

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

ANJA BEK

**KOMPARACIJA METODA STATIČKOG KONUSNOG
PENETROMETRA (CPTU) I PLOSNATOG DILATOMETRA
(DMT) ZA KARAKTERIZACIJU KLIZIŠTA PRIMJENOM IN-
SITU ISTRAŽIVANJA**

VARAŽDIN, 2022.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za Geoinženjerstvo okoliša Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom prof. dr. sc. Stjepana Streleca dipl. ing. rud. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2021./2022.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. HIPOTEZA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	4
2.1. Hipoteza.....	4
2.2. Ciljevi istraživanja	4
3. UZROCI KLIZANJA I STABILNOST KOSINA	5
4. ISTRAŽIVANE LOKACIJE I PRIKAZ PROBLEMATIKE	8
4.1. Klizište Bedekovčina	8
4.2. Klizište Kravarsko	11
5. METODE ISTRAŽIVANJA.....	14
5.1. Teorija prodiranja statičkog konusa u tlu.....	15
5.1.1. Oprema i postupak	17
5.1.2. Mjerni parametri.....	17
5.1.3. Interpretacija rezultata	19
5.1.4. Istraživanje konusnim penetrometrom na klizištu Bedekovčina i Kravarsko	23
5.2. Teorija sondiranja plosnatim dilatometrom.....	23
5.2.1. Oprema i postupak istraživanja.....	24
5.2.2. Mjerni parametri i interpretacija.....	25
5.2.3. Dilatometarsko sondiranje na klizištima Bedekovčina i Kravarsko.....	27
5.3. Inklinometarska opažanja	28
5.3.1. Mjerenje horizontalnih pomaka inlinometrima na klizištu Bedekovčina i Kravarsko.....	28
6. PROGNOZNI PROFILI IZ REZULTATA IN-SITU SONDI.....	31
6.1. Klizište Bedekovčina	31
6.2. Klizište Kravarsko	35
7. VERIFIKACIJA REZULTATA IN-SITU SONDI S POMACIMA NA INKLINOMETRIMA	42
7.1. Klizište Bedekovčina	42
7.2. Klizište Kravarsko	44
8. ANALIZE REZULTATA.....	47
8.1. Parametar indeksa horizontalnog naprezanja.....	47
8.2. Parametar nedrenirane posmične čvrstoće.....	49
8.3. Parametar koeficijenta prekonsolidacije.....	50
8.4. Parametar jednodimenzionalne kompresije M	52
9. ZAKLJUČAK.....	54
10. LITERATURA.....	56

POPIS I OBJAŠNJENJE KRATICA KORIŠTENIH U RADU

CPT (Cone Penetration Test) - statički konusni penetrometar

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

DMT (Flat DilatoMeter Test) - plosnati dilatometar

DSS (Direct Simple Shear) - triaksijalni jednostavni posmik

FVT (Field Vane test) - krilna sonda

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

SCE (Spherical Cavity Expansion - teorija širenja šupljine

OCR (OverConsolidation Ratio) - koeficijent prekonsolidacije

TC (Triaxial Compression) - triaksijalna kompresija

TE (Triaxial Extension) - triaksijalna ekstenzija

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Dijagram tijeka istraživanja	3
Slika 3.1. Utjecaj vode (oborina) na stabilnost kosine [8].....	6
Slika 3.2. Promjena faktora sigurnosti u vremenu [7].....	7
Slika 4.1. a) Prikaz istraživanog područja; b) Pregledni geološki profil šireg istraživanog područja lokacije groblja Bedekovčina	10
Slika 4.2. Različiti uzorci glina s područja klizišta Bedekovčina	10
Slika 4.3. Posljedice aktivacije klizišta	13
Slika 5.1. Situacijski plan istraživanja - klizište Bedekovčina	14
Slika 5.2. Situacijski plan istraživanja - klizište Karavarsko	15
Slika 5.3. Mjerni konus (sonda) bez mjerenja pornog tlaka, CPT (lijevo) i s mjerenjem pornog tlaka CPTu (desno) [14]	17
Slika 5.4. Grupe cU profila izmjerenih na ispitnoj geotehničkoj lokaciji mekih glina Bothkennar u Velikoj Britaniji. FVT - krilna sonda; TC - triaksijalni CKoUC pokus (kompresija), DSS - triaksijalni jednostavni posmik; TE - triaksijalni CKoUE pokus (ekstenzija) [16]	20
Slika 5.5. Hidraulički penetrometar za utiskivanje, Pagani TG 63 -150.....	23
Slika 5.6. Oprema za dilatometarsko istraživanje [26]	24
Slika 5.7. Koraci dilatometarskog mjerenja [26]	25
Slika 5.8. Detektiranje klizne plohe na temelju indeksa KD [29].....	26
Slika 5.9. Princip mjerenja inklinometrom [32]	29
Slika 5.10. Ugrađeni inklinometar 1 na području starog groblja u Bedekovčini.....	29
Slika 6.1. Dijagrami rezultata grupe 1 istraživanog područja - cU i OCR	32
Slika 6.2. Dijagrami rezultata grupe 1 istraživanog područja - M i Kd	33
Slika 6.3. Dijagrami rezultata grupe 2 istraživanog područja - cU i OCR	34
Slika 6.4. Dijagrami rezultata grupe 2 istraživanog područja - M i Kd	35
Slika 6.5. Dijagrami rezultata grupe 3 istraživanog područja - M i Kd	36
Slika 6.6. Dijagrami rezultata grupe 4 istraživanog područja - cU i OCR	37
Slika 6.7. Dijagrami rezultata grupe 4 istraživanog područja - M i Kd	38
Slika 6.8. Dijagrami rezultata grupe 5 istraživanog područja - cU i OCR.....	39
Slika 6.9. Dijagrami rezultata grupe 5 istraživanog područja - M i Kd	40
Slika 6.10. Dijagrami rezultata grupe 6 istraživanog područja - M i Kd	41
Slika 7.1. Preklop vrijednosti indeksa horizontalnog naprezanja i mjerenja inklinometrima - grupa 1 istraživanog područja (lijevo) i grupa 2 istraživanog područja (desno)	42
Slika 7.2. Preklop vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće i mjerenja inklinometrima - grupa 1 istraživanog područja	43
Slika 7.3. Preklop vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće i mjerenja inklinometrima - grupa 2 istraživanog područja	44
Slika 7.4. Preklop vrijednosti indeksa horizontalnog naprezanja i mjerenja inklinometrima - grupa 3 istraživanog područja (lijevo) i grupa 4 istraživanog područja (desno)	45
Slika 7.5. Preklop vrijednosti indeksa horizontalnog naprezanja i mjerenja inklinometrima – grupa 5 istraživanog područja (lijevo) i grupa 6 istraživanog područja (desno)	46
Slika 7.6. Geotehnički profil tla – klizište KK10	46
Slika 8.1. Izmjereni indeks horizontalnog naprezanja Kd na kliznim plohama u ovisnosti o vertikalnom efektivnom naprezanju $\sigma'v0$	48
Slika 8.2. Izmjereni nedrenirani posmični čvrstoća na kliznim plohama u ovisnosti o vertikalnom efektivnom naprezanju $\sigma'v0$	49

Slika 8.3. Odnos između koeficijenta prekonsolidacije na kliznim plohama i vertikalnog efektivnog naprezanja	51
Slika 8.4. Odnos između modula stišljivosti na kliznim plohama i vertikalnog efektivnog naprezanja.....	52

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Podjela klizišta ovisno o mehanizmu pokreta i vrsti materijala u kojem nastaju [6].....	5
Tablica 5.1. Neki parametri dobiveni CPTu sondiranjem.....	18
Tablica 5.2. Raspon koeficijenta α_M prema vrsti tla i izmjerenom otporu na šiljku q_c [20].....	22
Tablica 5.3. Klasifikacija tla na temelju indeksa materijala ID [27].....	25
Tablica 5.4. Uvjeti za određivanje parametra RM [27]	28
Tablica 8.1. Parametri tla na kliznoj plohi iz in-situ sondiranja.....	47
Tablica 8.2. Analiza podataka i osjetljivost parametra K_d	48
Tablica 8.3. Analiza podataka i osjetljivost parametra c_U iz DMT pokusa	50
Tablica 8.4. Analiza podataka i osjetljivost parametra c_U iz CPTu pokusa.....	50
Tablica 8.5 Analiza podataka i osjetljivost parametra OCR iz DMT pokusa.....	51
Tablica 8.6. Analiza podataka i osjetljivost parametra OCR iz CPTu pokusa	51
Tablica 8.7 Analiza podataka i osjetljivost parametra M iz DMT pokusa	53
Tablica 8.8. Analiza podataka i osjetljivost parametra M iz CPTu pokusa.....	53

1. UVOD

Prema Crudenu (1991) klizište je definirano kao pomicanje mase stijena, krhotina ili zemlje niz padinu. Klizišta se već nekoliko stoljeća bilježe u Aziji i Europi. Najstarija zabilježena klizišta dogodila su se u središnjoj Kini 1767. god. pr. Kr., a izazvana su potresom [1].

U Sjeverozapadnom dijelu Hrvatske često dolazi do pojave klizišta. Tijekom zime i proljeća 2013., zbog ekstremnih vremenskih uvjeta, (re)aktiviralo se više od 900 plitkih klizišta [2]. U Susjednim zemljama, Sloveniji i Italiji, također se javljaju problemi klizišta [3], [4], [5]. Zbog navedenih razloga, istraživanje klizišta predstavlja vrlo aktualnu, zanimljivu i čestu temu, posebno u ovom dijelu Europe.

Klizišta uzrokuju nebrojene žrtve i ogromne ekonomske gubitke. U mnogim su zemljama gospodarski gubici zbog klizišta veliki te i dalje rastu zbog urbanizacije u nestabilna brdska područja pod pritiscima sve većeg stanovništva. Osim što izazivaju ljudske i životinjske gubitke, klizišta uništavaju ili oštećuju stambene i industrijske objekte kao i poljoprivredna i šumska zemljišta te negativno utječu na kvalitetu vode u rijekama i potocima [1], [3].

Klizišta su odgovorna za mnogo veće socio-ekonomske gubitke nego što se općenito prepoznaje i/ili priznaje. Veliki dio štete od klizišta nije dokumentiran jer ih se pogrešno uključuje u izvješća o potresima, poplavama, vulkanskim erupcijama i dr., iako trošak štete od klizišta može premašiti sve troškove od ostalih nepogoda [1].

Koncept karakterizacija klizišta uključuje identifikaciju prostora zahvaćenog klizanjem te geometriju i utvrđivanje svojstava materijala. Svrha karakterizacije je prvenstveno sagledavanje problema od uzroka do posljedica. U tu svrhu potrebna je kvantifikacija geometrijskih odnosa i svojstava materijala.

Spajanjem više kliznih ploha nastaju kompleksna klizišta koja se međusobno mogu razlikovati po brzini pomaka na pojedinim dijelovima. Jedan od takvih primjera su klizišta na groblju u Bedekovčini i Kravarskom (pojava više klizišta duž državne ceste). Unutar iznimno heterogenog tla in-situ sonde pokazale su se vrlo učinkovite u detekciji problematičnih slojeva sklonih klizanju. Osim litoloških i geoloških istraživanja, vrlo je važno sveobuhvatna istraživanja staviti i u kontekst hidrogeoloških uvjeta koji su najčešće okidač pokretanja procesa klizanja.

U ovom radu istražiti će se osjetljivost pojedine in-situ statičke sonde za detektiranje kliznih ploha. Uvjeti koji ograničavaju pojedinu metodu mogu se pretpostaviti kako slijedi:

1. Debljina sloja tla pod utjecajem klizne plohe u tlu.

Klizanja na kontaktu slojeva bitno različite krutosti, kao što je klizanje glinovite krovine po podini laporovitih glina, formira kliznu plohu unutar tla ne deblju od nekoliko centimetara. Ovakve tanke promjene mogu se detektirati samo kontinuiranim metodama kao što je statički konusni penetrometar CPTu. Pojava kliznih ploha unutar materijala sličnih karakteristika mogu formirati šire zone promjena u tlu unutar kojih se mogu događati i klizanja u više ploha.

2. Promjene u normalno konsolidiranim mekim sedimentima.

Klizna ploha unutar prekonsolidiranih sedimenata izražena je promjenom koeficijenta prekonsolidacije. Normalno konsolidirani materijali nemaju jasno izraženu ovakvu promjenu. U prednosti su in-situ metode kod kojih je izražena osjetljivost na horizontalna naprezanja u tlu kao što je plosnati dilatometar DMT.

3. Rezolucija metode i detekcija tankog sloja.

Utjecaj okolnog tla može spriječiti detekciju izmijenjenog tla i veličinu otiska sonde.

4. Klizne plohe u mješovitom tlu.

Intenzivne promjene unutar tanko uslojenog tla mogu maskirati kliznu plohu i otežati njezinu detekciju.

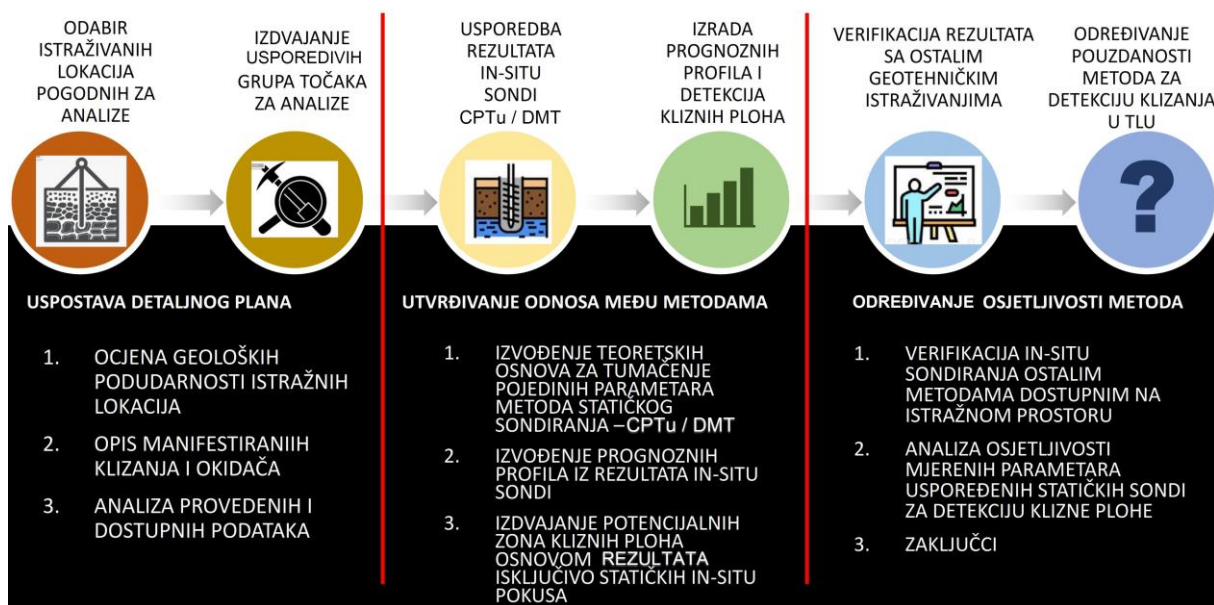
Osjetljivost pojedine metode na navedene uvjete istražiti će se na primjerima iz ovog rada, a za verifikaciju kroz inklinometarska mjerenja.

Tijek istraživanja obuhvaća tri osnovne faze (slika 1.1.). Nakon odabira lokacija pogodnih za istraživanje (Bedekovčina i Kravarsko), analize litoškog sastava i opisa problematike na predmetnim klizištima, opisat će se teorijske osnove klizanja i okidača klizanja na temelju dostupne literature.

U drugoj fazi izdvojiti će se i opisati parametri statičkog konusnog penetrometra (CPTu) i plosnatog dilatometra (DMT) na temelju čijih rezultata će se napraviti usporedba uspješnosti navedenih metoda. Osnovni cilj ove faze je izrada prognoznih

profila izdvojenih parametara tla statičkih sonde te određivanje dubine potencijalnih kliznih ploha na temelju dobivenih rezultata.

U trećoj fazi provest će se verifikacija izdvojenih potencijalnih ploha horizontalnim pomacima inklinometra. Nadalje, napraviti će se usporedba uspješnosti metode konusnog penetrometra i plosnatog dilatometra na temelju analize osjetljivosti parametara te procijeniti koja metoda daje bolje rezultate za karakterizaciju klizišta.



Slika 1.1. Dijagram tijeka istraživanja

2. HIPOTEZA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

2.1. Hipoteza

In-situ metodama istraživanja možemo detektirati promjene u tlu vezane uz manifestaciju klizanja. Materijal u kliznoj plohi podvrgnut je velikim deformacijama, kojem se zbog stanja naprezanja mijenja struktura. Osjetljivost pojedine in-situ metode u svrhu detekcije promjena u tlu kao posljedice klizanja nije jednaka. Reorijentacijom čestica u tlu kod posmičnih djelovanja, mijenja se prvenstveno stanje bočnih naprezanja. U tu svrhu pretpostavka je da je dilatometarska sonda u prednosti pred konusnim penetrometrom.

2.2. Ciljevi istraživanja

Na primjeru istraživanja na lokaciji klizišta groblja u Bedekovčini i Kravarskom provešće se parametarska analiza tla unutar klizne plohe usporedbom parametara rezultata sondiranja dviju in-situ metoda. Za verifikaciju pouzdanosti rezultata koristit će se podaci iz inklinometarskih opažanja. Poklapanje analiza s rezultatima odabrane verifikacijske metodom sigurna su potvrda uspješnosti metode u detekciji kliznih ploha. Dobiveni rezultati usporedbe uspješnosti in-situ sonde potencijalno će omogućiti brže i efikasnije istraživanje klizišta.

3. UZROCI KLIZANJA I STABILNOST KOSINA

Klizišta se događaju u različitim vrstama stijena i tla, a mehanizmi klizanja i okidači su različiti. U tablici 3.1. dana je pregledna podjela klizišta prema mehanizmu pokreta i vrsti materijala. U ovom radu naglasak će biti na klizištima u sitnozrnatim i miješanim materijalima kod kojih uzrok leži u hidrauličkim svojstvima tla.

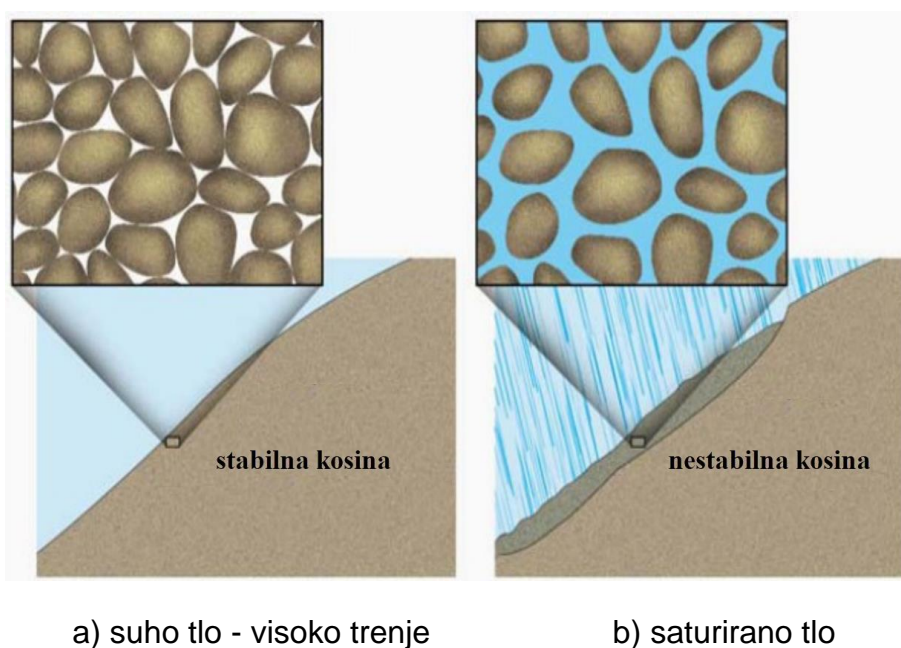
Tablica 3.1. Podjela klizišta ovisno o mehanizmu pokreta i vrsti materijala u kojem nastaju [6]

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

Uzroci klizanja dijele se na prirodne i umjetne tj. antropogene (izazvane ljudskim aktivnostima). U prirodne uzroke ubrajaju se uvjeti na kosini, mineraloški sastav, geotehničke karakteristike kosine, izmjena slojeva različite propusnosti i krutosti, nagib površine kosine i dr. Ostali prirodni uzroci su voda, gravitacija, razgradnja, erozija, potresi, požari, tektonika, glacijalni procesi i dr.

Ljudi svojim nepravilnim korištenjem zemljišta imaju veliki utjecaj na nastanak klizišta. Ljudske aktivnosti kojima se inicira nastanak klizišta su npr. formiranje dodatnih opterećenja na vrhu padine, zasijecanje u padini, sniženje i porast podzemne i površinske vode, skretanje tokova, seizmička aktivnost, umjetne vibracije, sječa šuma, rudarenje i dr. [7].

Zasićenost (saturiranost) tla vodom smatra se primarnim uzrokom aktivacije klizišta (kod razmatrane vrste klizanja). Porastom razine podzemne vode povećavaju se porni pritisci koji smanjuju efektivno naprezanje, a samim time i posmičnu čvrstoću. Kada je tlo suho, prisutno je veće trenje između čestica tla te je faktor sigurnosti veći u odnosu na kosinu saturiranu vodom (slika 3.1.a). Saturacijom tla vodom dolazi do razmicanja čestica i popunjavanja pora vodom što dovodi do tečenja tla (smanjuje se trenje između čestica) i nestabilnosti kosine (slika 3.1.b). Zbog toga se mnoga klizišta javljaju nakon obilnih oborina [8].



Slika 3.1. Utjecaj vode (oborina) na stabilnost kosine [8]

Do sloma kosine dolazi zbog prekoračenja posmične čvrstoće, kada aktivne sile dostignu veću vrijednost od sila otpora (reaktivnih sila). Faktor sigurnosti predstavlja mjeru stabilnosti kosine. Mijenja se ovisno o posmičnoj čvrstoći tla, a posmična čvrstoća ovisi o vertikalnom efektivnom naprezanju. Faktor sigurnosti protiv sloma kosine određen je jednadžbom 3.1. [9].

