, kruto plastičnog konzistentnog stanja.

- $q_c = 260 - 300 \text{ kN/m}^2$ ,  $N = 7-9 \text{ ud./stopi.}$ ,  $c_u = 100 - 200 \text{ kN/m}^2$ .
- $\gamma = 19,6 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 7 \text{ kN/m}^2$  i  $\phi = 26^\circ$

## **KOLUVIJALNA MASA U TIJELU KLIZIŠTA (pokrenuta masa)**

- Glina niske plastičnosti (CL) dubine 0,00 - 6,70 m

Parametri tla :

- $c_u = 20 - 30 \text{ kN/m}^2$ ,  $\gamma = 19,0 \text{ kN/m}^3$ .

## **PARAMETRI TLA U KLIZNOJ PLOHI**

- Glina niske plastičnosti (CL)

Iz statičkih sondi također je identificirano da je u zoni klizanja koeficijent vodopropusnosti iznimno mali  $k < 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ , što predstavlja razliku u odnosu na litološki profil plićih formacija.

- Minimalni izmjereni parametri:  $c_u = 11 \text{ kN/m}^2$ ,  $\gamma = 18,0 \text{ kN/m}^3$ .

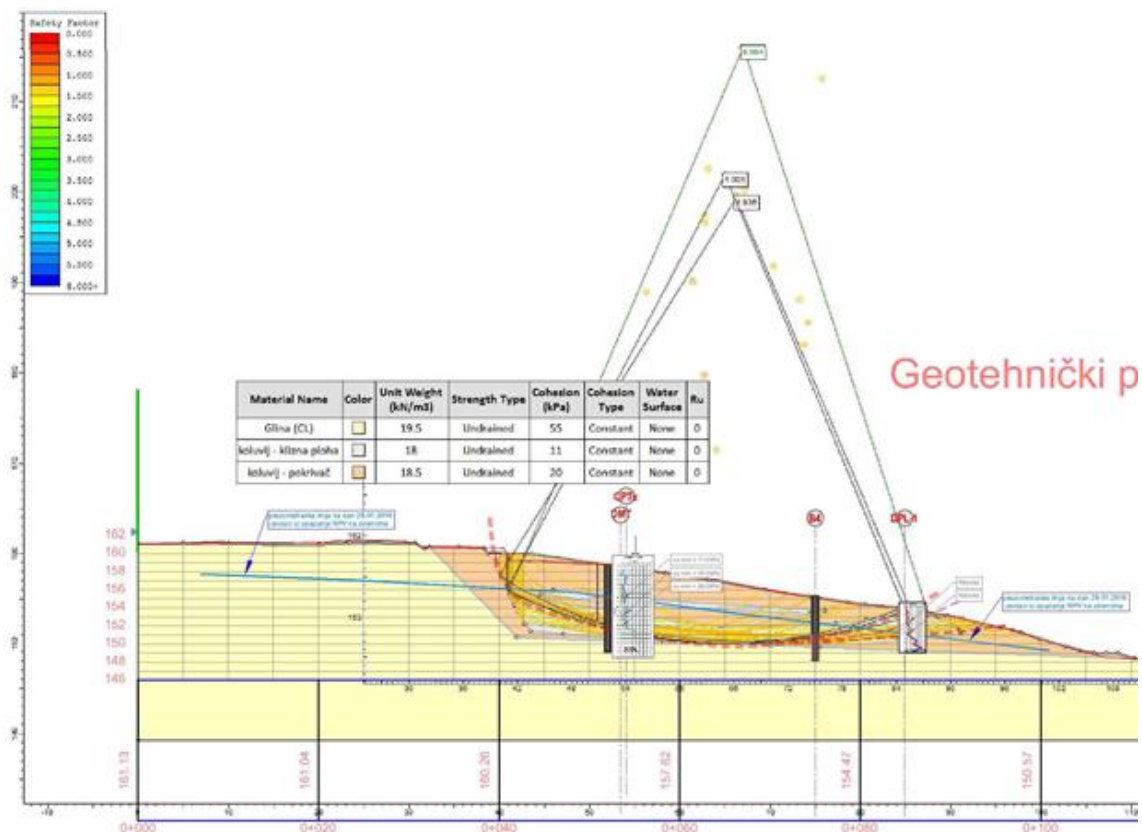
## **5.5. STABILNOST PADINE NA KLIZANJE**

Analiza stabilnosti padine na kojoj se pojavila nestabilnost rađena je prema metodi "Bishop" baziranoj na analizi momenta ravnoteže potencijalno nestabilnog segmenta tla kojemu se kao ploha klizanja pretpostavlja cilindrična površina. Proračun se svodi na određivanje faktora sigurnosti protiv klizanja ( $F_s$ ).

Proračun stabilnosti po Bishopu rađen je računalnim programom Rocscience Inc, SLIDE 6.0. (Rocscience Inc., 2002). Kod proračuna faktor 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 kako bi se ilustrirao trend pomicanja kliznih ploha.

Proračun stabilnosti kosine dan je za slučaj s minimalnim parametrom posmične čvrstoće na kliznoj plohi od  $c_u = 11$  kPa, te zatečeno stanje padine. Model s korištenim ulaznim parametrima tla i opterećenjima prikazan je na Slici 38.

Ostvareni faktori sigurnosti približno iznose  $F_s=1$ , što znači da za odabrane parametre modela vlada labilna stabilnost. Za ovakvu povratnu analizu nisu primijenjeni parcijalni faktori, te su karakteristične vrijednosti = projektnim vrijednostima, a  $F_s=1$  znači ravnotežu destabilizacijskih i stabilizacijskih djelovanja. Iz analize je jasno da je na klizištu formirano duboko klizno tijelo, > 6,0 m.