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\text{sile otpora}}{\text{aktivne sile}} \quad (3.1.)$$

Oznake u jednadžbi su:

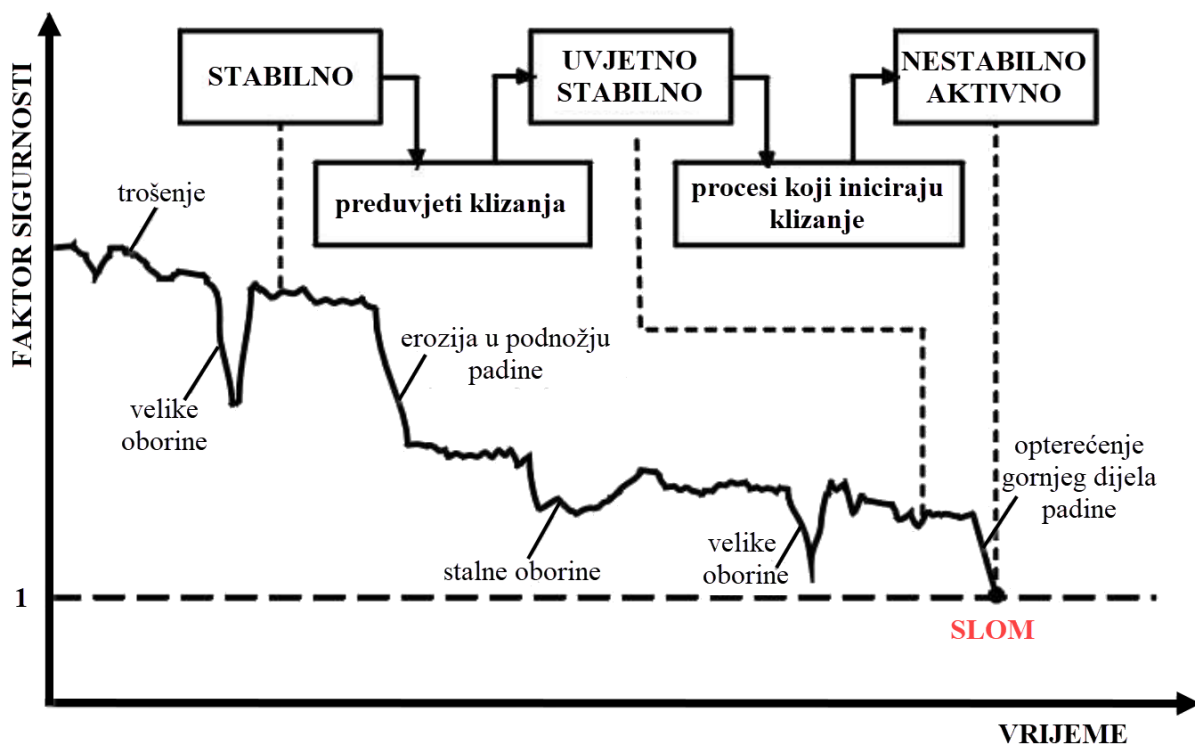
F_s - faktor sigurnosti protiv sloma

τ_f - posmična čvrstoća na kliznoj plohi

τ - posmično naprezanje na kliznoj plohi

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

Slika 3.2. Prikazuje promjene faktora sigurnosti kosine koje su posljedica sezonskih oborina i evaporacije u funkciji vremena.



Slika 3.2. Promjena faktora sigurnosti u vremenu [7]

4. ISTRAŽIVANE LOKACIJE I PRIKAZ PROBLEMATIKE

U ovom poglavlju opisane su predmetne lokacije klizišta (općenito, litološki sastav, geotehničko i hidrološko gledište). Sličan sastav u kojem prevladavaju nepropusne klastične naslage dovodi do istih problema s hidrogeološkog i geotehničkog gledišta kod obje lokacije klizišta.

4.1. Klizište Bedekovčina

Bedekovčina je naseljeno mjesto i istoimena općina u Hrvatskom zagorju (Krapinsko-zagorska županija). Istraživano područje, gradsko groblje Bedekovčina, nalazi se oko 1200 m zapadno od grada, odnosno oko 1500 m sjeverozapadno od rijeke Krapine. Područje groblja pripada morfološki brežuljkastom području u južnim obroncima Ivanščice na prijelazu u dolinu rijeke Krapine. Sama lokacija groblja nalazi se na padini koja je nagnuta prema jugoistoku na nadmorskoj visini između 208 i 220 m. Područje klizišta Bedekovčina podijeljeno je u 3 cjeline (slika 4.1.a): Novo groblje u Bedekovčini (A), Staro groblje u Bedekovčini (B) i Čajkovljansko naselje (C).

Morfologija šireg istražnog područja je razvedeno brežuljkasta, blago nagnutih padina, koje su ispresijecane duboko usječenim jarugama strmih bokova sa denivelacijama koje često prelaze preko 10 m. Cijeli teren je pokriven produktima površinskog trošenja naslaga iz podloge tako da izdanci nisu vidljivi osim u rijetkim zasjecima.

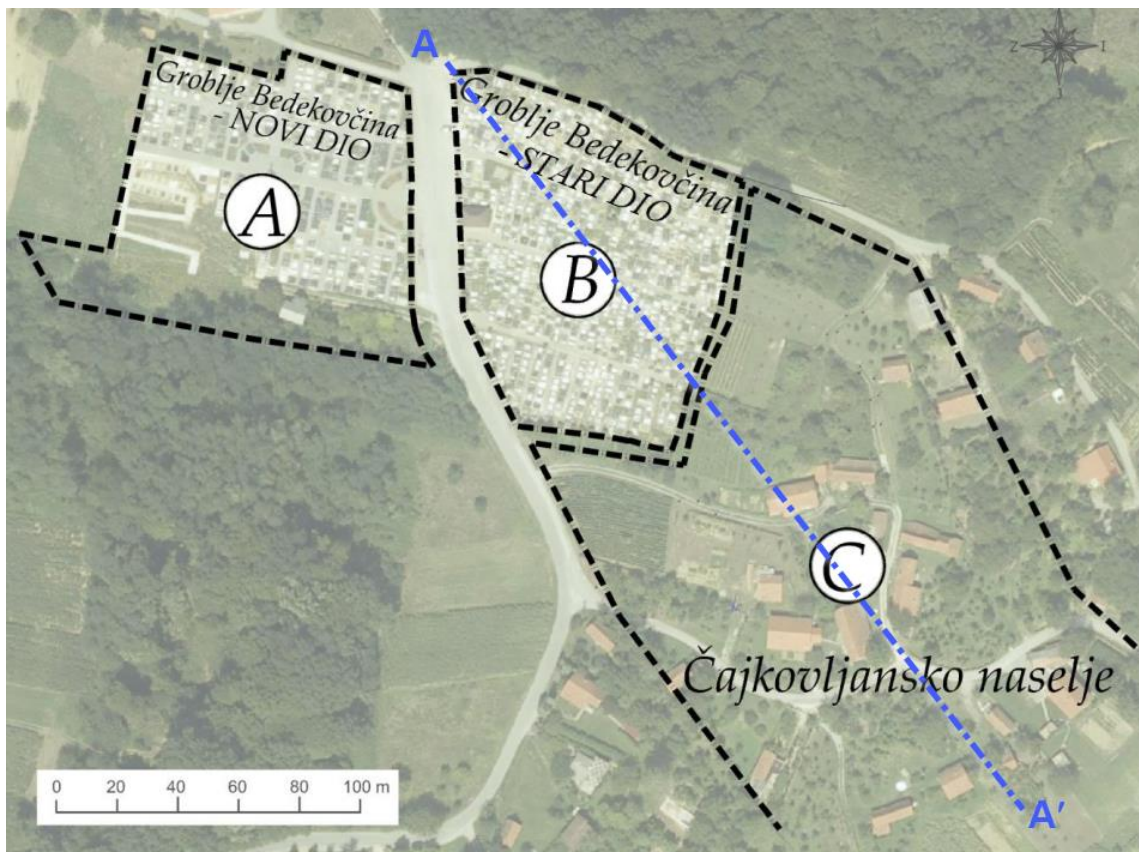
Opisana morfologija rezultat je litološkog sastava zastupljenih naslaga, tektonske aktivnosti i erozijskih procesa. Tektonske deformacije (rasjedi i bore) stvorili su inicijalne uvjete stvaranja erozijske mreže koja danas postoji. Erozijska mreža je nepravilna s nekoliko stalnih površinskih tokova koji dreniraju mrežu bočnih jaraka. Stalni površinski tokovi su generalno orijentirani pravcem sjeverozapad-jugoistok, sa povremenom promjenom pravca u smjeru istok-zapad.

U litološkom smislu, šire istražno područje izgrađuju klastične naslage pliocena, taložine na prijelazu pliocena u stariji kvartar (pleistocen) i aluvijalne naslage u dolini toka rijeke Krapine. Prostorni raspored ovih naslaga s pripadnim oznakama litologije prikazan je na preglednom geološkom profilu na slici 4.1.b). Litologija je sljedeća:

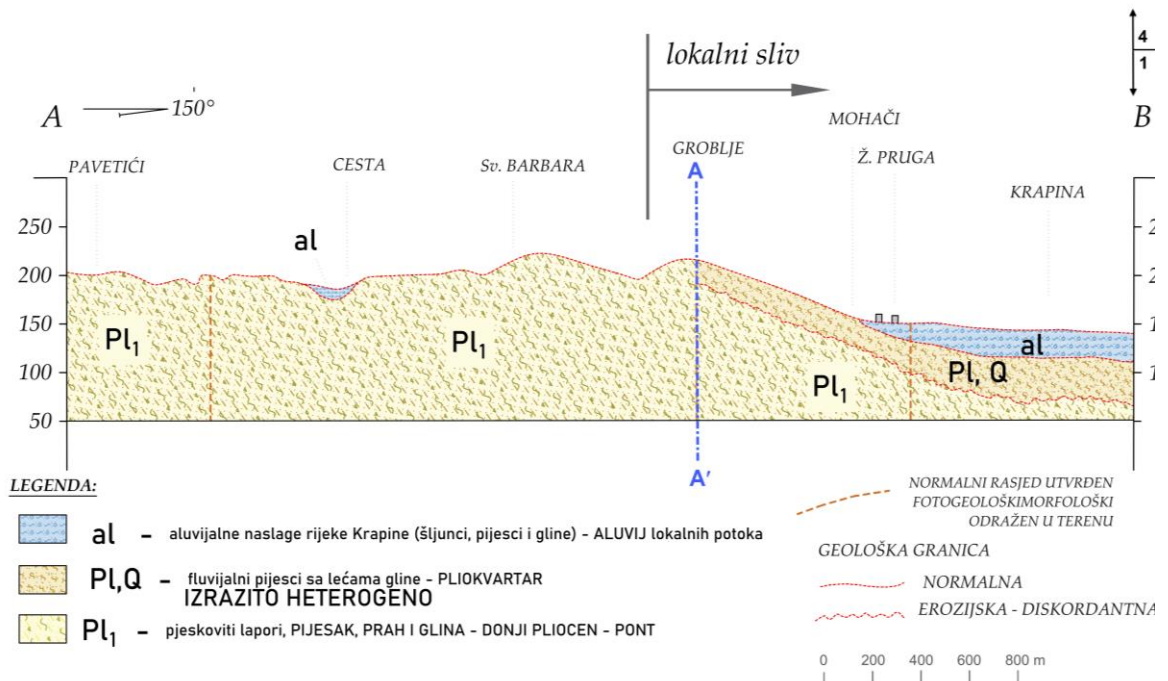
- **Donji pliocen pont (Pl₁)** - ove naslage čine klastiti koje karakterizira izmjena pijeska, praha, gline i pjeskovitih lapora. Modro-sivi lapori nalaze se u

superpozicijski najnižim dijelovima slijeda. Na njih naliježu dobro uslojeni pjeskoviti lapori s lećama praha i gline, a lokalno mogu sadržavati i slojeve ugljena. Debljina ovih naslaga prema postojećim podacima iznosi 100 - 450 m.

- **Plio-Pleistocen (PI, Q)** - naslage fluvijalnog tipa na prijelazu između pliocena i kvartara su diskordantne u odnosu na starije naslage pliocenske starosti. Kontakt prema starijim pliocenskim naslagama je tektonski, a u nekim slučajevima granica je erozijska. U litološkom smislu zastupljeni su pijesci sa prahom i lećama gline. **Lokacija groblja Bedekovčina nalazi se u ovim naslagama.**
- **Holocen (al)** - aluvijalne naslage nalaze se u dolini rijeke Krapine. U litološkom smislu zastupljeni su nevezani klastiti kojima granulometrijski sastav varira od šljunka preko pijeska, praha i gline.



a)



b)

Slika 4.1. a) Prikaz istraživanog područja; b) Pregledni geološki profil šireg istraživanog područja lokacije groblja Bedekovčina

Na slici 4.2. prikazane su različite vrste glina koje grade tlo na istraživanom području. Uočljive su razlike u sedimentaciji i sastavu. Visoko plastične (masne) gline, (prva slika lijevo) karakterizira vrlo niska propusnost, a prilikom gubitka vlage u uzorku dolazi do pojave stezanja (smanjenje volumena). Gline s pijeskom (predzadnja slika desno) veće su propusnosti od masnih glina, dok gubitkom vlage ne dolazi do stezanja uzorka ili je ono minimalno izraženo.



Slika 4.2. Različiti uzorci glina s područja klizišta Bedekovčina

S hidrogeološkog gledišta opisane klastične naslage pliocena i pliokvartara su nepropusne o čemu svjedoče duboko usječene jaruge i postojeća razvedena erozijska mreža. Dominantno je površinsko otjecanje, dok je podzemno tečenje ograničeno i lokalnog značenja. Budući da u ovim klastičnim naslagama postoji površinski dio koji je vanjskim čimbenicima izmijenjen u odnosu na izvorno tlo, u tom dijelu dolazi do infiltracije oborinske vode koja pridonosi destabilizaciji trošnih naslaga na padini. Nestabilnosti pridonosi činjenica da sitnozrnate naslage teško otpuštaju infiltriranu vodu.

U obodnom dijelu istraživanog područja nalazi se morfološka denivelacija koja je rezultat tektonskih i erozijskih procesa. Navedena denivelacija smatra se granicom površinskog lokalnog sliva, budući da podzemni dotoci vode prema groblju sa sjevera i zapada nisu mogući. Stoga, podzemna voda koja se pojavljuje na groblju na dubini od 2 - 3 m potječe od oborinske vode koja se procijedila u površinski trošni sloj koji se sastoji od pijeska s lećama gline.

Pomaci tla na starom dijelu groblja u Bedekovčini sežu vrlo davno i kao takvi za posljedicu imaju oblikovanje terena groblja, ali i šireg prostora Čajkovljanskog naselja u podnožju groblja. Štete na građevinskim objektima stanovnici naselja bilježe još od prethodnih generacija. Najveće štete zabilježene su na objektima koji se nalaze bliže starom groblju, dok su pomaci s udaljenošću niz padinu sve manjih iznosa.

Granice klizišta okonturene su u čeonom dijelu koji se nalazi na prostoru starog dijela groblja (slika 5.1.) Na dijelu groblja došlo je do slijeganja ukopnog polja u približnom iznosu od 1 m. Usjedanje rubnog dijela groblja rezultat je klizanja terena, ali i posljedično popuštanja potpornog zida koji podupire jugoistočni dio groblja. Lateralne konture kao i konture nožice nisu potpuno jasno izražene. Zbog intenzivno naboranog terena nije moguće točno odrediti mjesto nakupljanja materijala pa se dolazi do zaključka da se radi o puzištu pri čemu puže cijeli dio padine do završno sa stopom u dolini.

4.2. Klizište Kravarsko

Općina Kravarsko nalazi se u južnom dijelu Zagrebačke županije, na području važnog cestovnog puta Zagreb-Velika Gorica-Pokupsko-Glina. S obzirom na prirodno-geografsku regionalizaciju, općina Kravarsko pripada jugozapadnom dijelu Panonske megaregije. Evidentiran je veći broj klizišta uz državnu cestu D31 od kojih je nekoliko

geotehnički obrađivano. Na predmetnoj dionici nestabilnosti se saniraju do kad seže sjećanje stanovnika.

Lokaciju grade naslage srednjeg pliocena (Pl₂), koje su zastupljene glinama i pijescima s proslojcima organske gline, treseta i lignita. Gline sadrže velike količine dispergirane organske supstance (ponegdje treset), te više ili manje prašinate i pjeskovite komponente. Također, pojavljuju se tanji i deblji slojevi pijeska, koji su uglavnom prašinati i pjeskoviti do vezani glinom.

Na istraživanom području utvrđeni su ekstremno visoki nivoi podzemne vode u piezometrima. Razine vode sežu gotovo do površine, a pojedini piezometri pokazuju na arteške pritiske (40 cm iznad kote terena). Zabilježeni pritisci su kontinuirani.

Strukturno-tektonski odnosi prostora su složeni pa značajno utječu na inženjersko-geološke i hidrogeološke prilike. Morfologija prostora je povoljna za formiranje čestih klizanja tla. Klizišta na ovom prostoru nisu prisutna samo na trasi državne ceste već je klizanje tla sveprisutni fenomen prostora, uvjetovan litostratigrafskim i hidrogeološkim uvjetima. Više dijelove razvedene topografije terena grade pijesci u kojima se infiltracijski prihvaćaju vode, a narušeni kontinuiteti pjeskovitih slojeva u nižim dijelovima terena stvaraju uvjete za nastanak arteških vodonosnika. Sufozije (poniranje) površinskih tokova, te zavodnjenost (izbijanje vode, izvori) u podinama strmina, česta su pojava na predmetnom prostoru. Slika 4.3. prikazuje neke od pojava na klizištima u Kravarskom koje se javljaju kao posljedica klizanja tla.



a) pukotine na cestama i odlamanje dijelova asvalta



b) otkliznuće većih količina mase tla

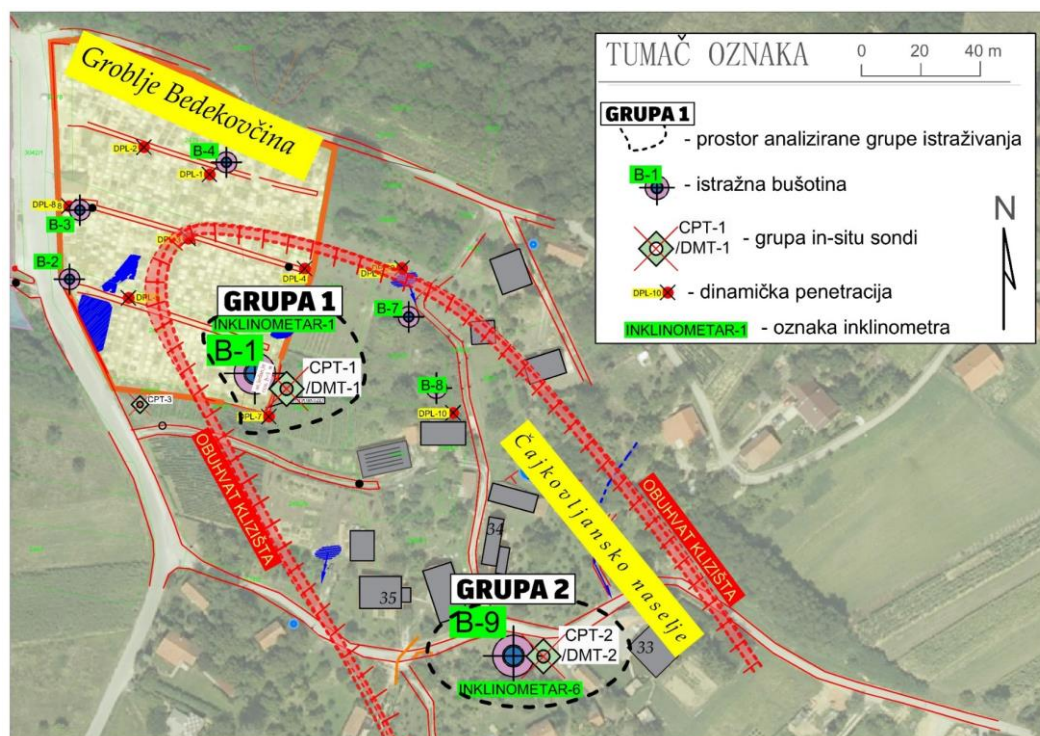


c) izbijanje vode na površinu

Slika 4.3. Posljedice aktivacije klizišta

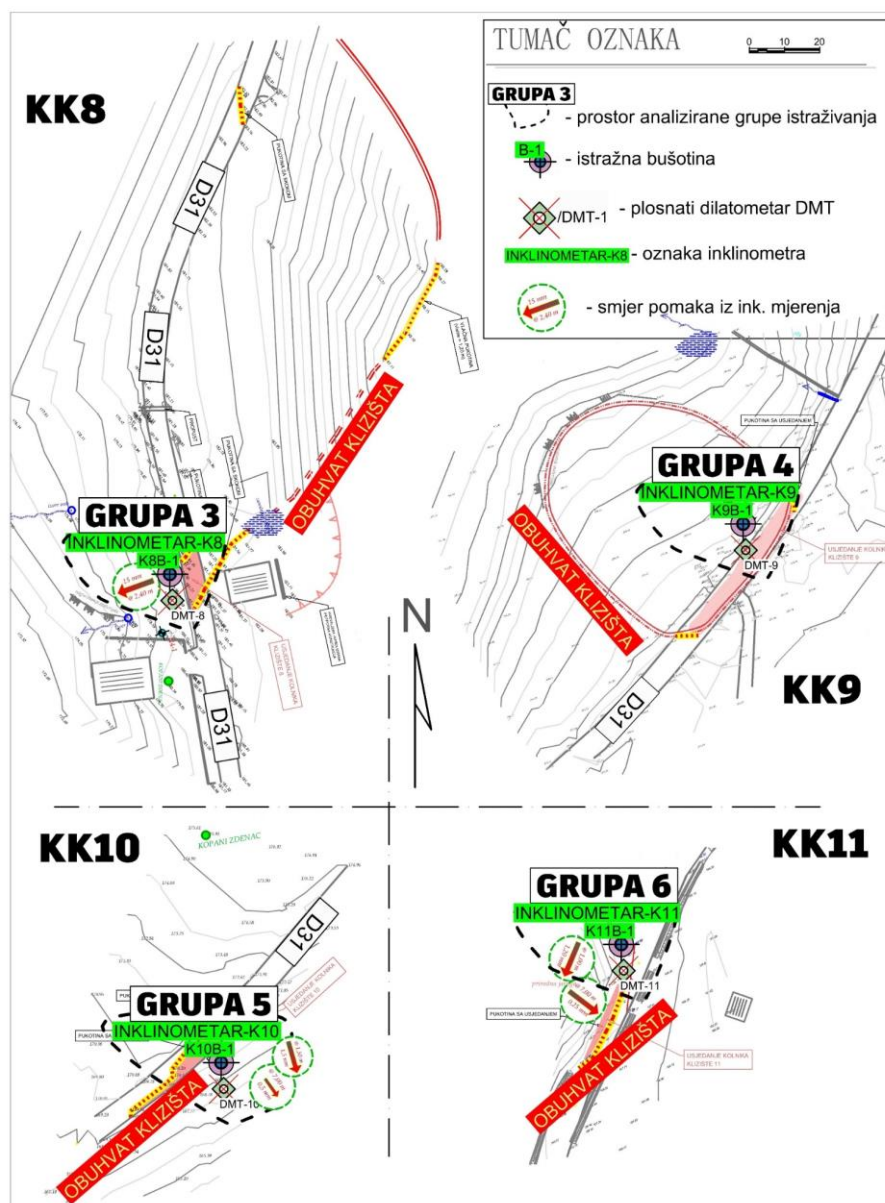
5. METODE ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju opisane su metode statičkog in-situ sondiranja i mjerenja horizontalnih pomaka inklinometrima, korištene kod istražnih radova u svrhu karakterizacije klizišta na groblju u Bedekovčini i općini Kravarsko. Položaj razmatranih istražnih radova na groblju u Bedekovčini prikazan je na situacijskom planu istraživanja na slici 5.1. Analizirane su dvije grupe istražnog područja. S obzirom da je na vrlo uskom području pojedine grupe izvedeno statičko sondiranje CPTu i DMT sondom te istražna bušotina u koju je ugrađeni inklinometar, omogućena je usporedba odabranih parametara in-situ sonde za detekciju klizne plohe, kao i kasnija verifikacija s rezultatima inklinometra.