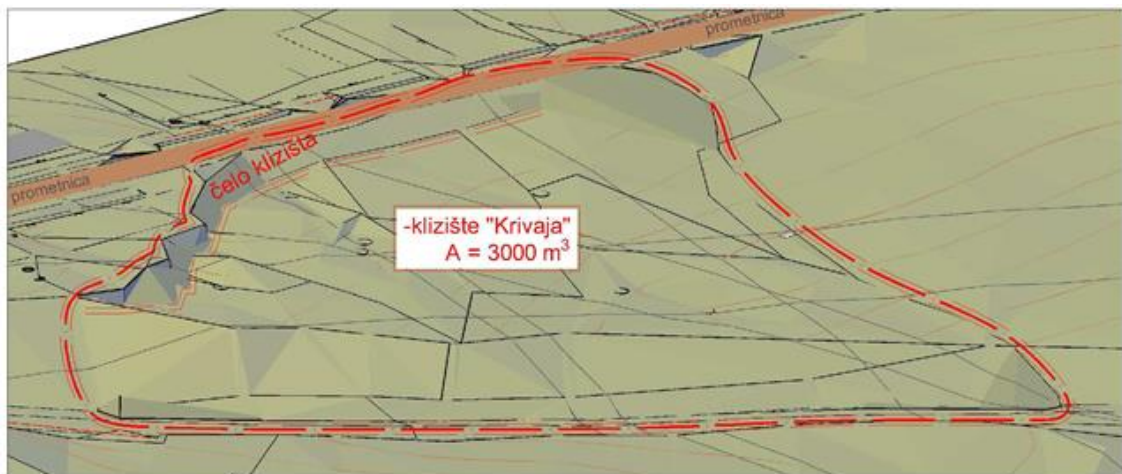


Slika 38. Karakteristični profil i model tla korišten pri proračunu tla na klizanje

## 6. ANALIZA REZULTATA

### 6.1. RAZVOJ PROSTORNOG MODELA KLIZIŠTA

U zatečenom stanju klizanjem je zahvaćeni dio kolnika u dužini 50 m sa jasno formiranom vlačnom pukotinom, te skokom u čeonom dijelu. Od ostalih markantnih obilježja vidljivo je najahivanje u stopi i drugi mikroreljefi. Na slici 39 prikazan je model klizišta s jasnim granicama površine  $A=3000 \text{ m}^2$ .



Slika 39. Pogled na model klizišta "Krivaja"

Cestovno klizište u mjestu Krivaja je klizište sa dubokom kliznom plohom, kretanje mase događa se po jedinstvenoj kliznoj plohi. Prema vremenu nastanka to je recentno klizište sa brzim pomakom. Glavni razlog nastalih pomaka i razvoja klizišta je nakupljanje, odnosno visoka razina procjednih voda, te popuštanje padinske nožice. Na klizištu "Krivaja" padinska nožica je pokos zasjeka, što je vrlo nepovoljna strukturna karakteristika.

Za dubinu klizne plohe utvrđenu istražnim radovima izrađen je geometrijski model klizišta prikazan na slici 40. Gledano razvojnom dinamikom, na klizištu je ograničeno delapsivno klizište na slici 40 označeno oznakom "A". Osim glavnog



klizišta, u razvojnoj karakteristici zabilježeno je i sekundarno rotacijsko-translacijsko klizanje označeno sa slici 40 oznakom B.



Slika 40. Podjela klizišta prema kinematici pomaka.

#### Kinematika klizišta:

- A. Primarni dio klizišta sa dubokom kliznom plohom (>6,0 m). Pomaci su jasno ograničeni vlačnom pukotinom na čelu klizišta, te najahavanjem u stopi. Glavnina pomaka, sukladno morfologiji vlačne pukotine nastala je na dijelu označenom na slici 40 dodatnom crvenom oznakom, a na čijem prostoru je vidljiva duboka pukotina >2,50 m, gotovo vertikalne orijentacije. Vlačna pukotina na prostoru

prometnice polegnuta je, odnosno u blažem nagibu što potvrđuje razvojnu dinamiku klizišta.

- B. Delapsivni sekundarni dio klizišta kao posljedica primarnog klizanja "A". Pomak na tijelu je translacijsko-rotacijski, sukladno jasno vidljivim radijalnim pukotinama na tom dijelu klizišta.
- C. Ovaj prostor nije primarno zahvaćen klizištem, ali je destabiliziran pomacima na tijelu klizišta. Evidentno je usjedanje navedenog prostora zbog gubitka pasivnog oslonca na prostoru formiranog čela klizišta. Ovaj prostor je ugrožen, a predstavlja nestabilan prostor za delapsivan razvoj klizišta.

Iz analize je jasno da se klizište sastoji od duboke klizne plohe. Klizište je delapsivnog karaktera, prema brzini pomaka - brzo.

Klizište se klasificira kao:

Duboko klizanje po jedinstvenoj kliznoj plohi, > 6,0 m, prema strukturi asekventno (unutar jednorodnog materijala), jasnih granica klizišta, površine  $A=3000 \text{ m}^2$ . Delapsivan razvoj klizišta s rotacijskim tipom klizanja.

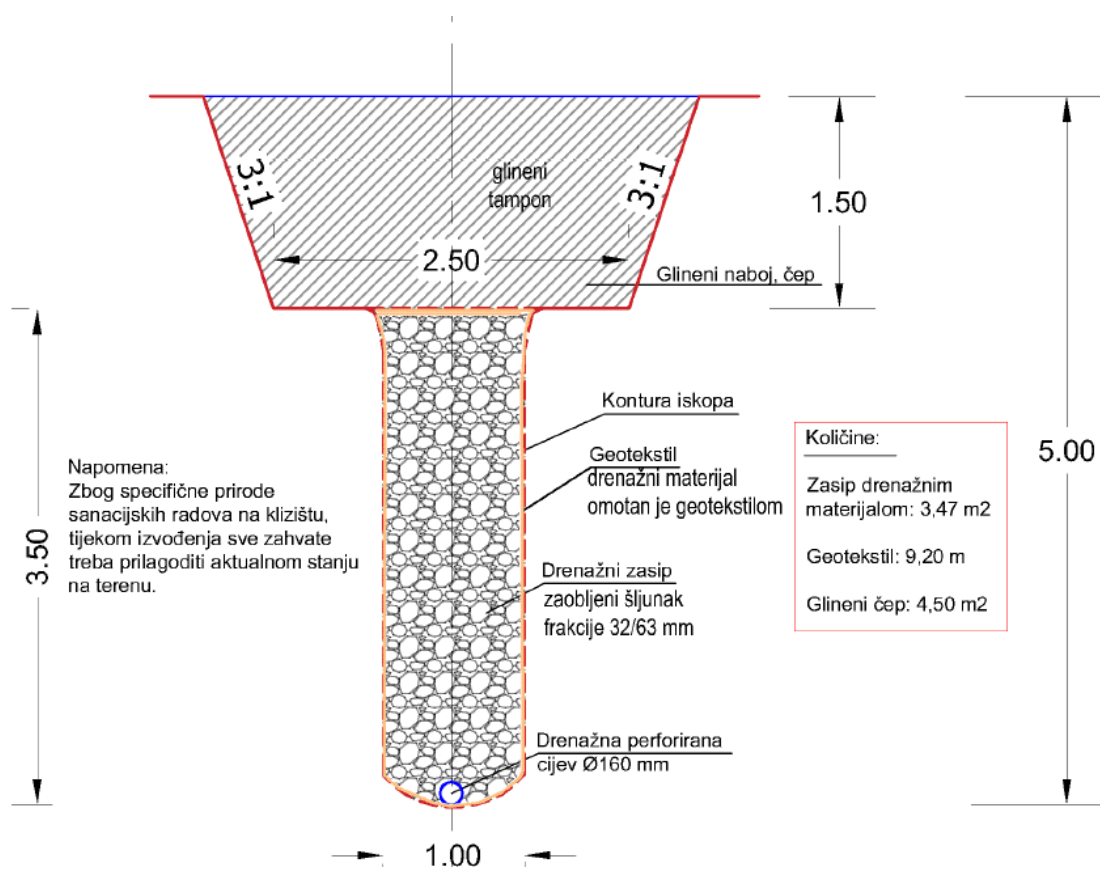
## **6.2. PRIJEDLOG SANACIJSKOG RJEŠENJA**