Slika 5.1. Situacijski plan istraživanja - klizište Bedekovčina

Na području općine Kravarsko analizirat će se četiri manifestirana klizišta (4 grupe istražnog područja) duž državne ceste D31 (KK8, KK9, KK10 i KK11). Situacije terenskih istražnih radova za pojedino klizište prikazane su na slici 5.2.



Slika 5.2. Situacijski plan istraživanja - klizište Karavarsko

5.1. Teorija prodiranja statičkog konusa u tlu

Moderni pokus statičkim konusnim penetrometrom s mjerenjem pornog tlaka (Cone Penetration Test (u - pore pressure, CPTu) izvodi se utiskivanjem mjernog penetracijskog konusa (sonde) konstantnom brzinom pomoću potisnih penetracijskih šipki. CPTu pokus provodi se prema normi HRN EN ISO 22476-1, Geotehničko Istraživanje i Ispitivanje - Terensko Ispitivanje - 1. Dio: Ispitivanje električnim statičkim prodiranjem bez mjerenja pornog tlaka i s mjerenjem pornog tlaka (ISO 22476-1:2012; EN ISO 22476:2012). Sva oprema i postupci istraživanja moraju biti u skladu s navedenom normom [10].

Razvojem postupka statičke konusne penetracije, razvijeno je više modela za potrebe predviđanja profila prodiranja CPTu konusnog penetrometra u tlu. Postoji pet osnovnih grupa teoretskih modela korištenih za opisivanje mehanizma u tlu kod prodiranja konusnog penetrometra. Sve navedene teorijske osnove integrirane su u rješenja određivanja geotehničkih parametara iz CPTu penetrometra. Modeli teorija su sljedeći [11]:

- teorija nosivosti
- teorija širenja šupljine u tlu
- teorija očuvanja energije u kombinaciji s teorijom širenja šupljine
- analitički i numerički pristup linearnom i nelinearnom odnosu naprežanje-deformacija
- teorija envelope sloma.

U teoriji, za poznate parametre tla, moguće je predvidjeti rezultate CPTu sondiranja. Modeli su verificirani na dobro istraženim lokacijama, a zaključci se mogu svesti na sljedeće [11]:

1. Moguće je predvidjeti opći trend CPTu očitavanja u glinovitim tlima. Uvjet su kvalitetni parametri tla sa istražnih lokacija.
2. Ključni parametri koji bitno utječu na uklapanje CPTu mjernih krivulja vezani su uz povijest naprežanja (σ'_p, OCR i I_R). Ostali parametri imaju relativno manji utjecaj na točnost uklapanja modela.
3. Većina postojećih modela nije dovoljno razvijena za opisivanje mješovitog tla, kao što su prašinasto-pjeskovite gline.

Zaključci modelskih istraživanja ukazuju na velik utjecaj stanja horizontalnih naprežanja u tlu kao i povijesti naprežanja kojima je tlo bilo podvrgnuto [11].

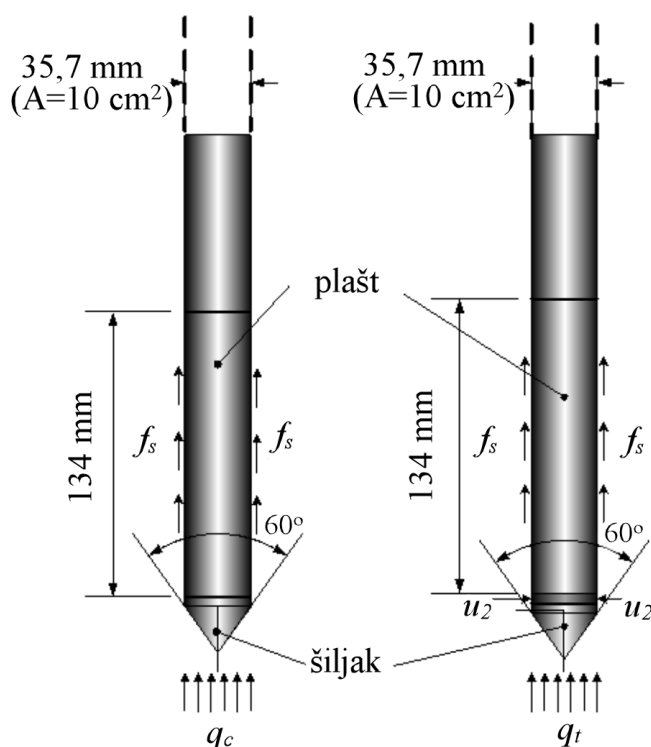
Na lokacijama klizišta, u zonama kliznih ploha događa se intenzivna preorijentacija strukture tla u kojoj se gube informacije iz povijesti prethodnih okomitih naprežanja, ali se mijenja i horizontalno stanje naprežanja u tlu. In-situ statičke sonde detektiraju izmijenjene uvjete u tlu koji se manifestiraju kroz mjerene parametre.

5.1.1. Oprema i postupak

Oprema za CPTu istraživanje sastoji se od mjernog konusa (sonde) tj. „piezokonusa“, promjera 37,5 mm. Površina vrha sonde je 10 ili 15 cm², a plašta 150 cm². Nagib vrha konusa iznosi 60°. Zatim uređaja za utiskivanje, šipki za penetraciju (d= 35,7 mm, l = 1000 mm), električnog kabela i sistema za prikupljanje podataka (loggera) [10], [12].

Za provedbu istraživanja nije nužno izvesti bušotinu, ali kod pojave kamenog nasipa na površini potrebno je predbušenje. Istraživanje se provodi hidrauličkim utiskivanjem sonde konstantnom brzinom od 2 cm/s [13].

Slika 5.3. prikazuje osnovne dijelove, tehničke specifikacije i neke mjerene parametre statičkog konusa bez mjerenja pornog tlaka (Cone Penetration Test, CPT) (lijevo) i statičkog konusa s mjerenjem pornog tlaka, CPTu (desno) [14].



Slika 5.3. Mjerni konus (sonda) bez mjerenja pornog tlaka, CPT (lijevo) i s mjerenjem pornog tlaka CPTu (desno) [14]

5.1.2. Mjerni parametri

Tijekom istraživanja standardno se mjere otpor na šiljku sonde (q_c), trenje po plaštu sonde (f_s), nagib pribora (i) i porni tlak (u) na filteru iznad vrha sonde. Može se mjeriti

i brzina posmičnih valova (v_s) (SCPT sonda). U tablici 5.1. prikazane su oznake, opisi i mjerne jedinice određenih parametra koji se dobivaju tijekom CPTu sondiranja.

Tablica 5.1. Neki parametri dobiveni CPTu sondiranjem

Oznaka	Opis parametra	Mjerna jedinica
q_c	otpor na šiljku sonde (penetrometra)	MPa
q_t	ispravljeni otpor na šiljku	MPa
q_n	neto otpor na šiljku (q_{net}) -otpor na vrhu konusa umanjen za ukupno vertikalno geološko naprezanje na dubini ispitivanja	MPa
Q_t	bezdimezionalni neto otpor na šiljku -otpor na vrhu konusa izražen kao bezdimezionalni parametar, a koji u obzir uzima in-situ promjene naprezanja	-
f_s	trenje tla po plaštu penetrometra	kPa
R_f	koeficijent trenja -omjer otpora trenja po plaštu i otpora na šiljku konusa izražen u postocima	%
u	iznos nakupljenog pornog iznad filtera na vrhu sonde	kPa
B_q	normalizirani porni tlak (parametar pornog tlaka) -koristi se za procjenu nedrenirane posmične čvrstoće	-

Otpor na šiljku (q_c) je najpouzdanija mjerena vrijednost koja se povezuje s nosivošću tla. Predstavlja ukupnu silu kojom tlo pri prodiranju djeluje na površinu vrha konusa. U glinama i prahovima otpor na šiljku potrebno je korigirati za porni tlak, pa se dobiva korigirani otpor na šiljku (q_t). Korigirani otpor na šiljku ukazuje na vrstu i stanje tla. Vrijedi da je $q_t > 5 \text{ MPa}$ u pijescima, a u mekanim do srednje krutim glinama je $q_t < 2 \text{ MPa}$. U prekonsolidiranim glinama korigirani otpor na vrhu sonde može biti i veći od 5 MPa [13].

Trenje na plaštu sonde (f_s) je zapravo posmično naprezanje koje djeluje na površinu plašta. Ta se vrijednost često izražava u obliku koeficijenta trenja R_f . Koeficijent trenja je u čistim pijescima manji od 1 %, a u koherentnim tlima veći od 4 % [13], [14].

Na temelju rezultata CPTu pokusa moguće je klasificirati tlo koristeći indeks tipa ponašanja tla I_c u SBTn (engl. Normalized Soil Behaviour Type) dijagramu ($Q_t - F_r$) autora Robertson (2010) [15]. Klasifikacija tla se neće razmatrati u ovom radu.

5.1.3. Interpretacija rezultata

Interpretacije se provode primjenom konzervativnih vrijednosti konstanti da se osiguraju niže i konzervativne ocjene geotehničkih parametara. Većina korelacija su polu-empirijske (potpomognute teorijskim osnovama), kod čega su krupnozrnata tla ograničena bazično na rezultate necementiranih silikatnih pijesaka [16].

5.1.3.1. Nedrenirana posmična čvrstoća

Nedrenirana posmična čvrstoća c_U definirana je kao parametar ukupnih naprezanja mjereno kod konstantnog volumena uzorka. Način smicanja utječe na izmjereni iznos posmične čvrstoće u mekim do krutim glinama [16].

Ovaj efekt mora biti poznat istraživaču kako bi bio u stanju realno interpretirati rezultate istraživanja. Dakle, postavke i vrste ispitivanja utječu na rezultat mjerenja nedrenirane posmične čvrstoće. Različita laboratorijska i terenska ispitivanja daju različite rezultate za iste materijale i dubine. Ovo je ilustrirano na slici 5.4. koju je objavio Hight sa suradnicima (2003.) za rezultate sa ispitne geotehničke lokacije Bothkennar u Velikoj Britaniji [17].

Nedrenirana posmična čvrstoća predstavlja najčešće interpretirani parametar glina kod in-situ statičke konusne penetracije CPTu. Interpretira se iz izmjerenog neto otpora prodiranja na šiljku konusa q_{net} . Rezultati nedrenirane posmične čvrstoće in-situ pokusa uspoređuju se sa rezultatima triaksijalnih testova, a definirana je izrazom 5.1.

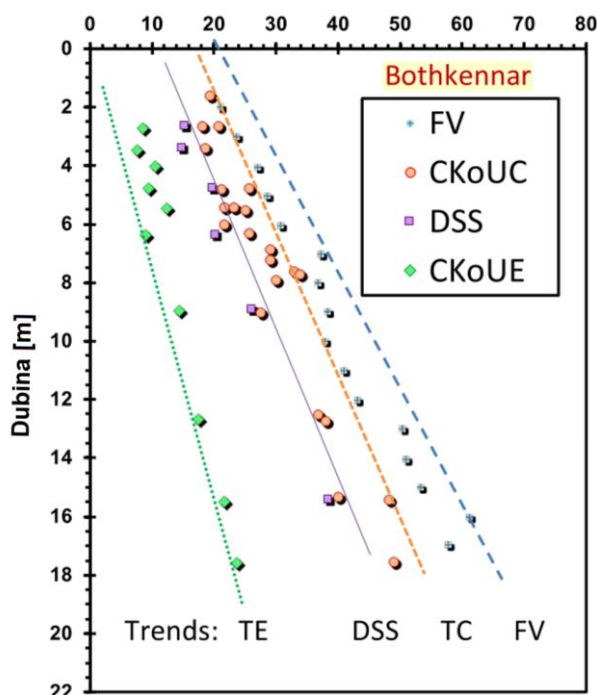
$$c_U = \frac{q_{net}}{N_{kt}} \quad (5.1.)$$

Oznake u izrazu su:

c_U - nedrenirana posmična čvrstoća [kPa]

N_{kt} - faktor nosivosti neto otpora na šiljku (faktor šiljka)

Raspon faktora N_{kt} izvješten je u rasponu od 8 do 20 za različite vrste materijala glina na različitim lokacijama. Ukoliko za lokaciju na kojoj se provodi in-situ sondiranje nisu dostupni dodatni podaci, usvaja se početna vrijednost $N_{kt} = 14$ [16].



Slika 5.4. Grupe c_U profila izmjerenih na ispitnoj geotehničkoj lokaciji mekih glina Bothkennar u Velikoj Britaniji. FVT - krilna sonda; TC - triaksijalni CKoUC pokus (kompresija), DSS - triaksijalni jednostavni posmik; TE - triaksijalni CKoUE pokus (ekstenzija) [16]

Faktor šiljka iz istraživanja u ovom radu

Za interpretacije statičke konusne penetracije, a usporedivo s rezultatima nedrenirane posmične čvrstoće dobivene plosnatim dilatometrom DMT, na istražnim lokacijama iz ovog rada korišteni je faktor šiljka $N_{kt} = 18$ (slike 6.1 i 6.3.).

Nedrenirana posmična čvrstoća iz mjenog tlaka porne vode

Nedrenirani uvjeti u uzorku u kojima se ispituje posmična čvrstoća glina mogu se povezati s parametrom nakupljenog pornog tlaka prilikom utiskivanja šiljka CPTu penetrometra. Izraz za nedreniranu posmičnu čvrstoću tada poprima oblik definiran izrazom 5.2.

$$c_U = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \quad (5.2.)$$

Oznake u jednadžbi su sljedeće:

Δu - promjena pornog tlaka vode [kPa]

$N_{\Delta u}$ - faktor nosivosti za nakupljeni tlak porne vode (faktor pornog tlaka)

Izvedeno iz teorije širenja šupljine u tlu SCE (Spherical Cavity Expansion) koju je razvio Vesić (1972 - 1977) moguće je povezati neto otpor na šiljku q_{net} i nakupljeni porni tlak prilikom penetracije Δu primjenom indeksa krutosti I_R . Razradom ove teorije dobiju se izrazi pomoću kojih možemo odrediti faktore nosivosti neto otpora N_{kt} i nakupljenog pornog tlaka $N_{\Delta u}$ (izrazi 5.3. i 5.4.) [18].

$$N_{kt} = \frac{3,90}{1 - B_q} \quad (5.3.)$$

$$N_{\Delta u} = \frac{3,90}{\frac{1}{B_q} - 1} \quad (5.4.)$$

5.1.3.2. Modul stišljivosti

Procjena dreniranog konsolidacijskog parametra kao što je jednodimenzionalni modul, odnosno tangenti edometarski modul stišljivost M može sadržavati ozbiljne pogreške korištenjem parametra otpora q_c kod nedreniranih uvjeta. Ukupna naprezanja kod nedrenirane penetracije teško je korelirati bez povezivanja s izmjerenim pornim tlakovima. Također, određena lokalna iskustva mogu popraviti predložene korelacije.

Modul stišljivosti M računa se prema izrazu 5.5. Rasponi faktora šiljka α_M prikazani su u tablici 5.2. [20].

$$M = \alpha_M \cdot q_n \quad (5.5.)$$

Oznake u jednadžbi su:

M - modul stišljivosti [MPa]

α_M - faktor šiljka [-]

q_c - otpor na šiljku sonde [MPa]

Tablica 5.2. Raspon koeficijenta α_M prema vrsti tla i izmjerenom otporu na šiljku q_c [20]

Tlo	q_c	α_m
glina niske plastičnosti	$q_c \leq 0,7 \text{ MPa}$ $0,7 < q_c < 2 \text{ MPa}$ $q_c \geq 2 \text{ MPa}$	$3 < \alpha < 8$ $2 < \alpha < 5$ $1 < \alpha < 2,5$
prah niske plastičnosti niske plastičnosti	$q_c < 2 \text{ MPa}$ $q_c \geq 2 \text{ MPa}$	$3 < \alpha < 6$ $1 < \alpha < 2$
visoko plastična glina visoko plastični prah	$q_c < 2 \text{ MPa}$ $q_c > 2 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 6$ $1 < \alpha < 2$
vrlo organski prah	$q_c < 1,2 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 8$
krede	$2 < q_c \leq 3 \text{ MPa}$ $q_c > 3 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 4$ $1,5 < \alpha < 3$
pijesci	$q_c < 5 \text{ MPa}$ $q_c > 10 \text{ MPa}$	$\alpha = 2$ $\alpha = 1,5$

Vrijednost otpora na šiljku q_c iz tablice 5.2. može se uzeti kao neto otpor na šiljku q_n za CPTu vrstu ispitivanja [19], [20].

5.1.3.3. Koeficijent prekonsolidacije

Stupanj (koeficijent) prekonsolidacije definiran je kao omjer najvećeg okomitog (vertikalnog) naprezanja u prethodnome razdoblju i naprezanja kojem je tlo izloženo u promatranom trenutku. Skraćeno se označava oznakom OCR (engl. Overconsolidation Ratio). U odnosu na koeficijent prekonsolidacije razlikuju se normalno konsolidirana tla ($OCR = 1$) i prekonsolidirana ($1 < OCR$). Kod ispitivanja statičke konusne penetracije CPTu koeficijent prekonsolidacije određuje se iz bezdimenzionalnog neto otpora na šiljku Q_t , upotrebom faktora prekonsolidacije k_{OCR} . Izraz za izračun koeficijenta prekonsolidacije tada glasi [21]:

$$OCR = k_{OCR} \cdot Q_t = k_{OCR} \cdot \frac{q_n}{\sigma'_{v0}} = k_{OCR} \cdot \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (5.6.)$$

Oznake u izrazu su sljedeće:

OCR - koeficijent prekonsolidacije [-]

k_{OCR} - faktor prekonsolidacije [-]

σ'_{v0} - vertikalno efektivno in-situ naprezanje [kPa]

5.1.4. Istraživanje konusnim penetrometrom na klizištu Bedekovčina i Kravarsko

CPTu sondiranje na obje predmetne lokacije klizišta provedeno je hidrauličkim uređajem za utiskivanje tipa Pagani (slika 5.5.). Interpretacija izmjerenih podataka dobivenih CPTu sondiranjem provedena je programom CpeT-IT v.3.3.2.17 (2007), GeoLogismiki. Na temelju CPTu podataka program provodi interpretaciju u skladu s tipom ponašanja tla (SBTn) i različitim geotehničkim parametrima, a sve na osnovi objavljenih empiričkih korelacija prema Lunne, Robertson i Powell (1997) [22].

Tijekom istraživanja klizišta na groblju u Bedekovčini izvedeno je ukupno 4 CPTu sondiranja, od kojih će 2 biti analizirana. Položaj CPTu sonde prikazan je slici 5.1. Na području klizišta općine Kravarsko CPTu sondiranje nije se izvodilo.