Obzirom da je glavni razlog nastalih pomaka i razvoja klizišta nakupljanje, odnosno visoka razina procjednih voda, te popuštanje padinske nožice, stabilizacija prostora može se ostvariti snižavanjem razina procjednih voda.

Navedeno se može postići kombinacijom kopanih i bušenih drenova (Slika 41.), uz uređenje površinske odvodnje kojima bi se učinkovito snizio potencijal podzemne vode. Za dreniranje tijela klizišta potrebno bi bilo izvesti dren poprečno na os ceste, kako bi se snizile visoke razine podzemnih voda sa briježne strane. Uređenje površinske odvodnje riješilo bi se uređenjem cestovnog odvodnog jarka oblaganjem betonskom trapeznom kanalicom te izgradnjom cjevnog propusta.



Uz drenažne metode bilo bi potrebno izvesti i zamjenu materijala ispod kolnika, te na nizbrežnoj strani ceste, prikazano u Prilogu 4 na karakterističnom presjeku. Uslijed klizanja, zbog ostvarenih pomaka, došlo je do klizanja kolnika i oštećenja nasipa te ih je potrebno sanirati. Da bi sanaciju bilo moguće izvesti potrebno je za nju izvesti odgovarajući temelj, odnosno izvesti zamjenu materijala ispod ceste kao i dijelom na padini ispod ceste. Na dnu zamjene materijala potrebno je izvesti temeljni dren te ispust drenaže radi odvodnje procjednih voda.



Slika 41. Primjer projektiranog kopanog drena

## 7. ZAKLJUČAK

Najčešći geodinamički proces je klizanje, nakon kojega kao posljedica ostaju klizišta. Klizište je dio padine na kojem je zbog poremećaja stabilnosti došlo do klizanja tla odnosno do kretanja površinskog sloja. Utjecaji i posljedice klizišta na okoliš i stanovništvo su značajni. Ona su jedna od najkompleksnijih, a time i najpopularnijih, tema u geotehničkom inženjerstvu. I u slučaju kada nisu katastrofalna, klizanja predstavljaju ozbiljan problem gotovo u svim dijelovima svijeta. Saturacija tla vodom je primarni uzrok aktivacije klizišta, a može se formirati tijekom intenzivnih oborina, otapanja snijega ili promjenama u režimu podzemnih voda. Kao primjer geotehničko-geofizičkog istraživanja i izrade modela klizišta s ciljem sanacije istog, u ovom radu prikazano je cestovno klizište koje se aktiviralo u naselju Krivaja

Na predmetnoj lokaciji provedeni su terenski istražni radovi, a svrha istražnih radova bila je dobivanje uvida u sastav i geotehničke značajke tla na prostoru manifestiranog klizišta. Identifikacijom nabušene jezgre iz sondažnih bušotina, provedenog statičkog sondiranja, te laboratorijskih ispitivanja utvrđen je litološki sastav tla na lokaciji. Generalno, istražnu lokaciju grade pleistocenske naslage (lg), a zastupljene su glinovitim siltom s proslojcima organske komponente. Osnovno tlo s geotehničkog klasifikacijskog aspekta grade uglavnom gline niske plastičnosti (CL), granice tečenja od  $w_L = 43-48\%$ , žuto-smeđe boje, kruto plastičnog konzistentnog stanja. Kod bušotine B-2 u intervalu 5,30 do 7,70 m identificirana je iznimno šupljikava struktura sedimenta glina, što pokazuje geološku pripadnost grupi glinovitih siltova, a čime prema strukturi padine nestabilnost klasificira kao asekventno klizište, klizna ploha unutar jednorodnog tla.

Izmjerene posmične čvrstoće koluvijalnog tla u kliznom tijelu, na prostoru koluvija kliznog tijela malih su iznosa  $c_u = 20 - 30 \text{ kN/m}^2$ , pri čemu je jasno izražena promjena prema čvrstoj podini nepokrenute mase boljih karakteristika  $c_u = 100 - 200 \text{ kN/m}^2$ , slijedom čega je utvrđena duboka klizna ploha dublja od 6,0 m. Proračunom stabilnosti kosine prema Bishop-u dan je za slučaj s minimalnim

parametrom posmične čvrstoće na kliznoj plohi od  $c_u = 11$  kPa i ostvareni faktori sigurnosti približno iznose  $F_s = 1$ , što znači da za odabrane parametre modela vlada labilna stabilnost.