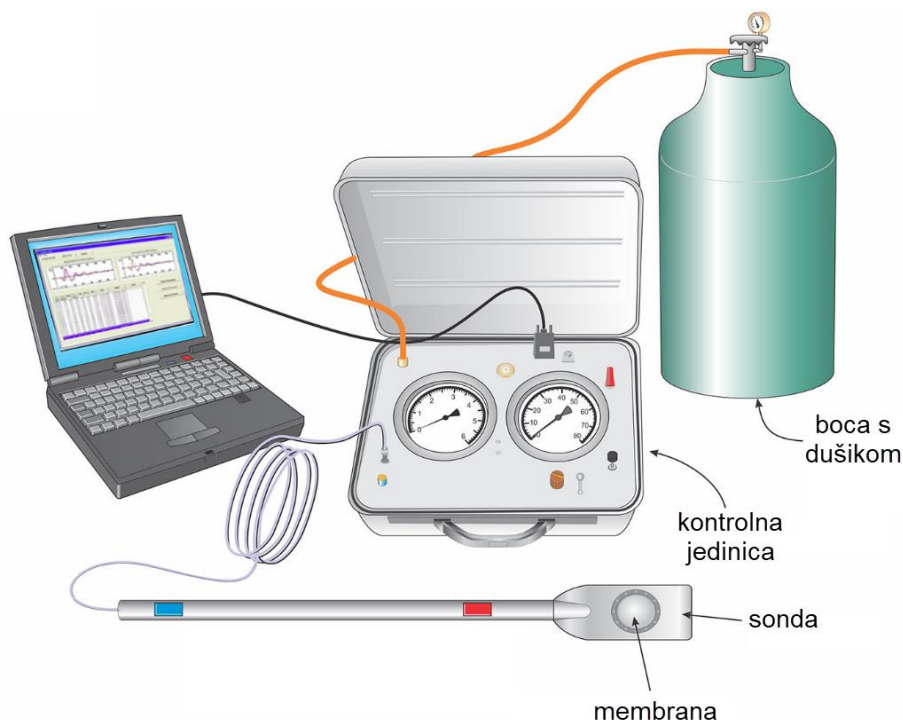
Slika 5.5. Hidraulički penetrometar za utiskivanje, Pagani TG 63 -150

5.2. Teorija sondiranja plosnatim dilatometrom

Istraživanje plosnatim dilatometrom (Flat Dilatometer Test, DMT) razvio je Silvano Marchetti u Italiji 1980. godine za određivanje čvrstoće i deformacijskih svojstava tla utiskivanjem čelične sonde. Mjerna sonda zaustavlja se na određenim dubinama zbog mjerenja specifičnih tlakova. Istraživanje se provodi prema normi HRN EN ISO 22476-11:2017, Geotehničko Istraživanje i Ispitivanje - Terensko Ispitivanje - 11. Dio: Ispitivanje Plosnatim Dilatometrom. Pokus se najčešće primjenjuje u glinama, prahovima i mekanim stijenama. Za provedbu pokusa nije potrebno izvesti bušotinu. U slučaju izvedene bušotine, sondiranje se tada provodi u neporemećeni dio tla [24].

5.2.1. Oprema i postupak istraživanja

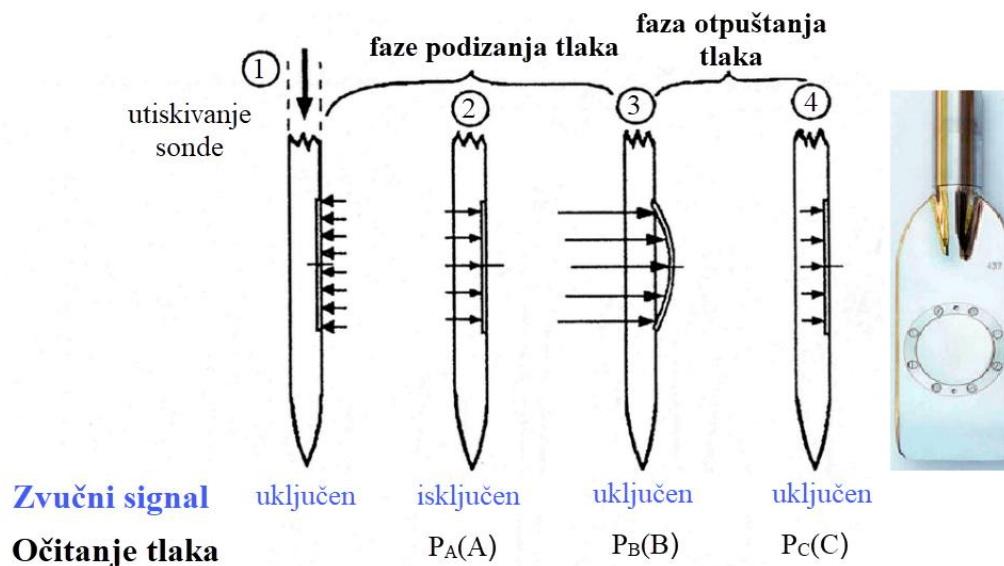
Glavni dijelovi opreme dilatometarskog pokusa su sonda, uređaji za utiskivanje i kontrolna jedinica (slika 5.6). Dilatometarska sonda izrađena je od čelika visoke čvrstoće, a sastoji se od tlačne cijevi s električnim vodičem, kontrolne jedinice za mjerenje i boce s dušikom. Membrana promjena oko 60 mm nalazi se na sondi. Cijev je preko žice povezana s audio alarmom u mjernoj jedinici koji obavještava o specifičnim tlakovima [24].



Slika 5.6. Oprema za dilatometarsko istraživanje [25]

Nakon utiskivanja sonde u tlo do predviđene dubine, istraživanja se provode svakih 200 mm. Kod svakog istraživanja mjere se tlakovi koji odgovaraju deformaciji membrane u tom položaju. Tlak koji je potreban da membrana dođe u ravnotežni položaj tj. u položaj kada pomak iznosi 0 mm, predstavlja očitavanje A (p_A). Tlak kod kojeg se membrana deformira za 1,1 mm predstavlja očitavanje B (p_B), a C očitavanje odgovara tlaku pri kojem se membrana natrag vrati u ravnotežni položaj (p_C). Očitavanja A i B moraju se provesti 15 - 30 s nakon početka istraživanja. Slika 5.7. prikazuje četiri mjerna koraka kojima se provodi dilatometarsko istraživanje.

Očitavanja A, B i C moraju se korigirati za efekt krutosti membrane izmjereni kroz postupak kalibracije membrane. Nakon korekcije dobivaju se tlak podizanja p_0 i tlak ekspanzije p_1 [26], [27].



Slika 5.7. Koraci dilatometarskog mjerenja [26]

5.2.2. Mjerni parametri i interpretacija

Kombinacijom dilatometarskih tlakova p_0 i p_1 , vrijednosti in-situ tlaka porne vode u_0 i efektivne vrijednosti vertikalnih naprezanja σ'_{v0} , dobivaju se vrijednosti indeksa materijala I_D , indeksa horizontalnog naprezanja K_d i dilatometarskog modula E_D (parametri dobiveni sondiranjem). Primjenom indeksa materijala I_D provodi se klasifikacija tla (tablica 5.3.).

Tablica 5.3. Klasifikacija tla na temelju indeksa materijala I_D [27]

Vrsta tla / podskupina	Indeks materijala I_D
glinoviti materijali	$I_D < 0,6$
prašinate gline	$0,35 < I_D < 0,6$
prahoviti materijali	$0,6 < I_D < 1,8$
glinoviti prah	$0,6 < I_D < 0,9$
pjeskoviti prah	$1,2 < I_D < 1,8$
pjeskoviti materijali	$I_D > 1,8$
prašnasti pijesci	$1,8 < I_D < 3,3$

5.2.2.1. Nedrenirana čvrstoća

Za određivanje nedrenirane posmične čvrstoće c_U glina bez cementacije, odnosno za materijale za koje rezultati DMT-a pokazuju indeks materijala $I_D < 0,8$, može se koristiti izraz 5.7. [28].

$$c_U = 0,22 \cdot \sigma'_{v0} \cdot (0,5 K_d)^{1,25} \quad (5.7.)$$

5.2.2.2. Indeks horizontalnog naprezanja

Indeks horizontalnog naprezanja K_d povezan je s in-situ horizontalnim naprezanjem tla. Kod klizišta ukazuje na pregnječeni sloj koji odgovara kliznoj plohi, pri čemu je vrijednosti $K_d = 1,8 - 2$. Indeks K_d je uvijek veći od K_0 (koeficijent bočnog mirnog tlaka) zbog poremećaja tla tijekom istraživanja. Slika 5.8. prikazuje primjer detektiranja klizne plohe po dubini. Na dubini na kojoj je došlo do klizanja tla vrijednost indeksa K_d iznosi 2, kao što je prikazano na profilu na donjoj desnoj slici. Indeks K_d računa se prema izrazu 5.8. [28].

$$K_d = \frac{(p_0 - u_0)}{\sigma'_{v0}} \quad (5.8.)$$

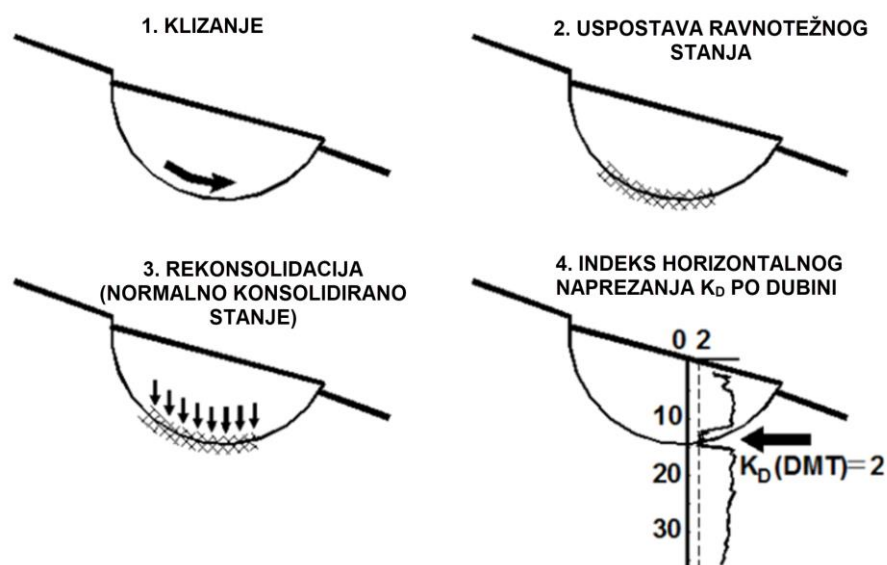
Oznake u jednadžbi su sljedeće:

K_d - indeks horizontalnog naprezanja [-]

p_0 - tlak podizanja [kPa]

u_0 - tlak porne vode [kPa]

σ'_{v0} - vertikalno efektivno in-situ naprezanje [kPa]



Slika 5.8. Detektiranje klizne plohe na temelju indeksa K_d [29]

5.2.2.3. Parametar bočnog mirnog tlaka

Izraz za korelaciju indeksa horizontalnog naprezanja s parametrom bočnog mirnog tlaka predložio je Marchetti (2001) (izraz 5.9.) [30].

$$K_0 = \left(\frac{K_d}{1,5} \right)^{0,47} - 0,6 \quad (5.9.)$$

U cementiranim prekonsolidiranim glinama izračunati K_0 može imati veću vrijednost jer cementacija utječe na parametar K_d . U literaturi se mogu naći različita rješenja za određivanje parametra K_0 , no predloženi izraz zadovoljava, a posebno za činjenicu o problemima vezanim uz mjerenje bočnog pritiska tla [30].

5.2.2.4. Koeficijent prekonsolidacije

Od početka primjene dilatometarskog pokusa uočena je sličnost indeksa horizontalnog naprezanja K_d sa koeficijentom prekonsolidacije OCR [31]. Kod normalno konsolidiranih materija vrijednost $K_d = 2$, odgovara vrijednosti $OCR = 1$. Navedena korelacija pokazuje da je pregnječeni materijal unutar klizne plohe izgubio svaki trag o starenju, strukturiranju ili cementaciji. Porast indeksa K_d ukazuje na prisutnost nekog oblika starenja ili cementacije. Korelacija između K_d i OCR definirana je izrazom 5.10.

$$OCR = (0,5 \cdot K_d)^{1,56} \quad (5.10.)$$

Ne postoji jedinstven izraz za korelaciju $OCR - K_d$ koji bi vrijedio za sve gline različitog stupnja cementacije. Pristupi ovise o strukturi tla, npr. jako strukturirana tla traže posebne pristupe za interpretaciju mehaničkih karakteristika [28], [29].

5.2.2.5. Modul stišljivosti

Modul stišljivosti određuje se prema izrazu 5.11.

$$M = R_M \cdot E_D \quad (5.11.)$$

Parametar R_M ovisi o rasponima indeksa materijala I_D (tablica 5.4.), odnosno o vrsti tla [27].

5.2.3. Dilatometarsko sondiranje na klizištima Bedekovčina i Kravarsko

Na području klizišta u Bedekovčini izvedena su dva DMT sondiranja tipa Marchetti, položajno prikazana na slici 5.1. Tijekom istraživanja klizišta u Kravarskom na svakom od četiri klizišta izvedeno je po jedno DMT sondiranje (slika 5.2.). Interpretacija izmjerenih podataka dobivenih DMT sondiranje provedena je programom SDMT Elab proizvođača Studio Prof. Marchetti.

Tablica 5.4. Uvjeti za određivanje parametra R_M [27]

Raspon indeksa materijala	Parametar R_M	Napomena
$I_D < 0,6$	$R_M = 0,14 + 2,36 \cdot \log K_D$	glinovita tla
$I_D > 3$	$R_M = 0,50 + 2,0 \cdot \log K_D$	čisti pijesci
$0,6 < I_D < 3$	$R_M = R_{Mo}(0,5 - R_{Mo}) \cdot \log K_D$ $R_{Mo} = 0,14 + 0,15 \cdot (I_D - 0,6)$	prahovi i prašinski pijesci
$K_D > 10$	$R_M = 0,32 + 2,18 \cdot \log K_D$	
$R_M < 0,85$	$R_M = 0,85$	

5.3. Inklinometarska opažanja

Inklinometar (engl. inclinometer) je uređaj za mjerenje pomaka normale na os cijevi kroz koju prolazi. Uređaj ima ugrađeni senzor koji radi na principu mjerenja otklona inklinometarske cijevi od vertikale. Inklinometarska plastična cijev ugrađuje se u izvedenu bušotinu. Kako bi se inklinometarska cijev učvrstila, prostor između cijevi i stijenke bušotine ispunjava se cementno-bentonitnom masom [32]. Inklinometrima određuje se veličina, brzina, smjer i dubina klizanja. Navedeno je od velike važnosti za razumijevanje uzroka, ponašanja i sanacije klizišta.

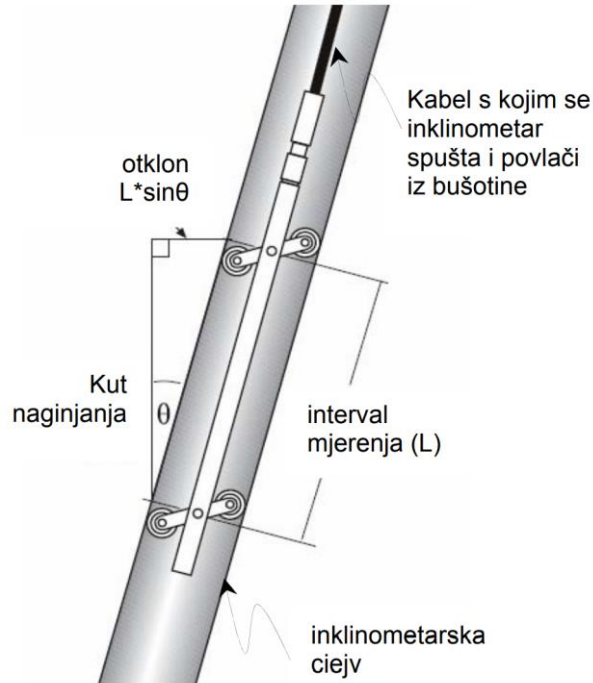
Mjerna oprema inklinometra sastoji se od inklinometarske cijevi i mjernog sustava (inklinometarske sonde). Inklinometarska cijev sadrži četiri okomita utora u svojoj unutrašnjosti koji imaju ulogu vodilice za sondu u svrhu ispitivanja otklona inklinometarske cijevi (slika 5.9.). Da bi se inklinometarska sonda održala u središtu tijekom mjerenja, koriste se ovješeni kotačići [33].

Rezultati inklinometarskih opažanja prikazuju se u obliku dva dijagrama, kumulativnih i inkrementalnih pomaka. Dijagram kumulativnih pomaka prikazuje ukupne (pribrojene) pomake izmjerene kod svakog konsekventnog mjerenja u odnosu na referentno (nulto mjerenje). Inkrementalni dijagram prikazuje pojedinačne pomake na određenoj dubini, koji se koriste u svrhu identificiranja dubine na kojima se pojavljuju pomaci (klizne plohe).

5.3.1. Mjerenje horizontalnih pomaka inlinometrima na klizištu Bedekovčina i Kravarsko

U svrhu opažanja horizontalnih pomaka u fazi istražnih radova i dugotrajnog opažanja pomaka na klizištu groblja u Bedekovčini, u pojedine istražne bušotine

ugrađene su inklinometarske cijevi. U ovom radu analizirana su 2 inklinometra, inklinometar 1 i inklinometar 2, položajno prikazana na slici 5.1. Slika 5.10. prikazuje inklinometar 1 koji je ugrađen u bušotinu na području klizišta starog groblja u Bedekovčini.



Slika 5.9. Princip mjerenja inklinometrom [32]



Slika 5.10. Ugrađeni inklinometar 1 na području starog groblja u Bedekovčini

Na klizištu Kravarsko analizirana su četiri ugrađena inklinometra prikazana na situacijskom planu istraživanja na slici 5.2. Na svakom manjem klizištu ugrađeni je po jedan inklinometar (K8, K9, K10 i K11).

Na oba klizišta korištene su ABS inklinometarske cijevi proizvođača SISGEO S.rl., Milano, tipski model: 0S131006000 ABS, vanjskog promjera 71,0 mm, a unutarnjeg promjera 60,0 mm.

6. PROGNOZNI PROFILI IZ REZULTATA IN-SITU SONDI

U ovom poglavlju priloženi su rezultati DMT i CPTu sondiranja. Izrađeni su prognozni profili odabranih parametara za detekciju klizne plohe. Kod klizišta Bedekovčina rezultati pojedinog parametra po dubini za obje statičke sonde priloženi su na istom profilu. Rezultati DMT sonde za pojedine parametre kod klizišta Kravarsko priloženi su na zasebnim profilima (CPTu sondiranje se nije izvodilo). Na temelju rezultata izdvojene su zone potencijalnih kliznih ploha.

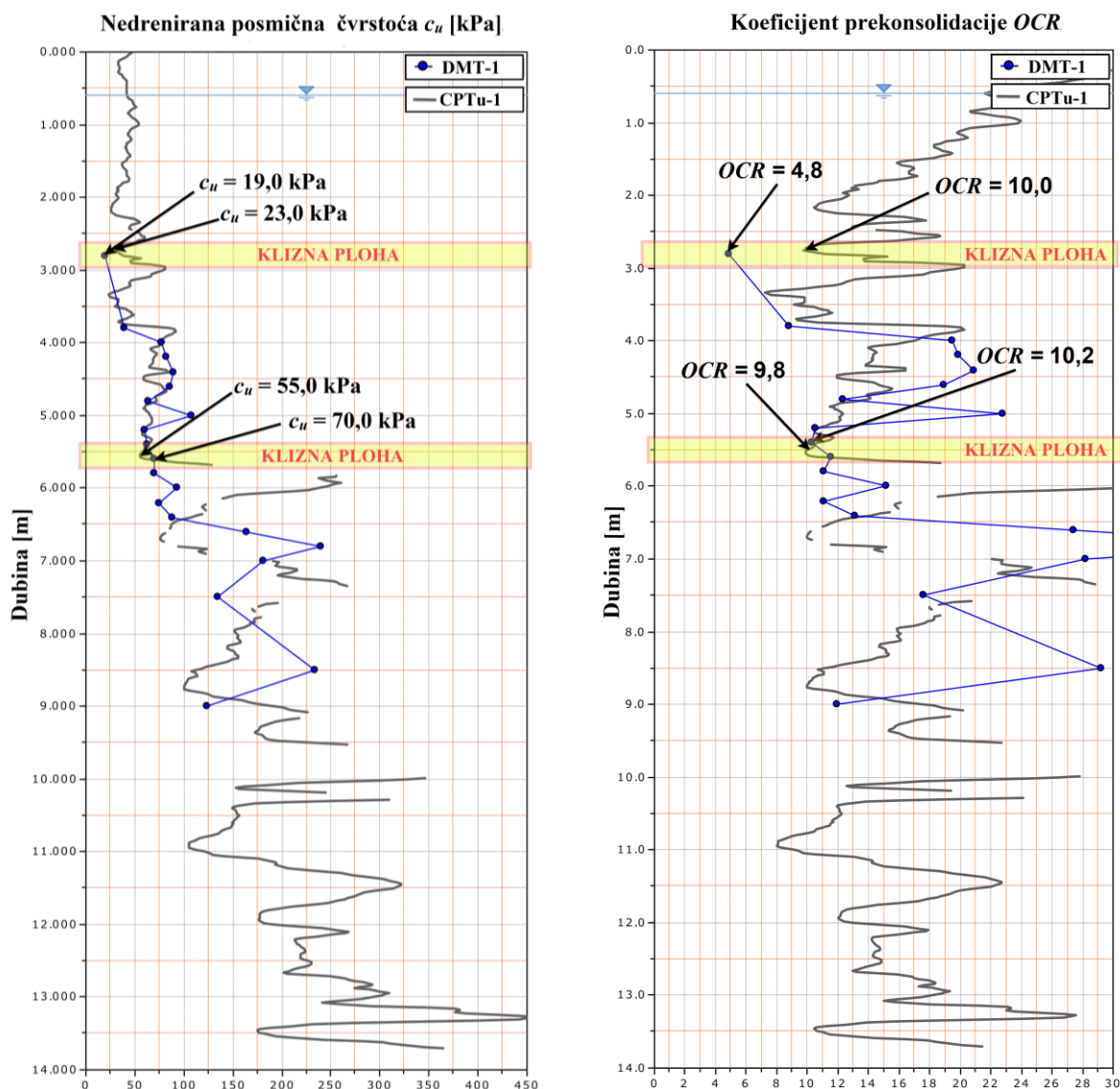
6.1. Klizište Bedekovčina

Slika 6.1. prikazuje vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće c_U i koeficijenta prekonsolidacije OCR po dubini kod prve analizirane grupe istražnog područja (DMT-1 i CPTu-1). Detektirane su dvije potencijalne klizne plohe, na dubinama 2,8 m i 5,6 m. Vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 2,8 m kod DMT-1 sonde iznosi 19,0 kPa, a kod CPTu-1 sonde 23,0 kPa. Na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 5,6 m nedrenirana posmična čvrstoća detektirana DMT-1 sondom ima vrijednost 70,0 kPa, a CPTu-1 sondom 55,0 kPa. Vrijednost OCR -a na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 2,8 m detektirana DMT-1 sondom iznosi 4,8, a CPTu-1 sondom 10,0. Vrijednost OCR -a na potencijalnoj kliznoj plohi od 5,6 m kod DMT-1 sonde iznosi 10,2, a kod CPTu-1 sonde 9,8.

Na slici 6.2. prikazane su vrijednosti modula stišljivosti M i indeksa horizontalnog naprezanja K_d po dubini prve analizirane grupe istražnog područja (DMT-1 i CPTu-1). Modul stišljivosti na kliznoj plohi od 2,8 m kod DMT-1 sonde iznosi 8,4 MPa, a kod CPT-u 1 sonde 8,0 MPa. Na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 5,6 m, vrijednost modula stišljivosti detektiranog DMT-1 sondom ima vrijednost 23,0 MPa, a CPTu-1 sondom 13,0 MPa. Indeks horizontalnog naprezanja na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 2,8 m iznosi 2,4, a na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 5,6 m iznosi 2,2.

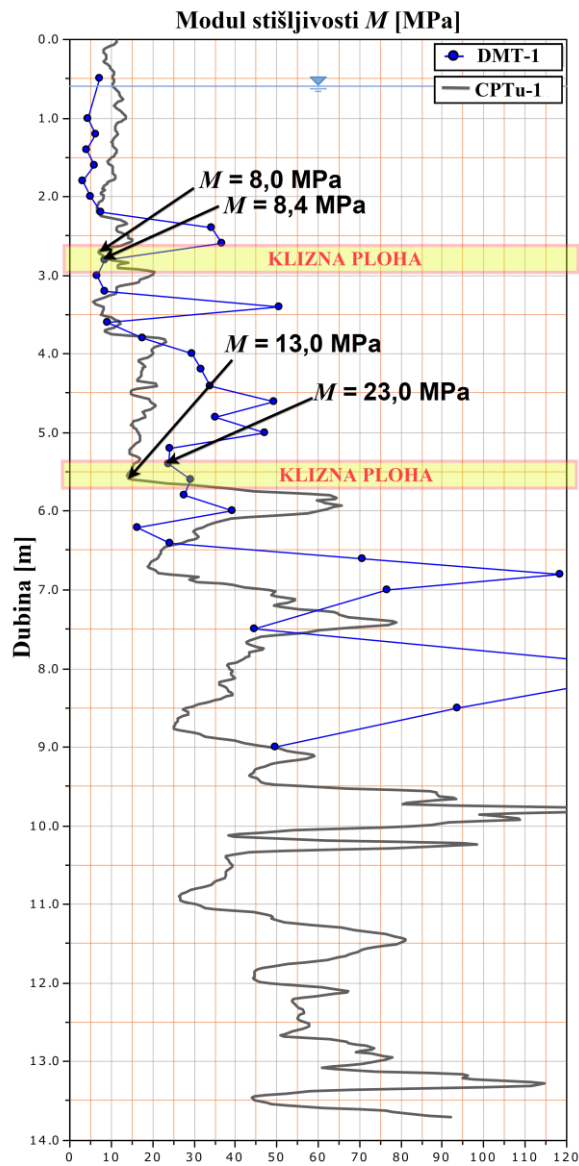
Vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće c_U i koeficijenta prekonsolidacije OCR po dubini kod druge analizirane grupe istražnog područja (DMT-2 i CPTu-2) prikazane su na slici 6.3. Detektirane su dvije potencijalne klizne plohe (dubina 6,0 i 8,2 m). Vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 6,0 m kod DMT-2 sonde iznosi 25,0 kPa, a kod CPTu-2 sonde 47,0 kPa. Na potencijalnoj kliznoj plohi od 8,2 m vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće detektirane DMT-2 sondom je 28,0 kPa, a CPTu-2 sondom 26,0 kPa. Vrijednost OCR -a na potencijalnoj

kliznoj plohi dubine 6,0 m detektirane DMT-2 sondom iznosi 3,1, a CPTu-2 sondom 7,5. OCR na potencijalnoj kliznoj plohi od 8,2 m kod DMT-1 sonde iznosi 2,5, a kod CPTu-1 sonde 3,5.

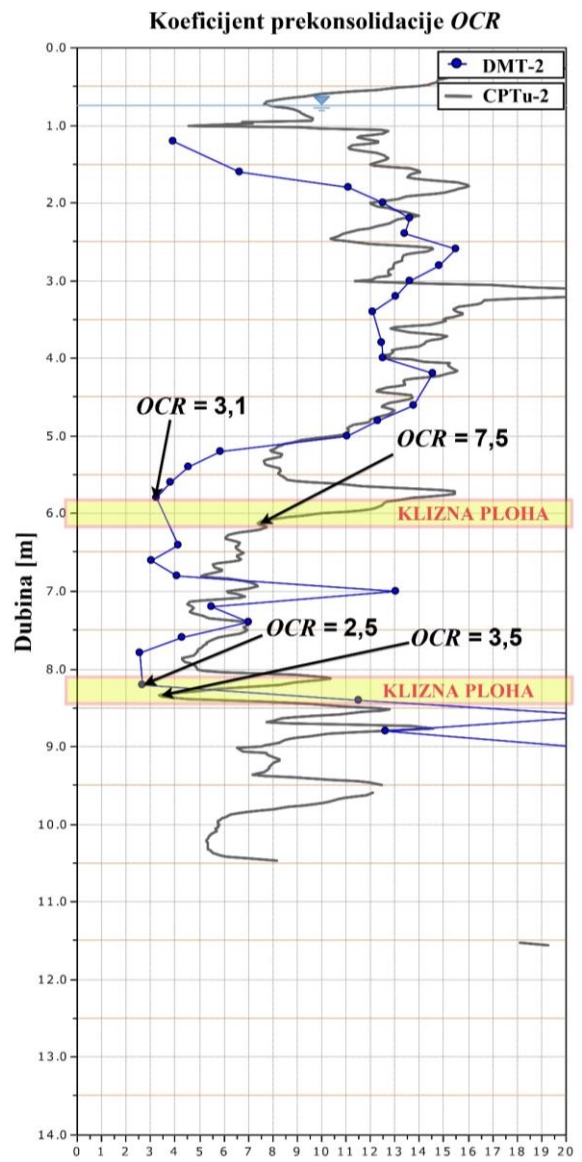
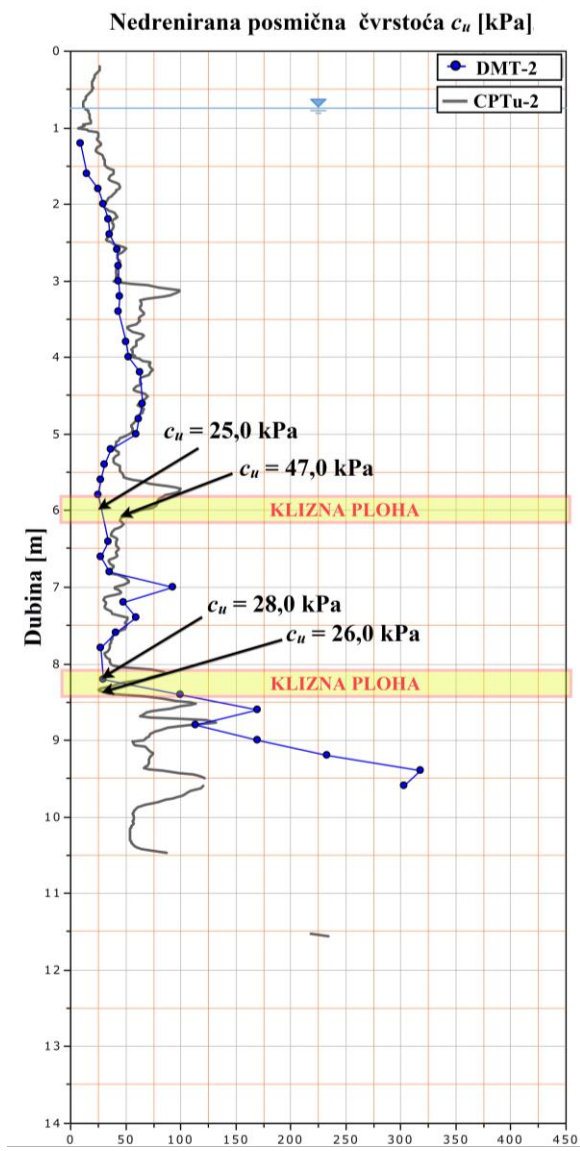


Slika 6.1. Dijagrami rezultata grupe 1 istraživanog područja - c_u i OCR

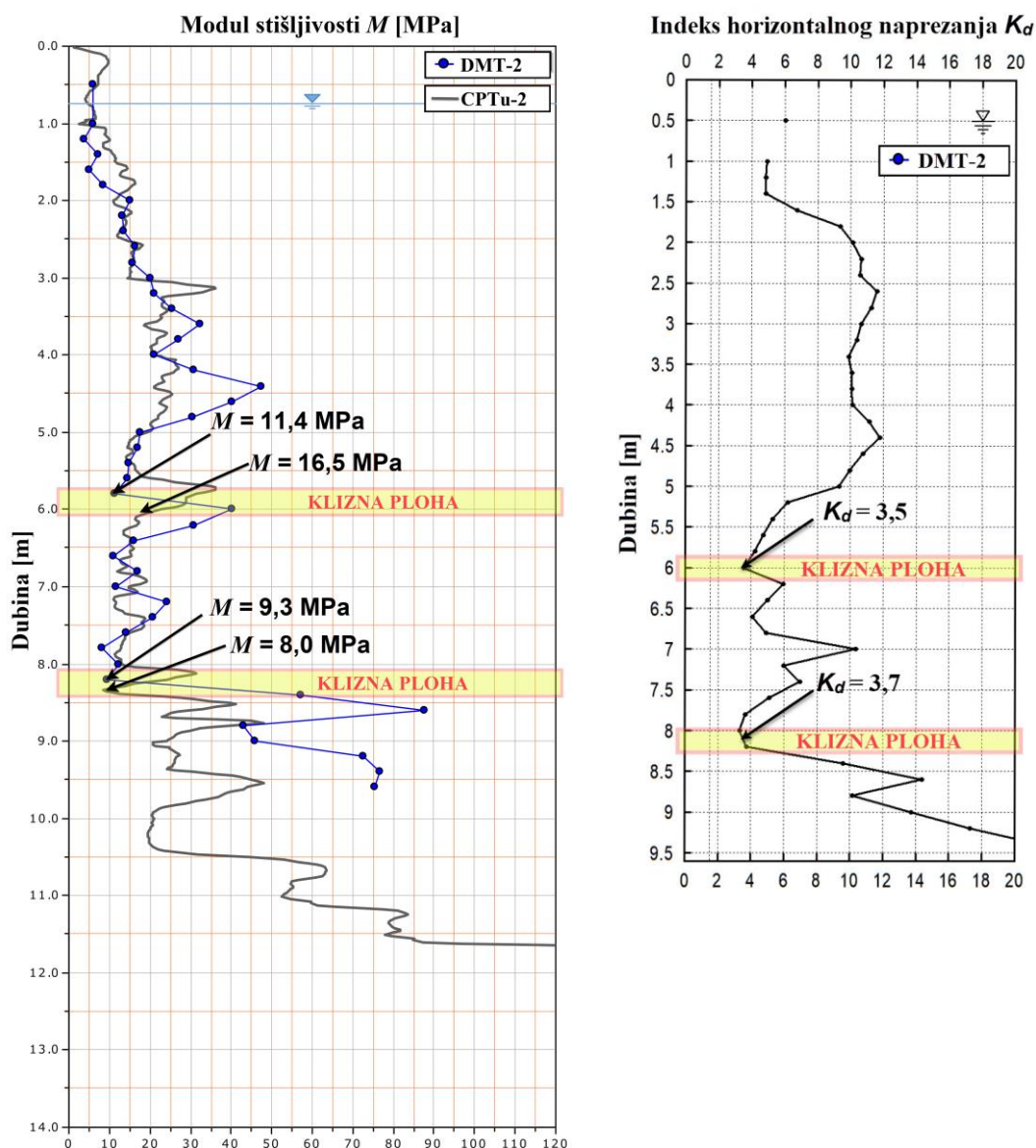
Slika 6.4. prikazuje vrijednosti modula stišljivosti M i indeksa horizontalnog naprezanja K_d po dubini kod druge analizirane grupe istražnog područja (DMT-2 i CPTu-2). Vrijednost modula stišljivosti na kliznoj plohi dubine 6,0 m kod DMT-2 sonde iznosi 11,4 MPa, a kod CPT-u 1 sonde 16,5 MPa. Na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 5,6 m, vrijednost modula stišljivosti detektiranog DMT-2 sondom je 9,3 MPa, a CPTu-2 sondom 8,0 MPa. Indeks horizontalnog naprezanja na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 6,0 m iznosi 3,5, a na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 8,2 m iznosi 3,7.



Slika 6.2. Dijagrami rezultata grupe 1 istraživanog područja - M i K_d



Slika 6.3. Dijagrami rezultata grupe 2 istraživanog područja - c_u i OCR



Slika 6.4. Dijagrami rezultata grupe 2 istraživanog područja - M i K_d

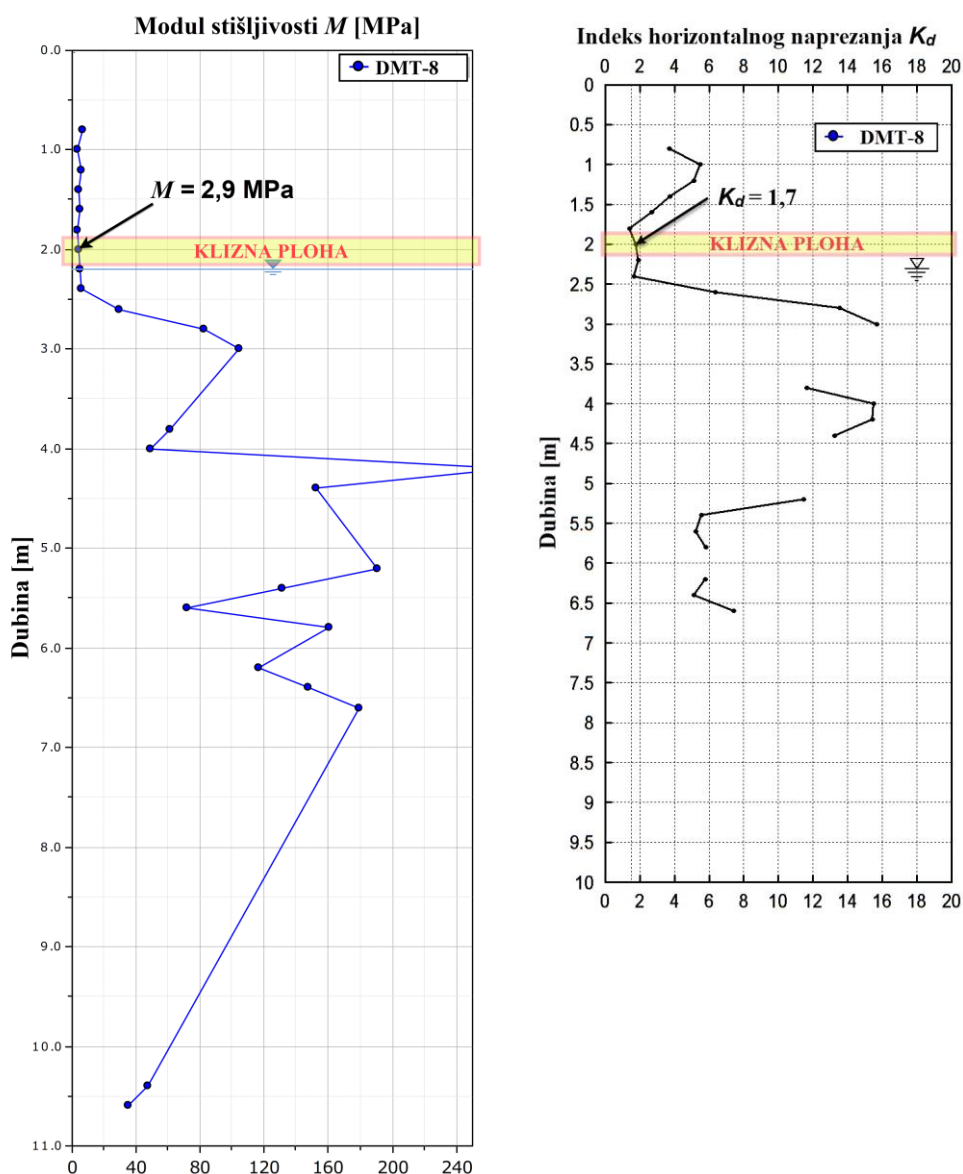
6.2. Klizište Kravarsko

Slika 6.5. prikazuje vrijednosti modula stišljivosti M i indeksa horizontalnog naprezanja K_d DMT-8 sonde po dubini treće analizirane grupe istražnog područja (KK8). Potencijalna klizna ploha nalazi se na dubini 2,0 m. Vrijednost modula stišljivosti potencijalne klizne plohe iznosi 2,9 MPa, a indeksa horizontalnog naprezanja 1,7.

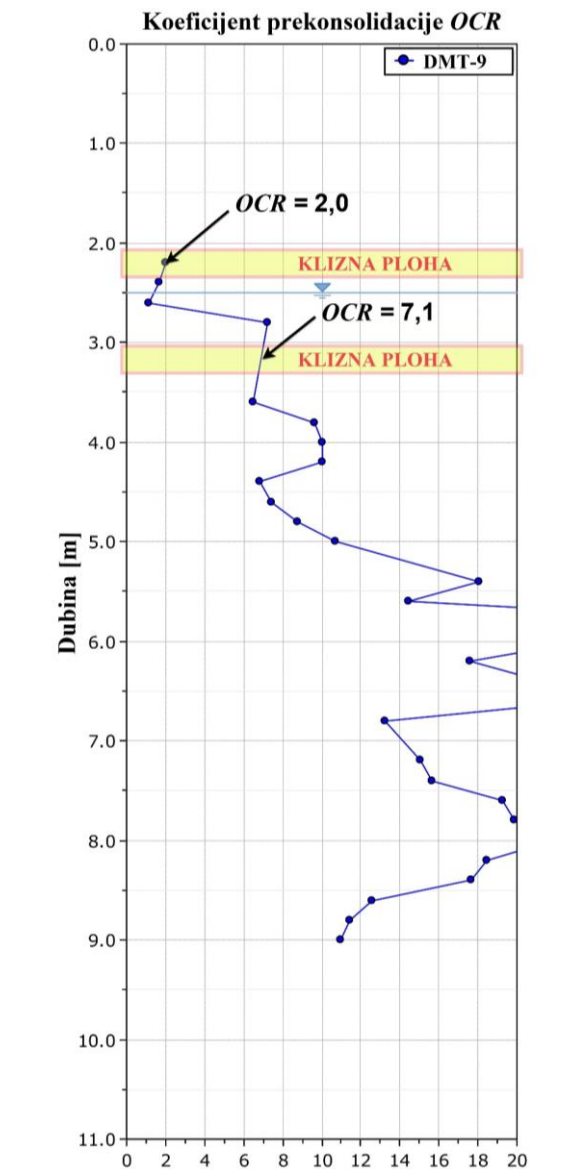
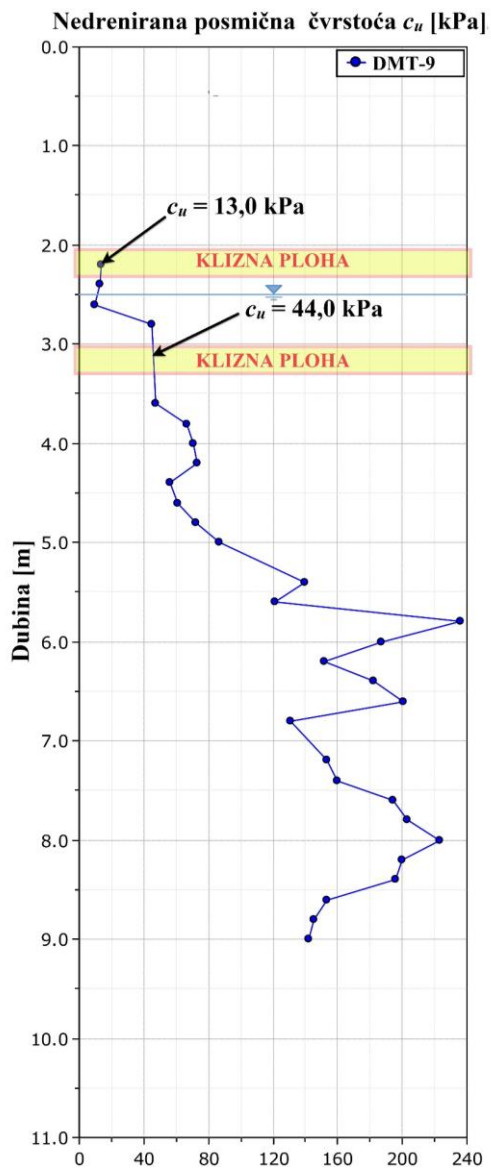
Slika 6.6. prikazuje vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće c_U i koeficijenta prekonsolidacije OCR DMT-9 sonde po dubini za četvrtu analiziranu grupu istražnog područja (KK9). Detektirane su dvije potencijalne klizne plohe (dubina 2,2 i 3,2 m). Nedrenirana posmična čvrstoća na potencijalnoj kliznoj plohi od 2,2 m iznosi 13,0 kPa, a na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 3,2 m iznosi 44,0 kPa. Vrijednost OCR -a na

potencijalnoj kliznoj plohi od 2,2 m iznosi 2,0, a potencijalne klizne plohe na dubini 3,2 m iznosi 7,1.