Hidrogeološki uvjeti u tlu pokazuju da procjedna voda nema mogućnost brze evakuacije iz padine, te se počne nakupljati u tlu, što povećava porene pritiske. Iz ovog podatka zaključuje se da su potencijali procjednih voda sigurno značajni i uzrok su destabilizacije cijelog prostora, odnosno formiranja klizišta. Izbijanje vode iz nagurane koluvijalne mase u nožici klizišta potvrđuje saturiranih uvjeta u kliznom tijelu. Glavni razlog nastalih pomaka i razvoja klizišta je nakupljanje, odnosno visoka razina procjednih voda, te popuštanje padinske nožice. Zbog toga je predloženo sljedeće sanacijsko rješenje: Stabilizacija prostora može se ostvariti snižavanjem razina procjednih voda kao glavnog okidača nestabilnosti na navedenom prostoru. Navedeno se može postići kombinacijom kopanih i bušenih drenova kojima bi se učinkovito snizio potencijal podzemne vode. Uz drenažne metode bilo bi potrebno izvesti i zamjenu materijala ispod kolnika te na padini uz kolnik.

## 8. POPIS LITERATURE

Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, Vol. 5, No. 1

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

Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996). *Landslide Types and Processes*. In: Turner, A.K. and Shuster, R.L., Eds., *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report.

Fredlund, D. G.Krahn, J. (1977). *Comparison of Slope Stability Methods of Analysis*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, No. 3.

Kavur, B. (2015). *Materijali s predavanja iz Geotehničkog praktikuma 1 u ak. godini 2015./2016*. Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.

Kvasnička, P.; Domitrović D. (2007). *Mehanika tla*. Rudarsko geološko naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Loke, M.H. (2015). *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Copyright (1996-2015). [Online]. Dostupno na: [http://web.gps.caltech.edu/classes/ge111/Docs/ResNotes\\_Loke.pdf](http://web.gps.caltech.edu/classes/ge111/Docs/ResNotes_Loke.pdf) [26.8.2019.]

Loke, M.H., Chambers J.E., Kuras O. (2011). *Instrumentation, electrical resistivity in Solid Earth Geophysics Encyclopedia*. 2nd Edition, Electrical & Electromagnetic, Gupta, Harsh (ed), pp. 599-604, Berlin, Germany: Springer.

Look, B. G. (2014). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. Second Edition. Boca Raton, Fla. [u.a.]: CRC Press/Balkema. pp. 47-51

Marchetti, S. (1980). *In situ tests by flat dilatometer*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, USA, Volume 106, pp. 299-321.

Matešić, L. (2010). *Geotehničko inženjerstvo*. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka.

Mihalić, S. (2008.). *Klizišta*. Interna skripta – Diplomski studij Rudarstva. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

Nonveiller, E. (1979). *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Zagreb: Školska knjiga. (str. 50-86)

Robertson P.K., Cabal K.L. (2014). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. 6 th Edition. Gregg Drilling & Testing, Inc. California.

Rocscience Inc. (2002). *Slide - 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes*. User's Guide.

Roje-Bonacci, T. (2012). *Zemljani radovi*. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije. Sveučilište u Splitu.

Savarenski, F. P. (1935). *Experimental construction of landslide clasification*. Geolog. Razvedochnyi Institut. (TSNICTRI), str. 29-37.

Strelec, S. (2012). *Podpovršinski istražni radovi: interna skripta*. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet Varaždin.

Strelec, S.; Štuhec, D. (2011). *Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi*, Interna skripta. Geotehnički fakultet, Varaždin.

Szavits - Nossan, V. (2006). *Mehanika tla i stijena*. pogl. 13. – 14. Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu. Zagreb.

Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of Landslides*. Application of Geology to Engineering Practice. Berkeley, Geological Society of America, str. 83-123

## **Popis slika**

Slika 1. Prikaz dijelova klizišta s zakrivljenom kliznom plohom (Szavits-Nossan, 2006)

Slika 2. Stanja aktivnosti prevrtanja (brojevi se odnose na terminologiju danu u tablici 1) (Mihalić, 2008)

Slika 3. Primjer promjena faktora sigurnosti s vremenom (Mihalić, 2008)

Slika 4. Tipovi uzročnika (faktora) klizanja

Slika 5. Porast pornog tlaka i pada čvrstoće u kosini uslijed oborina (Szavits-Nossan, 2006)

Slika 6. Bishopova pojednostavljena metoda i njezini elementi (Kvasnička; Domitrović, 2007)

Slika 7. Primjer geološkog profila (Strelec, 2012)

Slika 8. Prikaz otpornosti nekih materijala

Slika 9. Wenner-ov raspored

Slika 10. Raspored elektroda kod geoelektrične 2-D tomografije Wenner (prerađeno prema Loke, 2015)

Slika 11. Primjer sondažnog profila (Roje-Bonacci, 2012)

Slika 12. Bušenje s jezgrovanjem, jezgrovanje s jednostrukom jezgrenom (sržnom) cijevi (Szavits-Nossan, 2006)

Slika 13. Drveni sanduk za odlaganje jezgre iz jezgrene cijevi (Szavits-Nossan, 2006)

Slika 14. Cilindar za SPT standardnih dimenzija prema ASTM (Matešić, 2010)

Slika 15. Postupak ispitivanja standardnim penetracijskim pokusom (Roje-Bonacci, 2012)

Slika 16. Šiljak DPL sonde (Szavits-Nossan, 2006)

Slika 17. Oprema za dilatometar (GFV, 2016)

Slika 18. Mjerenja tlakova,  $p_0$  i  $p_1$  (Kvasnička; Domitrović, 2007)

Slika 19. Hidraulički cilindar i oprema za utiskivanje, Van Der Berg, model Hyson LW100 (GFV, 2016)

Slika 20. Prikaz CPT-u sonde (Kvasnička; Domitrović, 2007)

Slika 21. Prikaz krilne sonde i rezultata ispitivanja (Kvasnička; Domitrović, 2007)

Slika 22. Odnos posmične čvrstoće i okreta sonde (GFV, 2016)

Slika 23. Mehanička tresalica sa odgovarajućim sitima različitih promjera otvora

Slika 24. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće - grafički prikaz sloma (Matešić, 2010)

Slika 25. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće za totalna i efektivna naprezanja (Matešić, 2010)

Slika 26. Uređaj za izravni posmik (Kvasnička, Domitrović, 2007)

Slika 27. Pomaci i naprezanja kod pokusa izravnog posmika (Strelec, Štuhec, 2011)

Slika 28. Rezultati reversnog pokusa izravnog posmika (Strelec, Štuhec, 2011).

Slika 29. Hidrogeološka karta sa hidroizohipsama na dan 17.11.2015

Slika 30. Hidrogeološka karta sa hidroizohipsama na dan 28.01.2016.

Slika 31. Model otpornosti u profilu električne tomografije ERT-1 Krivaja

Slika 32. Prikaz sondažne jezgre bušotine B-2

Slika 33. Sondažni profil bušotine B-2

Slika 34. Rezultati mjerenja CPTu sondom (Cone resistance – otpor prodiranju šiljka; Friction ratio – indeks trenja; Pore pressure – porni tlak)

Slika 35. Rezultati ispitivanja dilatometrom DMT-1

Slika 36. Nedrenirane posmične čvrstoće izmerene na sondama CPTu-1, te DMT-1.

Slika 37. Odnos posmičnog naprezanja (Shear Stress) i horizontalne deformacije (Horizontal Displacement) na uzorku B-1 pod vertikalnim opterećenjem od 54,6; 109,2 i 2018,4 kN/m<sup>2</sup>

Slika 38. Karakteristični profil i model tla korišten pri proračunu tla na klizanje

Slika 39. Pogled na model klizišta "Krivaja"

Slika 40. Podjela klizišta prema kinematici pomaka

Slika 41. Primjer projektiranog kopanog drena

### **Popis tablica**

Tablica 1. Stanja aktivnosti klizišta

Tablica 2. Terminologija za opis stilova aktivnosti klizanja s pripadajućim definicijama.

Tablica 3. Iskustvena ljestvica iskoristivosti pojedinog tipa pokusa prema bodovanju od 1 do 5 (Prema preporuci IGH)



Tablica 4. Povezanost broja udaraca (N) sa zbijenošću pijeska i konzistencijom koherentnog tla

Tablica 5. Kategorije tla prema električnim otpornostima

Tablica 6. Rezultati ispitivanja nedrenirane posmične čvrstoće krilnom sondom na poziciji DPL-1

Tablica 7. Rezultati ispitivanja nedrenirane posmične čvrstoće krilnom sondom na poziciji DPL-2

Tablica 8. Skupno izvješće rezultata izravnog posmika na uzorku iz bušotine B-1

Tablica 9. Rezultati laboratorijskih ispitivanja

Tablica 10. Rezultati laboratorijskih ispitivanja

### **Popis i objašnjenje kratica korištenih u radu**

ASTM (American Society for Testing and Materials) - američka norma za ispitivanje materijala

CL – glina niske plastičnosti

CPT (Cone Penetration Test) - statički penetracijski pokus

CPTu (Cone Penetration Test (u- pore pressure)) - statička konusna penetracija s mjerenjem pornog tlaka

DMT (Flat Dilatometer Test – Marchetti) – plosnati dilatometrar tipa Marchetti

DPH (Dynamic Penetrating Heavy) - teška udarna sonda

DPL (Dynamic Penetrating Light) - laka udarna sonda

ERT (Electrical Resistivity Tomography) – geoelektrična tomografija

IGH – Institut građevinarstva Hrvatske

MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) - višekanalna analiza površinskih valova; jedna od geofizičkih metoda istraživanja

RPV - razina podzemne vode

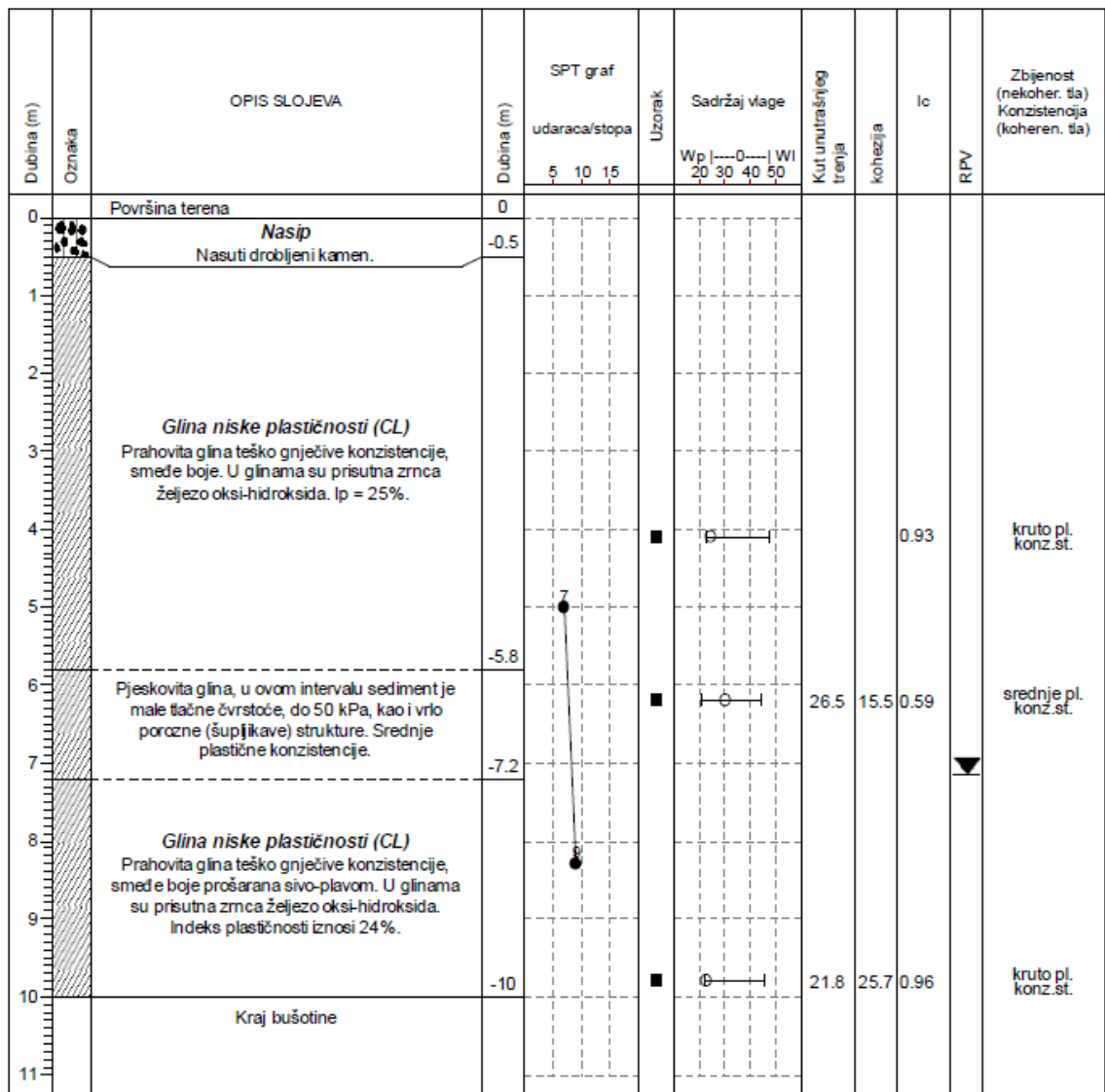
SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) - spektralna analiza površinskih valova