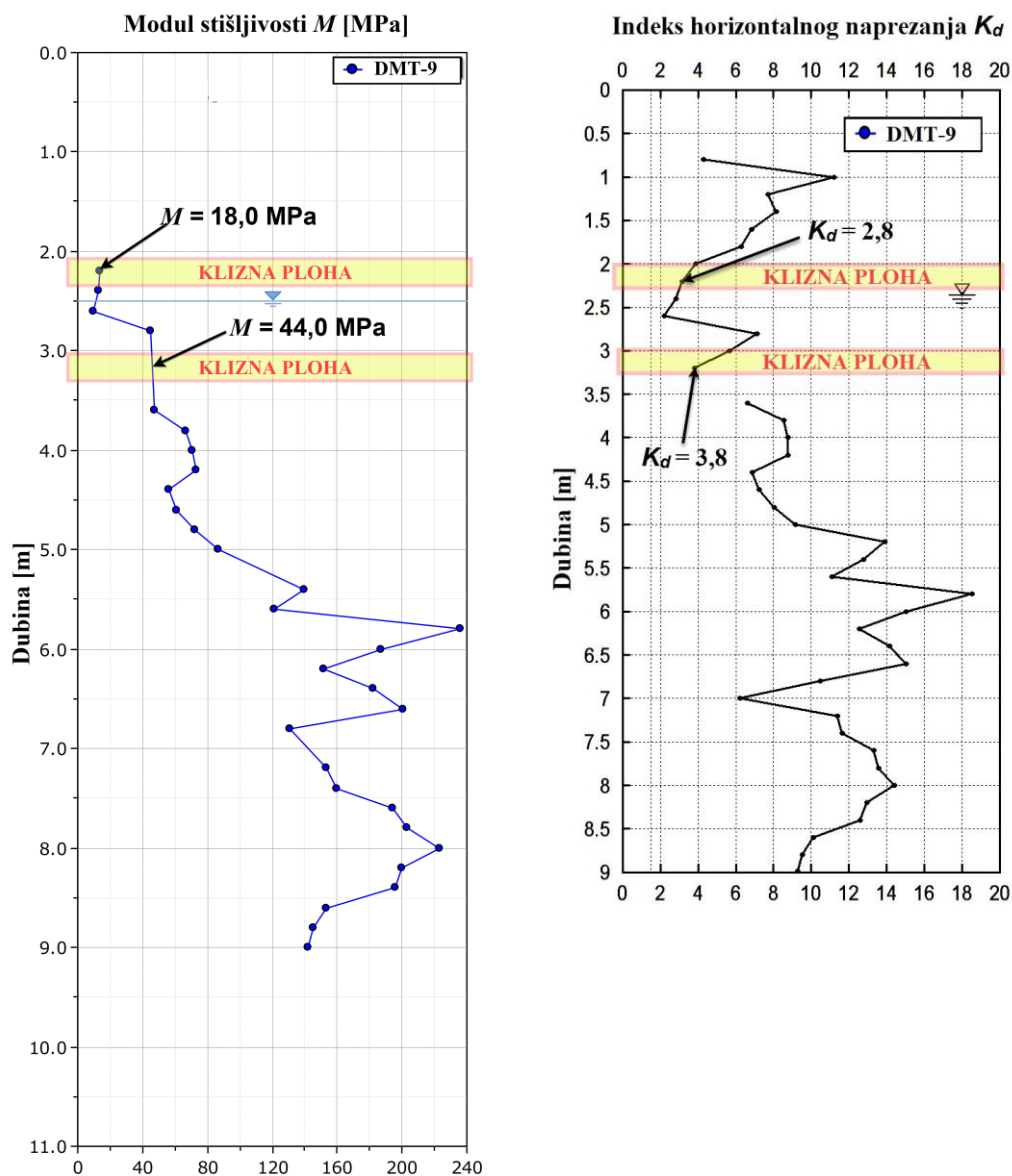
Vrijednosti modula stišljivosti M i indeksa horizontalnog naprezanja K_d DMT-9 sonde po dubini četvrte analizirane grupe istražnog područja (KK9) prikazane su na slici 6.7. Modul stišljivosti potencijalne klizne plohe na dubini 2,2 m ima vrijednost 18,0 MPa, a potencijalne klizne plohe na dubini 3,2 m iznosi 44,0 MPa. Vrijednost indeksa horizontalnog naprezanja potencijalne klizne plohe na dubini 2,2 m iznosi 2,8, a potencijalne klizne plohe na dubini 3,2 m je 3,8.



Slika 6.5. Dijagrami rezultata grupe 3 istraživanog područja - M i K_d



Slika 6.6. Dijagrami rezultata grupe 4 istraživanog područja - c_U i OCR

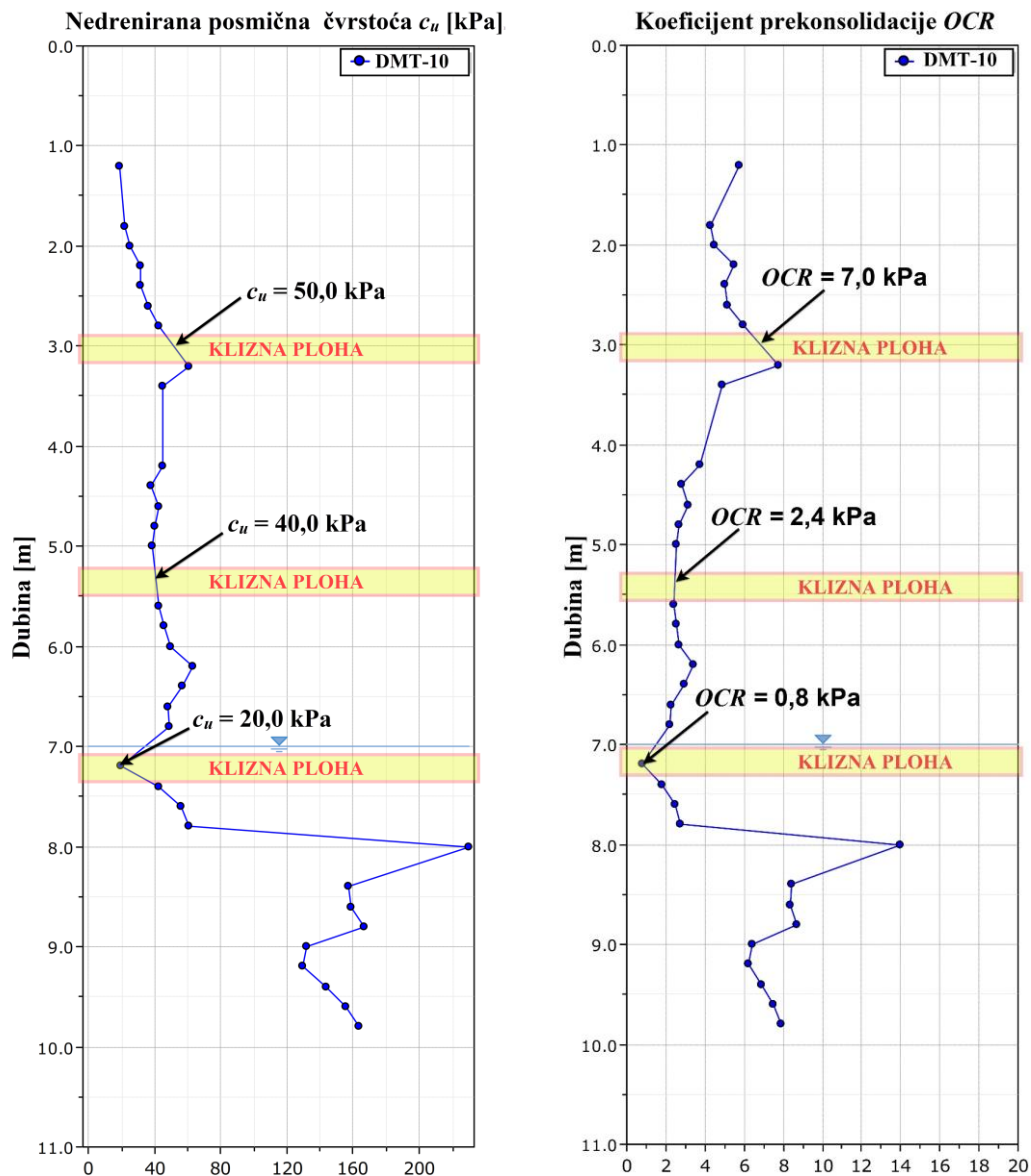


Slika 6.7. Dijagrami rezultata grupe 4 istraživanog područja - M i K_d

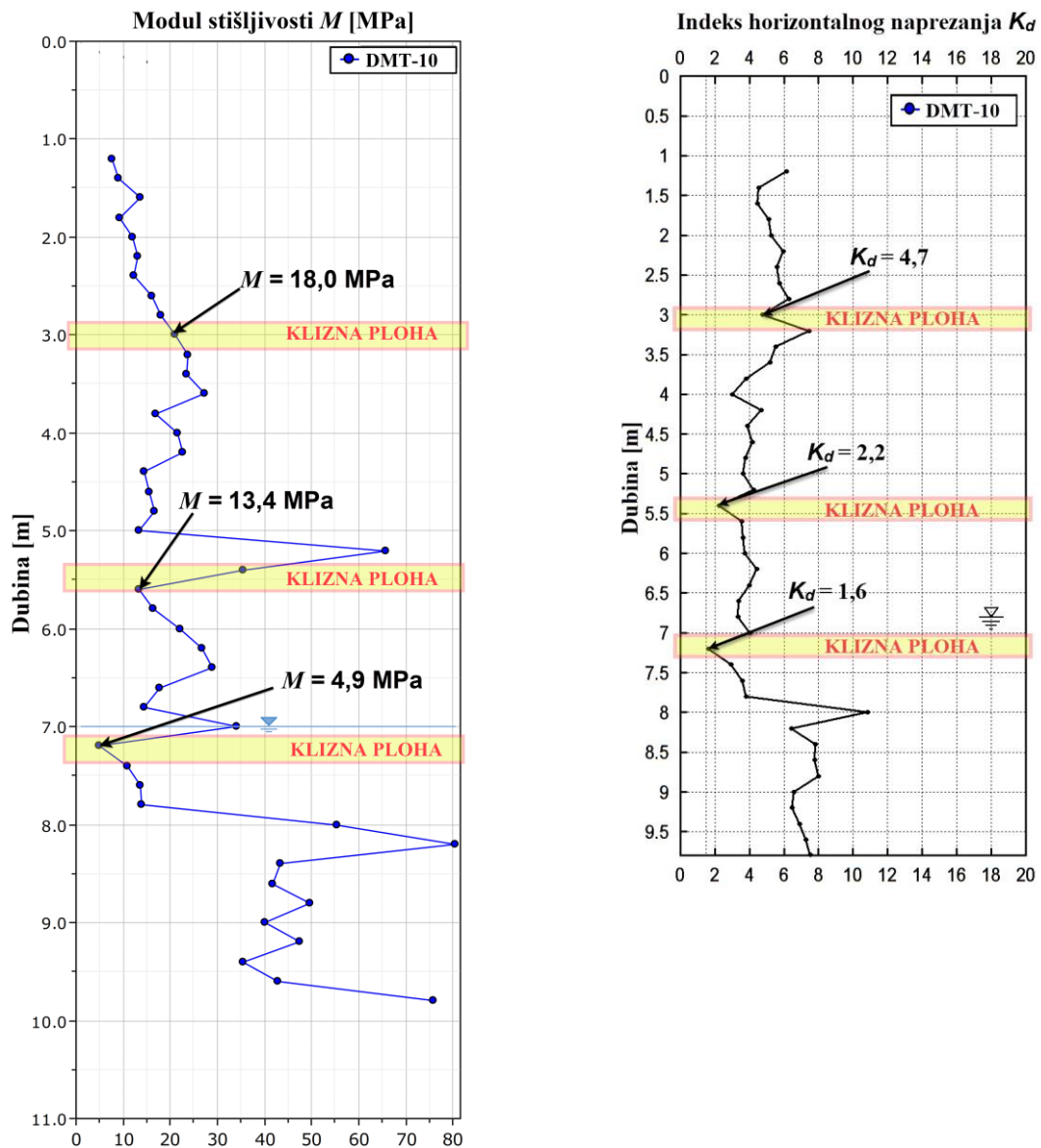
Vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće c_U i koeficijenta prekonsolidacije OCR DMT-10 sonde po dubini za petu analiziranu grupu istražnog područja (KK10) prikazane su na slici 6.8. Detektirane su tri potencijalne klizne plohe na dubinama 3,0 m, 5,4 m i 7,2 m. Nedrenirana posmična čvrstoća na potencijalnoj kliznoj plohi od 3,0 m iznosi 50,0 kPa, potencijalne klizne plohe na dubini 5,4 m je 40,0 kPa, a potencijalne klizne plohe na dubini 7,2 m iznosi 20,0 kPa. Vrijednost OCR -a na potencijalnoj kliznoj plohi od 3,0 m iznosi 7,0, na potencijalnoj kliznoj plohi dubine 5,4 m iznosi 2,4, a potencijalne klizne plohe na dubini 7,2 m je 0,8.

Vrijednosti modula stišljivosti M i indeksa horizontalnog naprezanja K_d DMT-10 sonde po dubini pete analizirane grupe istražnog područja (KK10) prikazane su na slici 6.9. Vrijednost modula stišljivosti potencijalne klizne plohe na dubini 3,0 m iznosi 18,0

MPa, potencijalne klizne plohe na dubini 5,4 m iznosi 13,4 MPa, a potencijalne klizne plohe na dubini 7,2 m je 4,9 MPa. Indeks horizontalnog naprezanja potencijalne klizne plohe na dubini 3,0 m ima vrijednost 4,7, potencijalne klizne plohe na dubini 5,4 m iznosi 2,2, a potencijalne klizne plohe na dubini 7,2 m ima vrijednost 1,6.

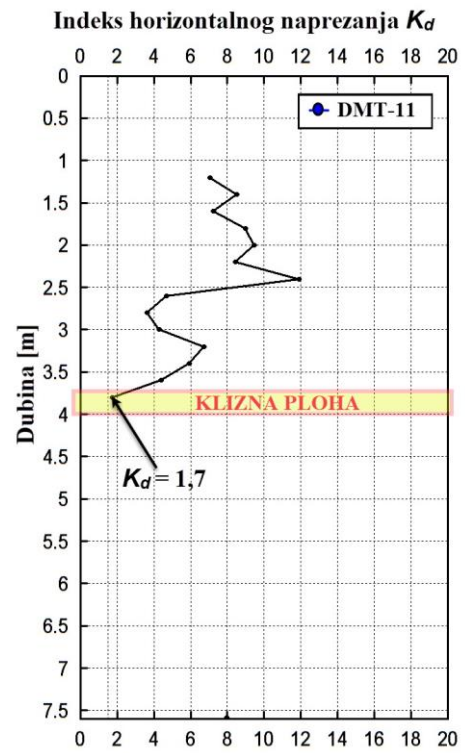
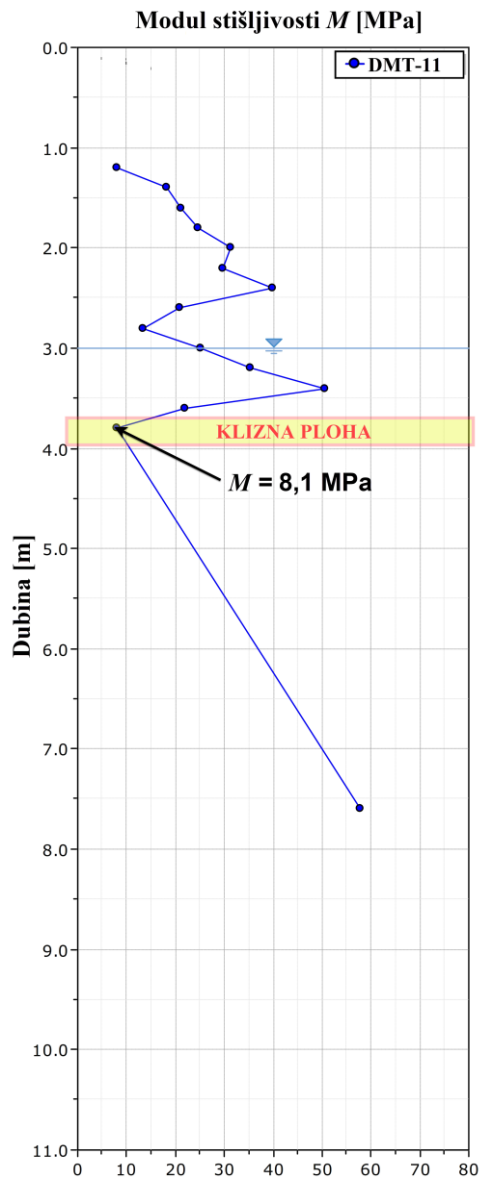


Slika 6.8. Dijagrami rezultata grupe 5 istraživanog područja - c_u i OCR



Slika 6.9. Dijagrami rezultata grupe 5 istraživanog područja - M i K_d

Slika 6.10. prikazuje vrijednosti modula stišljivosti M i indeksa horizontalnog naprezanja K_d DMT-11 sonde po dubini šeste analizirane grupe istražnog područja (KK11). Potencijalna klizna ploha nalazi se na dubini 3,8 m. Vrijednost modula stišljivosti potencijalne klizne plohe iznosi 8,1 MPa, a indeksa horizontalnog naprezanja 1,7.



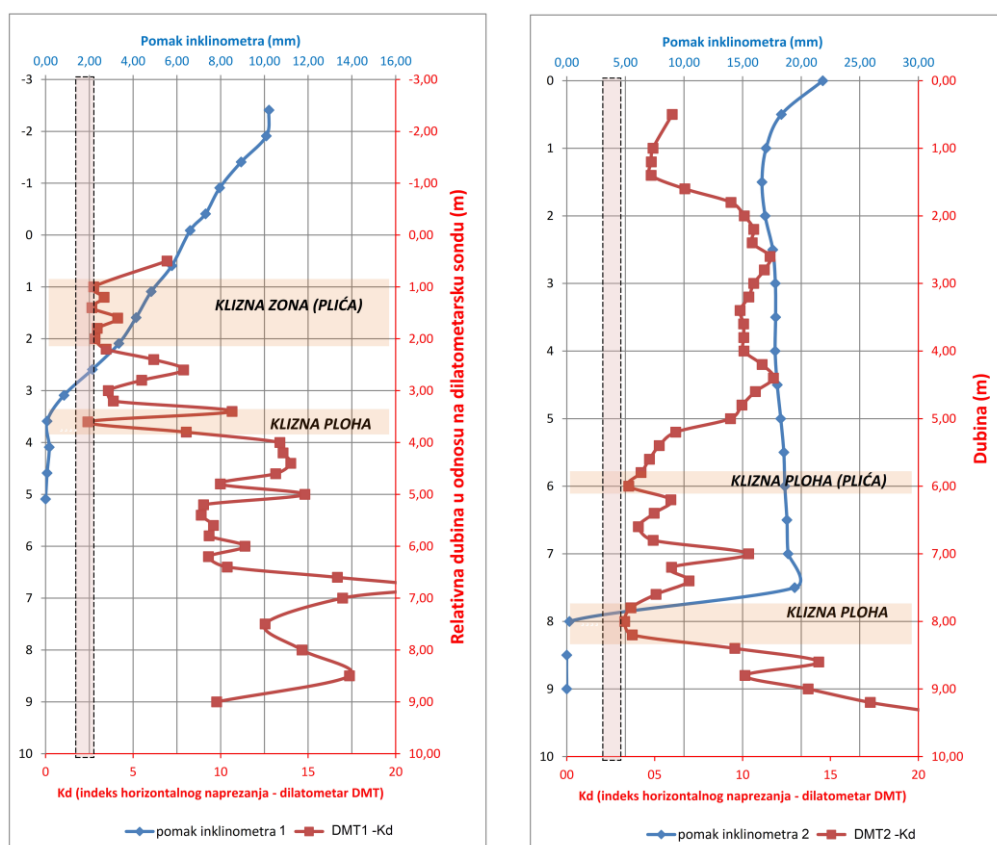
Slika 6.10. Dijagrami rezultata grupe 6 istraživanog područja - M i K_d

7. VERIFIKACIJA REZULTATA IN-SITU SONDI S POMACIMA NA INKLINOMETRIMA

U ovom poglavlju napravljena je usporedba i verifikacija rezultata statičkih sondi s dobivenim rezultatima horizontalnih pomaka inklinometara. Za oba klizišta priloženi su dijagrami s preklopima vrijednosti indeksa horizontalnog napreznja i horizontalnih pomaka inklinometara. Pošto se na klizištu Bedekovčina provodilo CPTu ispitivanje, napravljen je preklop dobivenih vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće statičkim sondama i rezultata inklinometara.