SPT (Standard Penetration Test) - standardni penetracijski pokus

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

## **GRAFIČKI PRILOZI**





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata  
in situ istraživanja – primjer klizišta u Krivaji

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Naziv priloga:<br>B-1           | Datum:<br>25.08.2019.                  |
| Mjerilo:<br>-                   | Broj priloga:<br>Prilog 2, List 1      |
| Kandidat:<br>Silvestar Dregarić | Mentor:<br>Prof.dr.sc. Stjepan Strelec |

| Dubina (m) | Oznaka | OPIS SLOJEVA   | Dubina (m) | SPT graf      | Uzorak | Sadržaj vlage                      | Kut unutrašnjeg trenja | kohezija | Ic   | RPV | Zbijenost (nekoher. tla)<br>Konzistenција (koheren. tla) |
|------------|--------|--|------------|---------------|--------|------------------------------------|------------------------|----------|------|-----|--|
|            |        |  |            | udaraca/stopa |        | Wp  ---  0  ---  Wl<br>25 45 65 85 |                        |          |      |     |  |
| 5          | 10     | 15   |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 0          |        | Površina terena  | 0          |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| -0.3       |        | <i>Humus</i><br>Površinski zemljani materijal.   |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 1          |        |  |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 2          |        |  |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 3          |        |  |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 4          |        | <i>Glina niske plastičnosti (CL)</i><br>Anorganska prahovita glina srednje gnječive konzistencije, smeđe boje.   |            |               | ■      | 10                                 |                        |          | 0.75 |     | kruto pl. konz.st.                                       |
| 5          |        |  |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 6          |        |  |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| -6.4       |        |  |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 7          |        | <i>Glina niske plastičnosti (CL)</i><br>Anorganska prahovita glina teško gnječive konzistencije, na početku intervala narančasto-smeđe a dublje smeđe boje. Uzorci glina sadrže znatna željezo oksihidroksida. Indeks plastičnosti iznosi 26%. | -7         |               | ■      | 10                                 |                        |          | 0.87 |     | kruto pl. konz.st.                                       |
| 8          |        | Kraj bušotine  |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata  
in situ istraživanja – primjer klizišta u Krivaji

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Naziv priloga:<br>B-3           | Datum:<br>25.08.2019.                  |
| Mjerilo:<br>-                   | Broj priloga:<br>Prilog 2, List 2      |
| Kandidat:<br>Silvestar Dregarić | Mentor:<br>Prof.dr.sc. Stjepan Strelec |

| Dubina (m) | Oznaka | OPIS SLOJEVA   | Dubina (m) | SPT graf      | Uzorak | Sadržaj vlage       | Kut unutrašnjeg trenja | kohezija | Ic   | RPV | Zbijenost (nekoher. tla)<br>Konzistencija (koheren. tla) |
|------------|--------|--|------------|---------------|--------|---------------------|------------------------|----------|------|-----|--|
|            |        |  |            | udaraca/stopa |        | Wp  ---  0  ---  Wl |                        |          |      |     |  |
|            |        |  |            | 5 10 15       |        | 25 45 65 85         |                        |          |      |     |  |
| 0          |        | Površina terena  | 0          |               |        |                     |                        |          |      |     |  |
|            |        | <i>Humus</i><br>Površinski zemljani materijal.   |            |               |        |                     |                        |          |      |     |  |
| 1          |        |  |            |               |        |                     |                        |          |      |     |  |
| 2          |        | <i>Glina niske plastičnosti (CL)</i><br>Anorganska prahovita glina lako gnječive na početku intervala, dublje teško gnječive konzistencije, smeđe boje.  |            |               |        |                     |                        |          |      |     |  |
| 3          |        |  |            |               | ■      | P   I               |                        |          | 0.82 |     | kruto pl. konz.st.                                       |
| 4          |        |  | -4.2       |               |        |                     |                        |          |      |     |  |
| 5          |        | <i>Glina niske plastičnosti (CL)</i><br>Anorganska prahovita glina teško gnječive konzistencije, smeđe boje. Glina sadrži zrnca željezo oksid-hidroksida. Indeks plastičnosti se kreće u intervalu 23-28%. |            |               |        |                     |                        |          |      |     |  |
| 6          |        |  |            |               | ■      | P   I               |                        |          | 0.86 |     | kruto pl. konz.st.                                       |
| 7          |        |  | -7         |               |        |                     |                        |          |      |     |  |
|            |        | Kraj bušotine  |            |               |        |                     |                        |          |      |     |  |
| 8          |        |  |            |               |        |                     |                        |          |      |     |  |

|   |  |
|---|--|
| <b>SVEUČILIŠTE U ZAGREBU<br/>GEOTEHNIČKI FAKULTET</b>   |  |
| Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata<br>in situ istraživanja – primjer klizišta u Krivaji |  |
| Naziv priloga:<br>B-4   | Datum:<br>25.08.2019.                  |
| Mjerilo:<br>-   | Broj priloga:<br>Prilog 2, List 3      |
| Kandidat:<br>Silvestar Dregarić   | Mentor:<br>Prof.dr.sc. Stjepan Strelec |

| Dubina (m) | Oznaka | OPIS SLOJEVA  | Dubina (m) | SPT graf      | Uzorak | Sadržaj vlage                      | Kut unutrašnjeg trenja | kohezija | Ic   | RPV | Zbijenost (nekoher. tla)<br>Konzistencija (koheren. tla) |
|------------|--------|---|------------|---------------|--------|------------------------------------|------------------------|----------|------|-----|--|
|            |        |   |            | udaraca/stopa |        | Wp  ---  0  ---  WI<br>25 45 65 85 |                        |          |      |     |  |
| 0          |        | Površina terena   | 0          |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| -0.3       |        | <i>Humus</i><br>Površinski zemljani materijal.  | -0.3       |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 1          |        |   |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 2          |        | <i>Glina niske plastičnosti (CL)</i><br>Anorganska prahovita glina lako do srednje gnječiva, žuto-smeđe boje, vlažna.   |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 3          |        |   |            |               | ■      | ⊕                                  |                        |          | 0.92 |     | kruto pl. konz.st.                                       |
| 4          |        |   | -4.2       |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 5          |        | <i>Glina niske plastičnosti (CL)</i><br>Anorganska prahovita glina teško gnječive konzistencije, smeđe boje a dublje >5,20 m sivo-narančasto-smeđe boje. Uzorci glina sadrže zrnca željezo oksid-hidroksida. Indeks plastičnosti se kreće oko 22 %. |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 6          |        |   |            |               | ■      | ⊕                                  |                        |          | 0.78 |     | kruto pl. konz.st.                                       |
| 7          |        |   | -7         |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |
| 8          |        | Kraj bušotine   |            |               |        |                                    |                        |          |      |     |  |

|   |   |
|---|---|
| <b>SVEUČILIŠTE U ZAGREBU<br/>GEOTEHNIČKI FAKULTET</b>   |   |
| Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata<br>in situ istraživanja – primjer klizišta u Krivaji |   |
| Naziv priloga:<br><b>B-5</b>  | Datum:<br><b>25.08.2019.</b>                  |
| Mjerilo:<br><b>-</b>  | Broj priloga:<br><b>Prilog 2, List 4</b>      |
| Kandidat:<br><b>Silvestar Dregarić</b>  | Mentor:<br><b>Prof.dr.sc. Stjepan Strelec</b> |

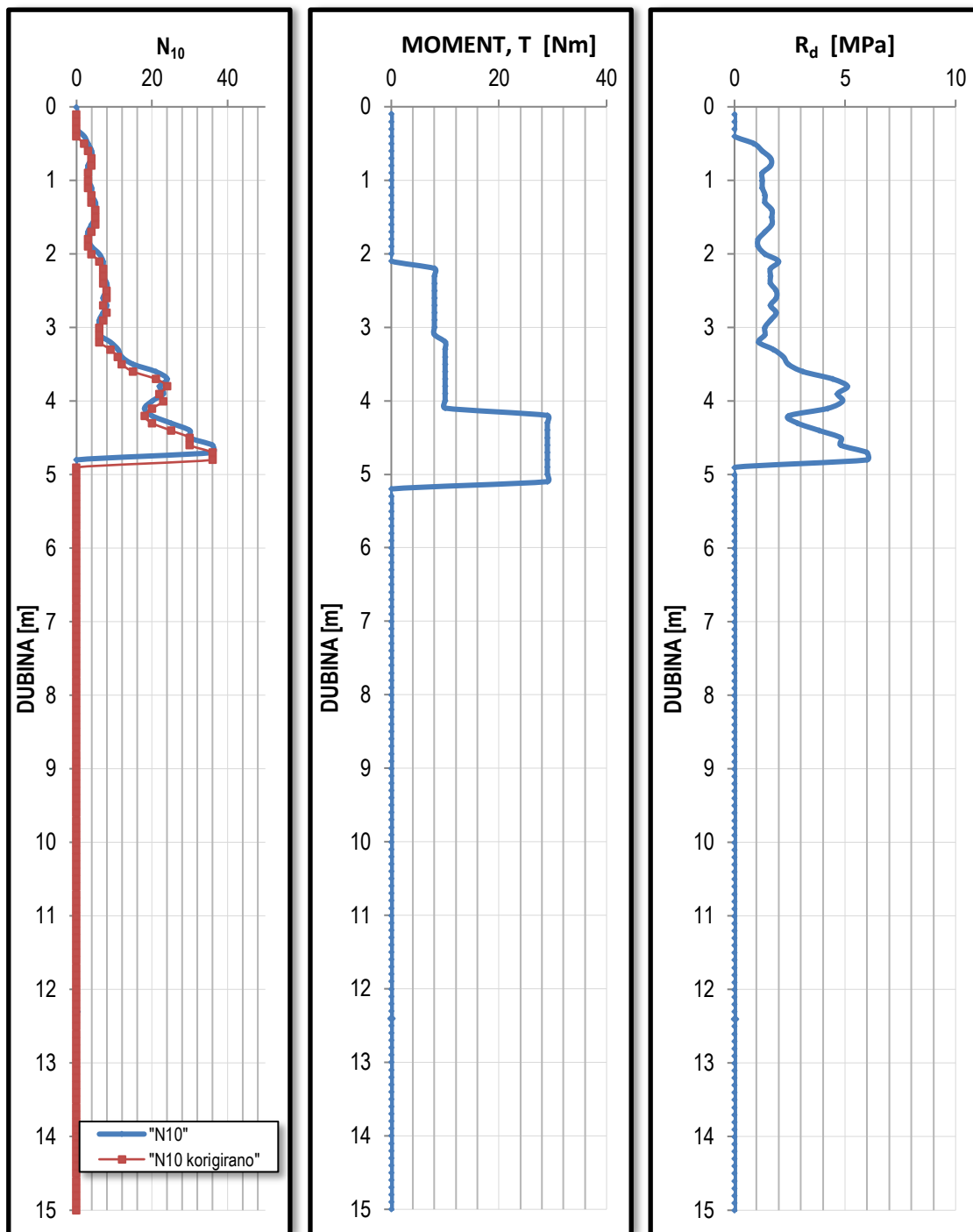
| Dubina (m) | Oznaka | OPIS SLOJEVA  | Dubina (m) | SPT graf      | Uzorak | Sadržaj vlage                            | Kut unutrašnjeg trenja | kohezija | Ic   | RPV | Zbijenost (nekoher. tla)<br>Konzistenoja (koheren. tla) |
|------------|--------|---|------------|---------------|--------|--|------------------------|----------|------|-----|---|
|            |        |   |            | udaraca/stopa |        | Wp  ---  0  ---  WI<br>25   45   65   85 |                        |          |      |     |   |
| 0          |        | Površina terena   | 0          |               |        |  |                        |          |      |     |   |
| -0.3       |        | <i>Humus</i><br>Površinski zemljani materijal.  | -0.3       |               |        |  |                        |          |      |     |   |
| 1          |        | <p><i>Glina niske plastičnosti (CL)</i><br/>Anorganska prahovita glina srednje gnječive konzistencije, smeđe boje. Uzorci glina sadrže zrnca željezo oksid-hidroksida. Indeks plastičnosti iznosi 20 %.</p> |            |               |        |  |                        |          | 0.52 |     | čvrsto konz.st.   |
| 2          |        |   |            |               |        |  |                        |          |      |     |   |
| 3          |        |   |            |               |        |  |                        |          |      |     |   |
| 4          |        |   |            |               |        |  |                        |          |      |     |   |
| 5          |        |   |            |               |        |  |                        |          |      |     |   |
| 6          |        |   |            |               |        |  |                        |          |      |     |   |
| 7          |        | Kraj bušotine   | -7         |               |        |  |                        |          |      |     |   |
| 8          |        |   |            |               |        |  |                        |          |      |     |   |