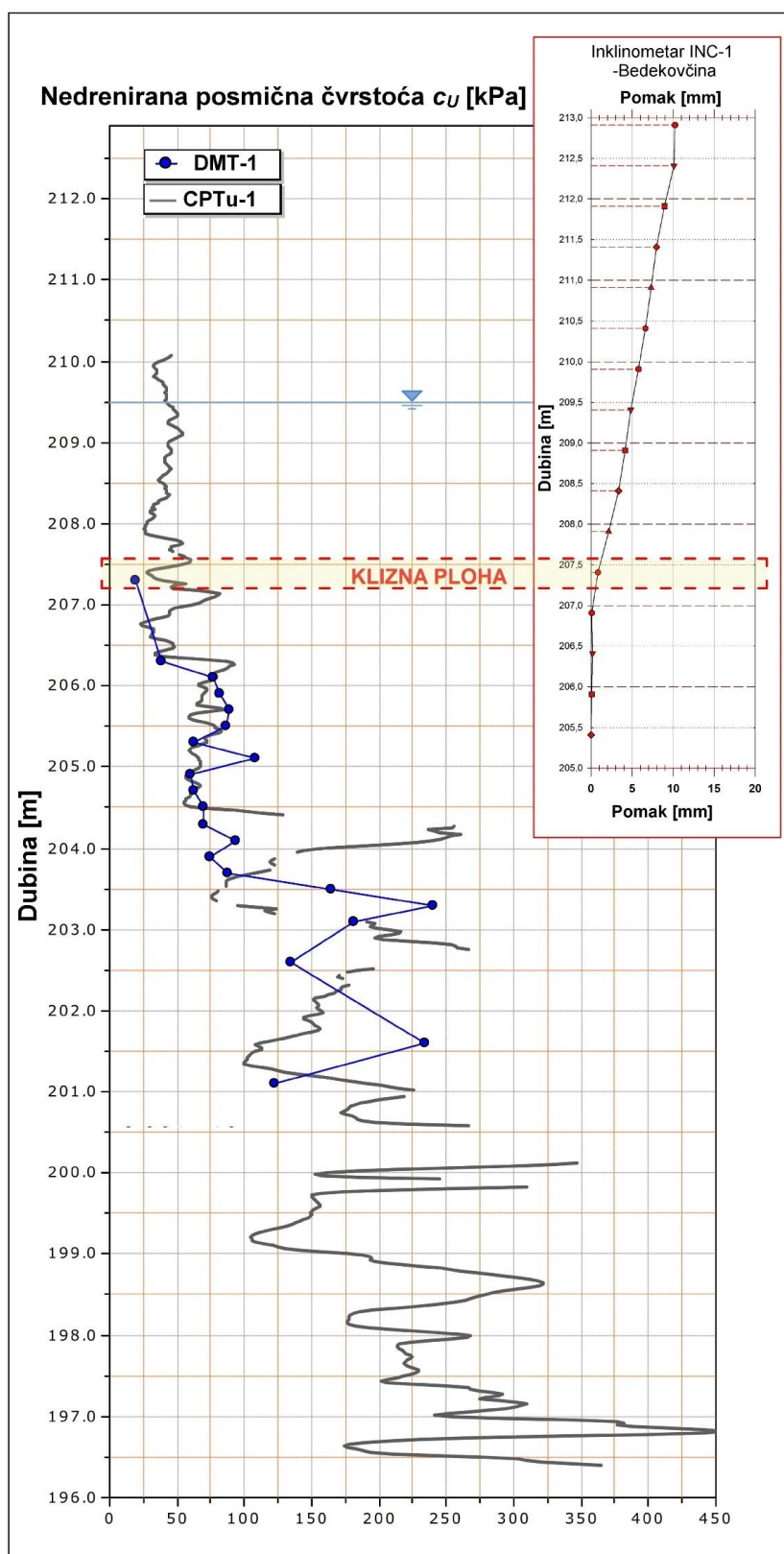
7.1. Klizište Bedekovčina

Indeks horizontalnog napreznja je dobar indikator klizne plohe. Male vrijednosti (približno 2) ukazuju na kliznu plohu. Na priloženim slikama (slike 7.1., 7.4. i 7.5.) pomaci izmjereni inklinometrima savršeno se poklapaju s malim vrijednosti indeksa horizontalnog napreznja što ukazuje na masu tla koja klizi po kliznoj plohi.

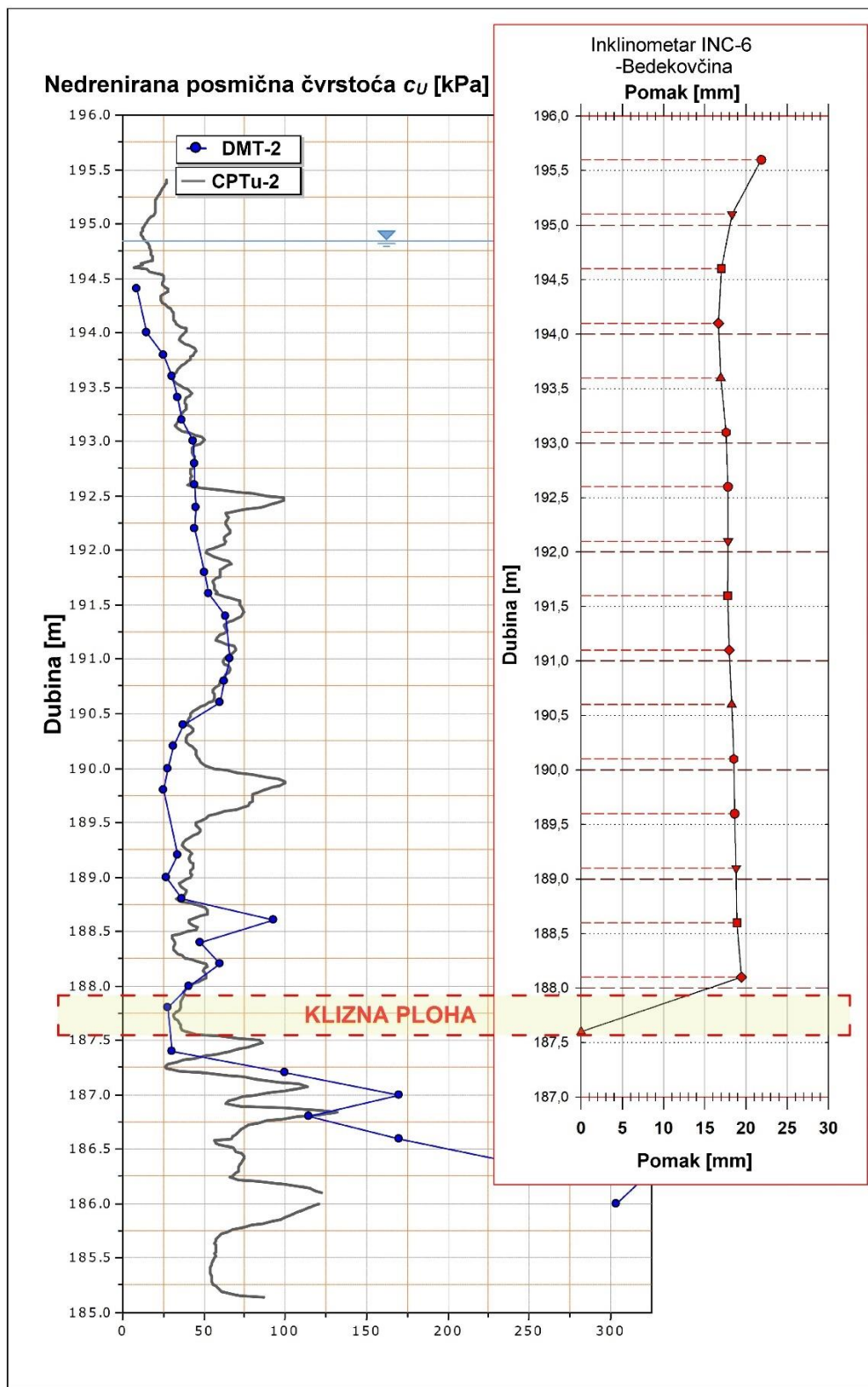


Slika 7.1. Preklop vrijednosti indeksa horizontalnog napreznja i mjerenja inklinometrima - grupa 1 istraživanog područja (lijevo) i grupa 2 istraživanog područja (desno)

Maksimalni pomak inklinometra 1 iznosi 10,0 mm, a inklinometra 2 iznosi 23,0 mm. Na slici 7.2 i 7.3. vidljivo je da male vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće detektirane DMT i CPTu sondama ukazuju na kliznu plohu.



Slika 7.2. Preklop vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće i mjerenja inklinometrima - grupa 1 istraživanog područja



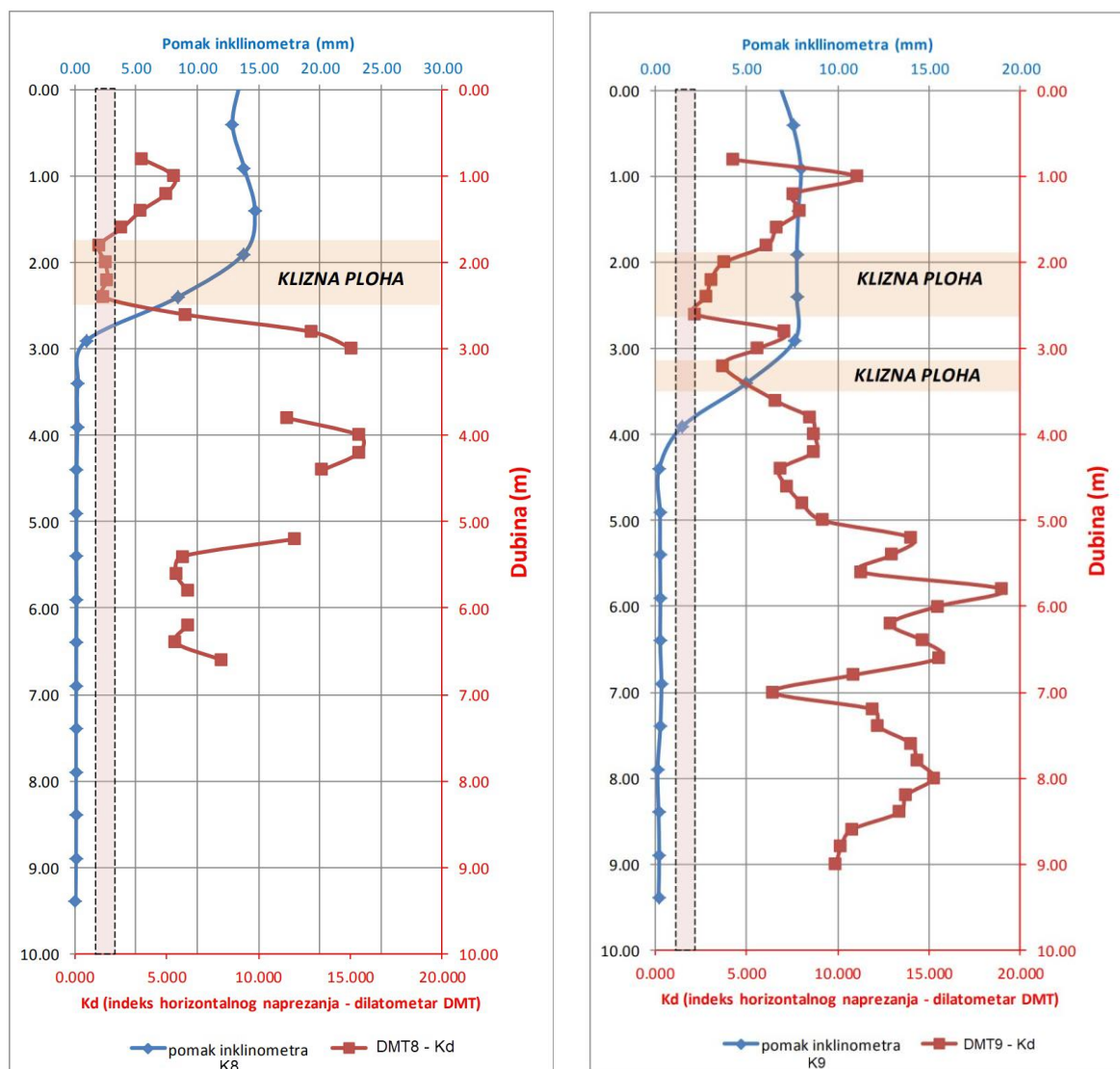
Slika 7.3. Preklop vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće i mjerenja inklinometrima - grupa 2 istraživanog područja

7.2. Klizište Kravarsko

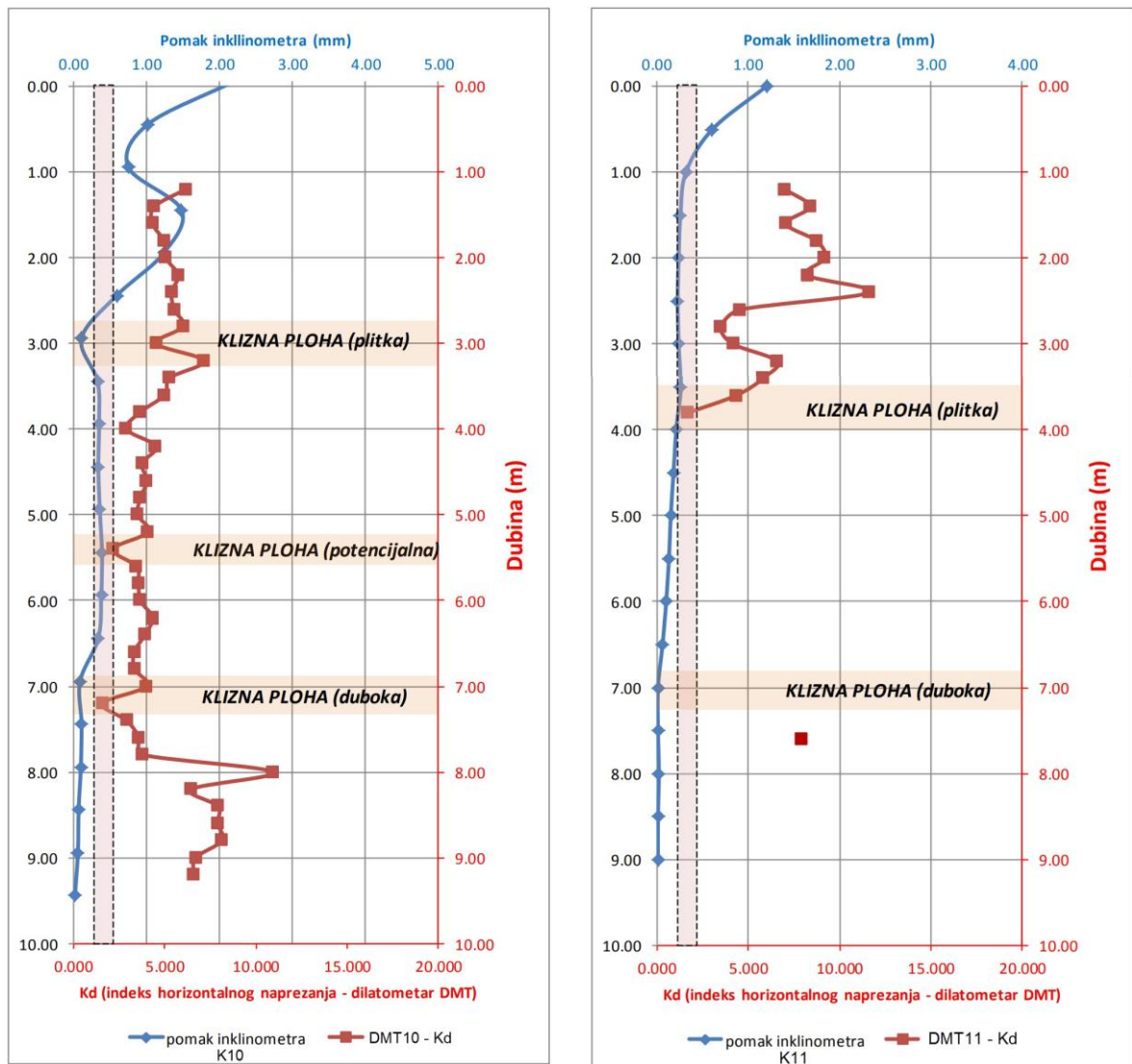
Iz slike 7.4. vidljivo je da inklinometar K8 pokazuje pomake u iznosu 13,0 mm, na dubini 2,0 m (slika lijevo), a inklinometar K9 pomak u iznosu 8,0 mm na dubini 3,20 m

(slika desno). Inklinometar K10 (slika 7.5. lijevo) pokazuje pomake manjih iznosa (1,5 i 0,5 mm) u dvije razine, na dubinama 1,5 m i 7,2 m. Inklinometar K11 također pokazuje pomake manjih iznosa (0,25 do 1,20 mm) u dvije razine, na dubinama 3,80 m i 7,0 m. Klizna ploha detektirana inklinometrom K11 na dubini 7,0 m nije se pokazala stvarnom.

Na slici 7.6. dan je geotehnički profil tla za klizište KK8. Iz priložene slike vidljive su vrste materijala koje obitavaju na predmetnom klizištu te njihova svojstva i klasifikacija. Također označeni su pomaci, iznosi i smjer pomaka inklinometra.

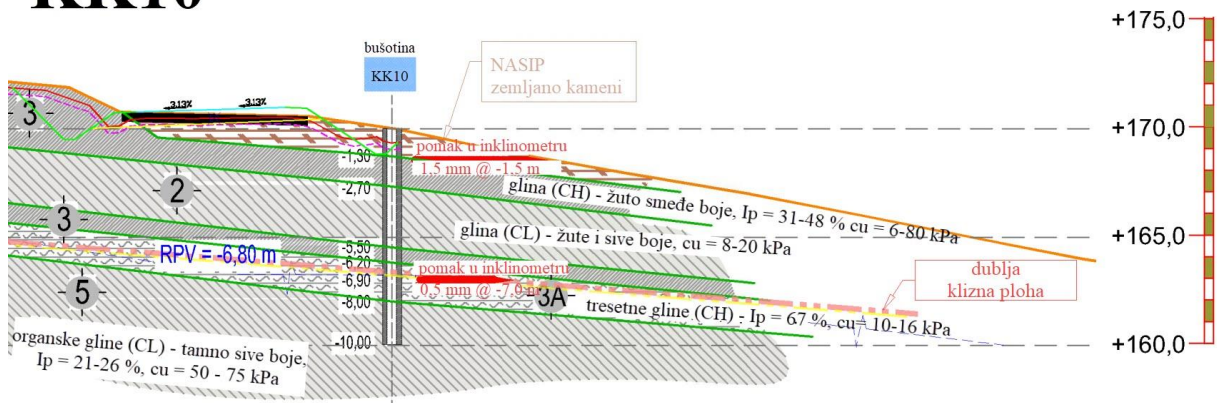


Slika 7.4. Preklap vrijednosti indeksa horizontalnog napreznja i mjerenja inklinometrima - grupa 3 istraživanog područja (lijevo) i grupa 4 istraživanog područja (desno)



Slika 7.5. Preklap vrijednosti indeksa horizontalnog naprezanja i mjerenja inklinometrima – grupa 5 istraživanog područja (lijevo) i grupa 6 istraživanog područja (desno)

KK10



Slika 7.6. Geotehnički profil tla – klizište KK10

8. ANALIZE REZULTATA

Parametri s verificiranih zona tla u kojima se događa klizanje izdvojeni su i prikazani u tablici 8.1.

Tablica 8.1. Parametri tla na kliznoj plohi iz in-situ sondiranja

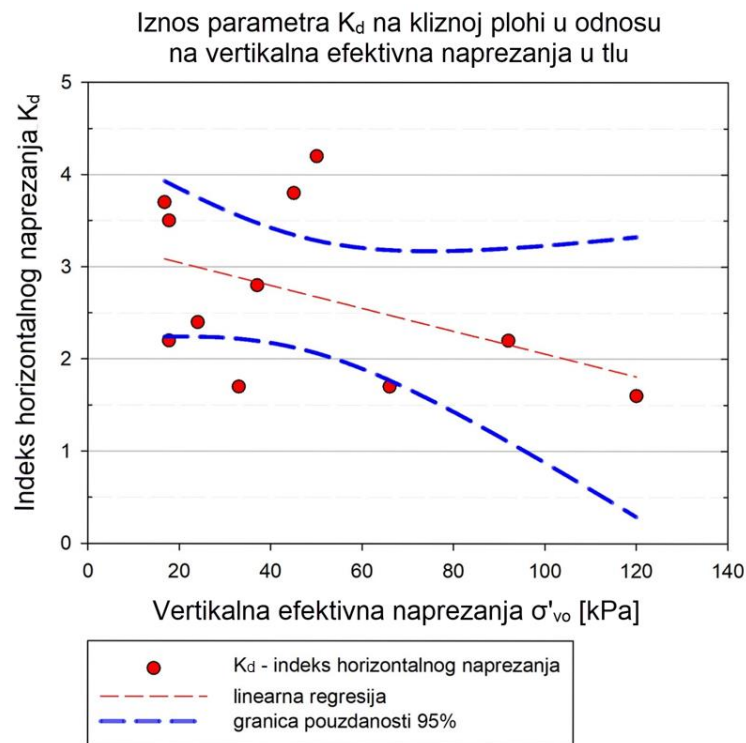
Grupa podataka	Mjesto	Dubina klizne plohe (m)	Vrsta tla	RPV (m)	σ'_{v0} (kPa)	CPT	DMT	CPT	DMT	CPT	DMT	DMT
						c_u (kPa)	OCR	OCR	M (MPa)	K_d		
GRUPA 1	Bedekovčina	2,80		0,5	24	23,0	19,0	10,0	4,8	8,0	8,4	2,4
		5,60		0,5	17,7	55,0	70,0	9,8	10,2	13,0	23,0	2,2
GRUPA 2	Bedekovčina	6,00		0,5	17,7	47,0	25,0	7,5	3,1	16,5	11,4	3,5
		8,20		0,5	16,7	26,0	28,0	3,5	2,5	8,0	9,3	3,7
GRUPA 3	DC 31, KK8	2,00		2,2	33				6,0		2,9	1,7
GRUPA 4	DC 31, KK9	2,20		2,3	37				2,0		18,0	2,8
		3,20		2,3	45				7,1		44,0	3,8
GRUPA 5	DC 31, KK10	3,00		6,8	50				7,0		18,0	4,2
		5,40		6,8	92				2,4		13,4	2,2
		7,20		6,8	120				0,8		4,9	1,6
GRUPA 6	DC 31, KK11	3,80		3	66				14,0		8,1	1,7

Komparativne analize vršene su na izdvojenim podacima iz tablice 8.1. iz kojih su izvođeni zaključci i opažanja. Osjetljivost pojedinog parametra razmatra se kao sposobnost parametra da točno predvidi stanje u odnosu na zadani raspon (kriterij). Cilj postupka je identifikacija uklapanja očekivanog parametra izmjerene na kliznoj plohi in-situ statičkim sondiranjem u očekivane raspone.

8.1. Parametar indeksa horizontalnog napreznja

Kao indikator klizne plohe smatra se vrijednost indeksa horizontalnog napreznja kada je u rasponu $K_d = 1,8 - 2,0$. Razmatrano sa aspekta mirnog bočnog tlaka tla, indeks K_d većeg je iznosa od koeficijenta bočnog tlaka u mirovanju K_0 zbog poremećaja u tlu kao posljedice utiskivanja mjerne sonde.

Iz provedenog istraživanja, na slici 8.1. vidljivo je da se u očekivani raspon mogu svrstati klizne plohe kod vertikalnih napreznja $\sigma'_{v0} > 60 \text{ kPa}$. Dakle, kod analiza plitkih kliznih ploha ili klizišta kod kojih je razina podzemne vode visoka, odnosno u uvjetima malih iznosa efektivnih geoloških napreznja $\sigma'_{v0} \leq 60 \text{ kPa}$, izmjereni indeks horizontalnog napreznja može biti i značajno viši od literaturnog raspona. Ovaj zaključak važan je s aspekta tumačenja indeksa K_d na plitkim dubinama.