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

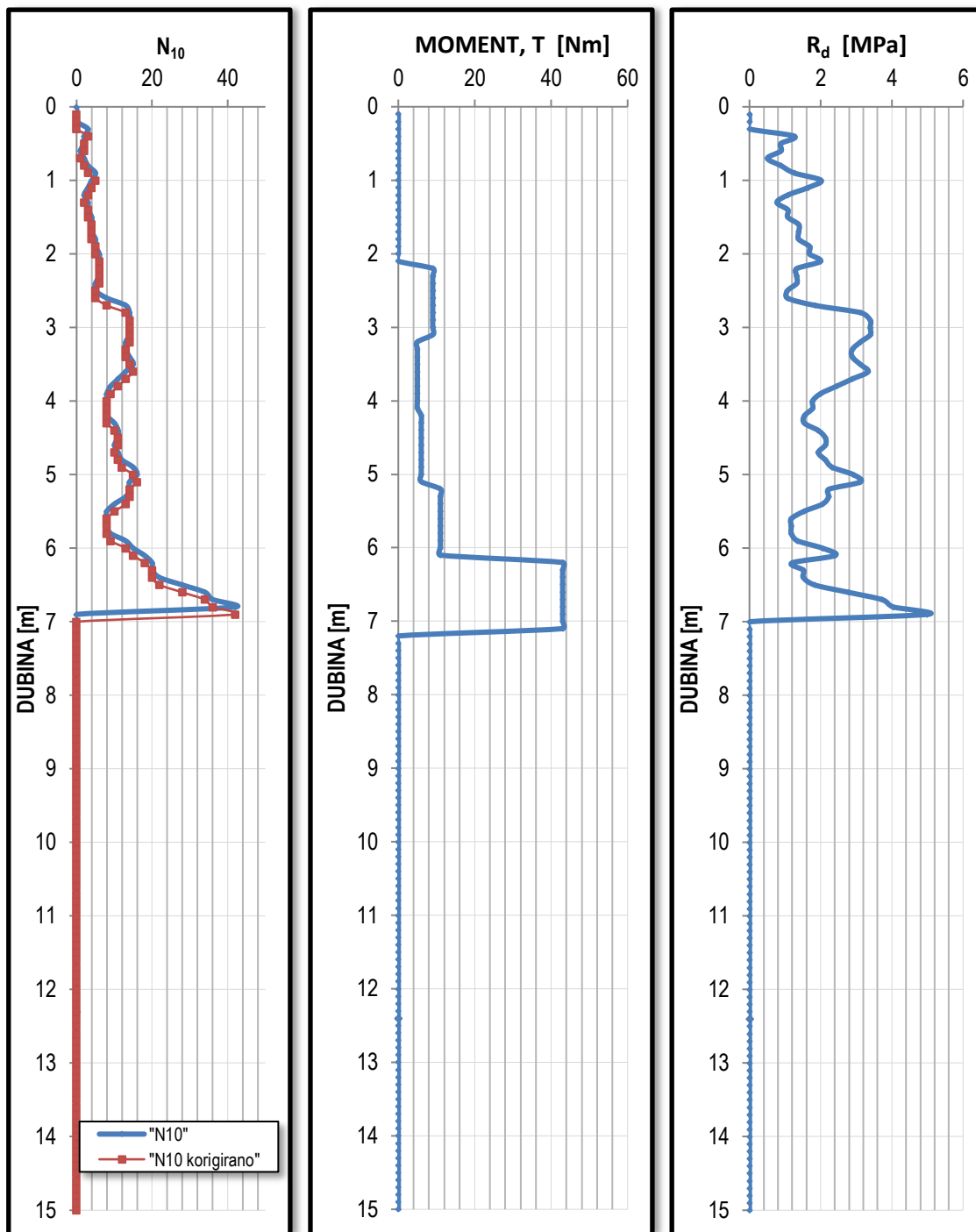
Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata  
in situ istraživanja – primjer klizišta u Krivaji

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Naziv priloga:<br>B-6           | Datum:<br>25.08.2019.                  |
| Mjerilo:<br>-                   | Broj priloga:<br>Prilog 2, List 5      |
| Kandidat:<br>Silvestar Dregarić | Mentor:<br>Prof.dr.sc. Stjepan Strelec |





|   |  |
|---|--|
| <b>SVEUČILIŠTE U ZAGREBU</b><br><b>GEOTEHNIČKI FAKULTET</b>   |  |
| Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata<br>in situ istraživanja – primjer klizišta u Krivaji |  |
| Naziv priloga:<br>DPL-1   | Datum:<br>25.08.2019.                  |
| Mjerilo:<br>-   | Broj priloga:<br>Prilog 3, List 1      |
| Kandidat:<br>Silvestar Dregarić   | Mentor:<br>Prof.dr.sc. Stjepan Strelec |



|   |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>SVEUČILIŠTE U ZAGREBU</b><br><b>GEOTEHNIČKI FAKULTET</b>   |                             |
| Izrada prostornog modela klizišta na temelju rezultata<br>in situ istraživanja – primjer klizišta u Krivaji |                             |
| Naziv priloga:  | Datum:                      |
| DPL-2   | 25.08.2019.                 |
| Mjerilo:  | Broj priloga:               |
| -   | Prilog 3, List 2            |
| Kandidat:   | Mentor:                     |
| Silvestar Dregarić  | Prof.dr.sc. Stjepan Strelec |