Slika 8.1. Izmjereni indeks horizontalnog naprezanja K_d na kliznim plohama u ovisnosti o vertikalnom efektivnom naprezanju σ'_{v0}

Uklapanje rezultata u očekivani raspon (osjetljivost) može se u ovom slučaju definirati izrazom 8.1. Podaci analize osjetljivosti parametra K_d prikazani su u tablici 8.2.

$$\text{osjetljivost} = \frac{\text{broj uzorka unutar kriterija}}{\text{ukupni uzorak}} \quad (8.1.)$$

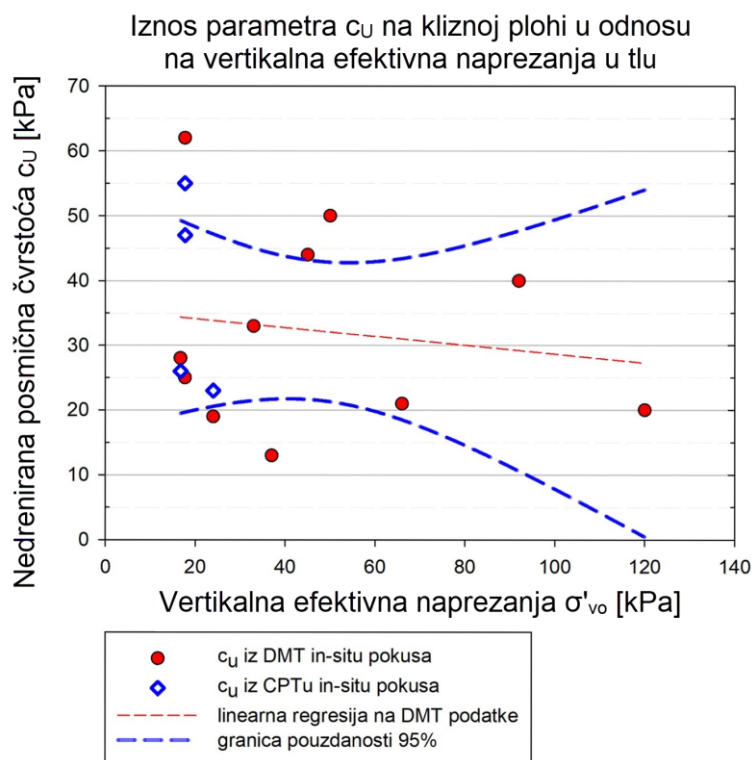
Tablica 8.2. Analiza podataka i osjetljivost parametra K_d

Parametar na kliznoj plohi iz in-situ pokusa - Indeks horizontalnog naprezanja K_d					
Ukupni uzorak, N	Srednja vrijednost skupa, \bar{x}	Standardna devijacija uzorka, „s“	Očekivani raspon točnog rezultata (prošireni)	Osjetljivost parametra na ukupnom uzorku podataka	Osjetljivost za uzorak $\sigma'_{v0} > 60 \text{ kPa}$
11	2,75	0,94	1,8 - 2,5	≈60%	100 %

Regresijski pravac: $K_d = -0,0124 \cdot \sigma'_{v0} + 3,29$

8.2. Parametar nedrenirane posmične čvrstoće

Nedrenirana posmična čvrstoća tla c_U glavni je mehanički parametar čvrstoće tla koji unutar zone klizanja poprima rezidualne vrijednosti. Vrijednosti parametra c_U dobiveni in-situ pokusima u odnosu na vertikalna efektivna naprezanja prikazani su na slici 8.2. Slika prikazuje dvije grupe, za CPTu i DMT pokus.



Slika 8.2. Izmjerena nedrenirana posmična čvrstoća na kliznim plohama u ovisnosti o vertikalnom efektivnom naprezanju σ'_{v0}

U geotehničkoj praksi smatra se da unutar intervala u kojem se događa klizanje, nedrenirana posmična čvrstoća ne bi trebala prekoračiti vrijednost $c_U \leq 40 \text{ kPa}$. Ova granica može se razmatrati kao relativna iz razloga što je rezultat rezidualne čvrstoće okolnog tla iznad i ispod same plohe sloma. Analiza osjetljivosti nedrenirane posmične čvrstoće za DMT pokus prikazana je u tablici 8.3., a za CPTu pokus u tablici 8.4.

Usporedivo za dvije in-situ metode na dostupnim uzorcima posmične čvrstoće unutar klizne plohe, DMT penetracijski pokus je u prednosti pred CPTu pokusom.

Tablica 8.3. Analiza podataka i osjetljivost parametra c_U iz DMT pokusa

Parametar na kliznoj plohi iz in-situ pokusa - nedrenirana posmična čvrstoća c_U				
Ukupni uzorak, N	Srednja vrijednost skupa, \bar{x}	Standardna devijacija uzorka, „s“	Očekivani raspon točnog rezultata	Osjetljivost parametra na ukupnom uzorku DMT podataka
11	32,27	15,143	5,0 - 40,0	$\cong 70\%$

Regresijski pravac: $c_U = -0,0691 \cdot \sigma'_{v0} + 35,53$

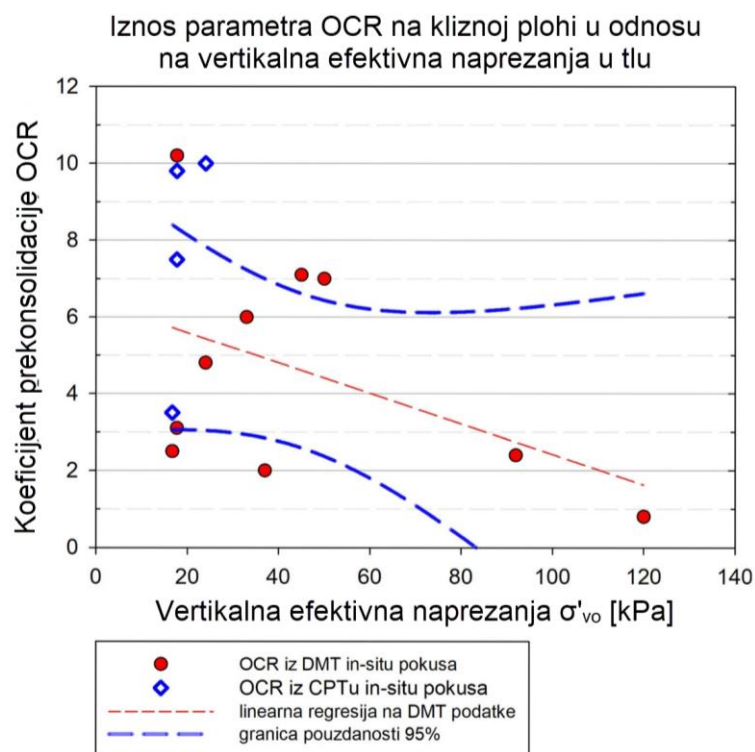
Tablica 8.4. Analiza podataka i osjetljivost parametra c_U iz CPTu pokusa

Parametar na kliznoj plohi iz in-situ pokusa - nedrenirana posmična čvrstoća c_U				
Ukupni uzorak, N	Srednja vrijednost skupa, \bar{x}	Standardna devijacija uzorka, „s“	Očekivani raspon točnog rezultata	Osjetljivost parametra na ukupnom uzorku CPTu podataka
4	37,75	15,69	5,0 - 40,0	$\cong 50\%$

8.3. Parametar koeficijenta prekonsolidacije

Koeficijent prekonsolidacije OCR vrlo je ovisan o vertikalnim efektivnom naprezanju jer pokazuje omjer naprezanja kojem je tlo bilo izloženo u prošlosti i naprezanja kojem je tlo izloženo danas. Od velike je važnosti korelacija između indeksa horizontalnog naprezanja K_d DMT pokusa i koeficijenta prekonsolidacije OCR . Vrijednost $OCR = 1$ odgovara vrijednosti $K_d = 2$. Na slici 8.3. prikazan je odnos između izmjerenih vrijednosti OCR -a na kliznim ploham i vertikalnih efektivnih naprezanja σ'_{v0} za in-situ statičke sonde (DMT i CPTu).

Uobičajeno je razmatrati uvjete prekonsolidacije tla kao rezultat erozije površinskog tla. Iz tog razloga u pravilu plići slojevi tla pokazuju veći stupanj prekonsolidacije, dok u dubljim slojevima utjecaj prekonsolidacije slabi. Mogao bi se postaviti kriterij da se unutar klizne plohe mogu pojaviti samo blago prekonsolidirani materijali do $OCR \leq 4$. Vrijednosti analize osjetljivosti parametara OCR iz DMT pokusa prikazane su u tablici 8.5., a iz CPTu pokusa u tablici 8.6.



Slika 8.3. Odnos između koeficijenta prekonsolidacije na kliznim plohama i vertikalnog efektivnog naprežanja

Tablica 8.5 Analiza podataka i osjetljivost parametra *OCR* iz DMT pokusa

Parametar na kliznoj plohi iz in-situ pokusa - koeficijent prekonsolidacije <i>OCR</i>				
Ukupni uzorak, N	Srednja vrijednost skupa, \bar{x}	Standardna devijacija uzorka, „s“	Očekivani raspon točnog rezultata	Osjetljivost parametra na ukupnom uzorku DMT podataka
11	4,59	2,95	1,0 - 4,0	$\cong 45\%$

Regresijski pravac: $OCR = -0,0397 \cdot \sigma'_{vo} + 6,39$

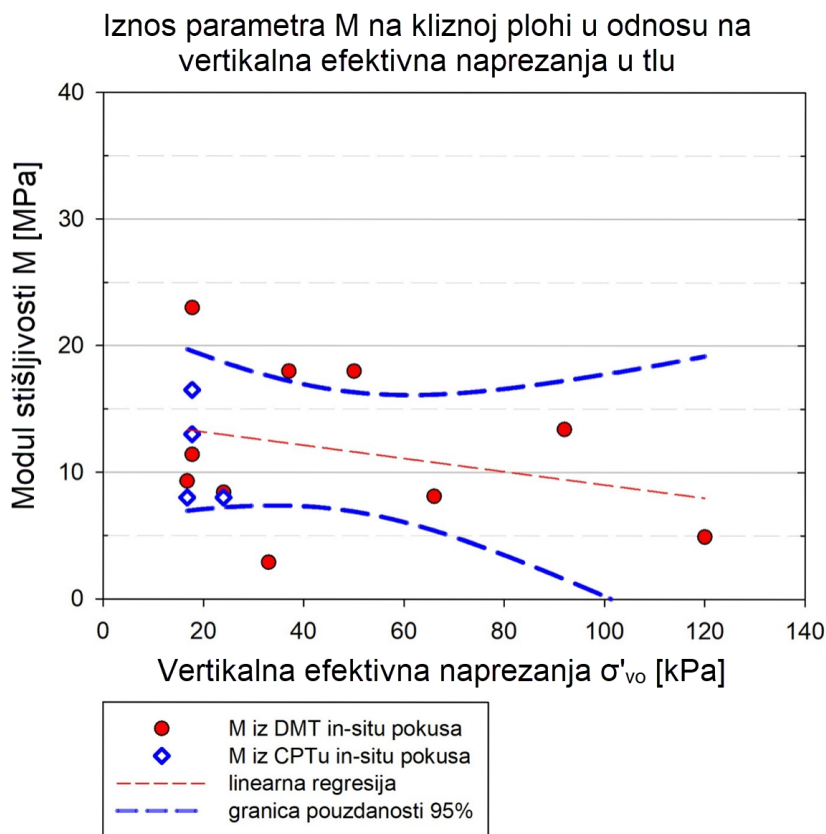
Tablica 8.6. Analiza podataka i osjetljivost parametra *OCR* iz CPTu pokusa

Parametar na kliznoj plohi iz in-situ pokusa - koeficijent prekonsolidacije <i>OCR</i>				
Ukupni uzorak, N	Srednja vrijednost skupa, \bar{x}	Standardna devijacija uzorka, „s“	Očekivani raspon točnog rezultata	Osjetljivost parametra na ukupnom uzorku CPTu podataka
4	7,70	3,02	1,0 - 4,0	$\cong 25\%$

Uspoređujući dobivene vrijednosti OCR-a DMT i CPTu sondom na razmatranim uzorcima s obzirom na osjetljivost, srednju vrijednost skupa, očekivani raspon rezultata i standardnu devijaciju, DMT sonda je u prednosti pred CPTu sondom.

8.4. Parametar jednodimenzionalne kompresije M

Modul stišljivosti, edometarski modul ili modul jednodimenzionalne kompresije sitnozrnatog tla rezultat je gustoće tla kao posljedice mineraloškog sastava, mikro strukture, orijentacije čestica i vode. Komponenta vode odgovorna je za konzistentno stanje materijala, a zbog veličine mineralnih čestica koje grade gline i prahove, sudjeluje kao građevni element i može nadjačati mehanička naprezanja koja djeluju između čestica. Možemo pretpostaviti da je unutar poremećenog tla plohe klizanja promijenjena struktura, te kao rezultat izmijenjena vrijednost modula stišljivosti. Očekivani raspon koji se može postaviti kao vrijednosti za mekane stišljive gline je $M < 6 \text{ MPa}$. Na slici 8.4. prikazani su rezultati izmjerenih modula stišljivosti in-situ sondama na verificiranim kliznim ploham. Iznenađuju pojedine visoke vrijednosti modula stišljivosti koje nikako nisu za očekivati. Vrijednosti analize osjetljivosti parametara M iz DMT pokusa prikazane su u tablici 8.7., a iz CPTu pokusa u tablici 8.8.



Slika 8.4. Odnos između modula stišljivosti na kliznim ploham i vertikalnog efektivnog naprezanja

Tablica 8.7 Analiza podataka i osjetljivost parametra M iz DMT pokusa

Parametar na kliznoj plohi iz in-situ pokusa - modul stišljivosti M				
Ukupni uzorak, N	Srednja vrijednost skupa, \bar{x}	Standardna devijacija uzorka, „s“	Očekivani raspon točnog rezultata	Osjetljivost parametra na ukupnom uzorku DMT podataka
11	11,74	6,35	1,0 - 8,0	$\cong 35 \%$

Regresijski pravac: $M = -0,052 \cdot \sigma'_{v0} + 14,21$

Tablica 8.8. Analiza podataka i osjetljivost parametra M iz CPTu pokusa

Parametar na kliznoj plohi iz in-situ pokusa - modul stišljivosti M				
Ukupni uzorak, N	Srednja vrijednost skupa, \bar{x}	Standardna devijacija uzorka, „s“	Očekivani raspon točnog rezultata	Osjetljivost parametra na ukupnom uzorku CPTu podataka
4	11,37	4,15	1,0 – 8,0	$\cong 50\%$

Nameće se zaključak da se prilikom klizanja tla čestice orijentiraju u smjeru pomaka, pri čemu taj proces ne utječe na modul stišljivosti, odnosno čak ga i povećava. Dakle, može se zaključiti da proces klizanja konsolidira uzorak s obzirom na modul stišljivosti preorijentacijom čestica u smjeru klizanja tla.

9. ZAKLJUČAK

Kako klizišta predstavljaju vrlo čestu i aktualnu temu u današnjem modernom svijetu te dovode do brojnih neželjenih posljedica, od velike je važnosti brza i točna karakterizacija klizišta. U ovom radu postavio se cilj utvrđivanja podesnije metode statičkog in-situ sondiranja za istraživanje klizišta. Ocjenjivala se podudarnost četiri mjerena parametra na plohi klizanja sa očekivanim rasponom temeljem analize osjetljivosti odabranih parametara.

Za lokacije istraživanja odabrana su područja klizišta Bedekovčina i klizišta Kravarsko. Na predmetnim lokacijama klizišta provedeno je sondiranje DMT sondom i CPTu sondom, a dobivene dubine potencijalnih kliznih ploha verificirane su preklapanjem s rezultatima horizontalnih pomaka u inklinometrima.

U parametarskoj analizi izrađeni su dijagrami odnosa indeksa horizontalnog naprezanja K_d , nedrenirane posmične čvrstoće c_u , koeficijenta prekonsolidacije OCR i modula stišljivosti M na kliznoj plohi s obzirom na efektivno vertikalno naprezanje σ'_{v0} na kliznoj plohi. Usporednom dobivenih vrijednosti na 11 ispitivanih uzoraka i analizom osjetljivosti odabranih parametara, za rezultate DMT sonde generalno se dobiva veća osjetljivost parametara, bliža vrijednostima u odnosu na očekivani raspon, te manja standardna devijacija (odstupanje od aritmetičke sredine).

Doprinos istraživanja je uočeni trend regresijskog pravca u odnos na efektivna naprezanja u tlu, koji kod svih parametara ima negativni koeficijent smjera. Proizlazi zaključak da je kod dubljih ploha klizanja detekcija promjena unutar poremećenog tla od klizanja izraženija. Nadalje, izmjereni parametri na dubljim kliznim plohamo više se uklapaju u očekivane raspone vrijednost. Objašnjenje uočenog može se dati u činjenici da većina geotehničkog tla pokazuje prekonsolidirane karakteristike u plićim slojevima. Ova karakteristika dominantno utječe na rezultate statičke penetracije na manjim dubinama, odnosno kod manjih iznosa vertikalnih efektivnih naprezanja.

Uzevši iz provedenog istraživanja, granicom se mogu smatrati klizne plohe do $\sigma'_{v0} \leq 50 \text{ kPa}$. To znači da parametri mjereni in-situ penetracijom na plohi klizanja u navedenom slučaju ne detektiraju kliznu plohu unutar očekivanih raspona parametara. Posebno je navedeni slučaj kod plitkih klizanja u tlu, s visokim razinama podzemne ili procjedne vode, pri čemu su vertikalna efektivna naprezanja malog iznosa.

Hipoteza ovog rada je dakle potvrđena. Reorijentacijom čestica u tlu zbog klizanja prvenstveno se utječe na bočna naprezanja u tlu. Kako je njih vrlo teško mjeriti, uspoređeni su posredno s podacima vertikalnih efektivnih naprezanja koje možemo izračunati. Osim navedenog, provedenim istraživanjem uočen je maskirajući efekt prekonsolidacije tla u plićim slojevima na rezultate in-situ statičke penetracije.

Položaj mjerne membrane kod DMT pokusa koja je horizontalno orijentirana, ključna je za povećanu osjetljivost metode za detektiranje klizne plohe. Parametar koji najbolje detektira kliznu plohu je parametar indeksa horizontalnog naprezanja K_d . Rezultat ovog rada je i činjenica da se literaturni raspon očekivane vrijednosti indeksa od $K_d = 1,8 - 2,0$ na kliznoj plohi može proširiti na raspon $K_d = 1,8 - 2,5$, te da je njegova osjetljivost detekcije također pod utjecajem prekonsolidacije u plitkim slojevima tla.

Navedeno potvrđuje hipotezu ovog rada da penetracijske metode nisu jednako osjetljive za detekciju klizanja, te se može uzeti da je dilatometarska sonda u prednosti pred konusnim penetrometrom za potrebe karakterizacije klizišta.

10.LITERATURA

- [1] Turner, A. K., Schuster, R. L. (Eds.). (1996): LANDSLIDES: INVESTIGATION AND MITIGATION (report 247). National Academy Press Washington. D.C.
- [2] Mihalić Arbanas, S., Arbanas. Ž., Krkač, M., Bernat Gazibara, S., Vivoda Prodan, M., Đomlija, P., Jagodnik, V., Dugonjić Jovančević, S., Sečanj, M., Peranić, J. (2017): Landslide risk reduction in Croatia: scientific research in the framework of the WCoE 2014-2017, IPL-173, IPL-184, ICL ABN. Sassa, K. et al. Eds. Proceedings of 4th World Landslide Forum. Ljubljana, Slovenija, 2017. Advancing Culture of Living with Landslides.
- [3] Jordanova, G., Gariano, S.L., Melillo, M., Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Jemec Auflič, M. (2020): Determination of Empirical Rainfall Thresholds for Shallow Landslides in Slovenia Using an Automatic Tool. *Water*. 12: 1449.
- [4] Corsini, A., Borgatti, L., (2019): Mountain Landslides: Monitoring, Modeling, and Mitigation. *Geosciences*. 9:365. 10.3390/geosciences9090365.
- [5] Tofani, V., Biccocchi, G., Rossi, G., Segoni, S., D'Ambrosio, M., Casagli, N., Catani, F., (2017): Soil characterization for shallow land-slides modeling: a case study in the Northern Apennines (Central Italy). *Landslides*. 14:755–770.
- [6] Varnes, D. J.(1996): Landslide Types and Processes, in Turner, A. K., and R.L. Schuster, *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, National Academy Press. Wasington, D.C.
- [7] Mihalić, S. (2008.): Klizišta. Interna skripta. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- [8] Nossa & District Landcare (2015): Keeping it in Kin Kin Priority Implementation Plan. Dostupno na: <https://noosalandcare.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/KIKK-Implementation-PlanFINAL.pdf>. Datum pristupa: 24.05.2022.
- [9] Kliche, C. A. (2018): *Rock Slope Stability*. 2nd Edition. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. London.

- [10]HRN EN ISO 22476-1, Geotehničko Istraživanje i Ispitivanje - Terensko Ispitivanje - 1. Dio: Ispitivanje električnim statičkim prodiranjem bez mjerenja pornog tlaka i s mjerenjem pornog tlaka (ISO 22476-1:2012; EN ISO 22476:2012).
- [11]Niazi, F., Mayne P., Woeller, D. (2011). Calibration of Hybrid SCE-CSSM Analytical Model for Piezocone Penetration in Clays. In 14th Pan-American Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. and the 64th Can. Toronto, Ontario
- [12]Schneider, J. A., Randolph M.F., Mayne, P.W., Ramsey, N.R. (2008). Analysis of Factors Influencing Soil Classification Using Normalized Piezocone Tip Resistance and Pore Pressure Parameters. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 134 (11): 1569–86.
- [13]Robertson, P.K., Cabal, K. L. (2015). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, 6th Ed. Gregg Drilling & Testing, Inc.
- [14]Szavits-Nossan, V. (2017): Geotehnički terenski istražni radovi. Materijali za predavanja iz kolegija Mehanika tla i stijena. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- [15]Robertson, P. K. (2010). Soil Behaviour Type from the CPT: An Update. In 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, 8 p.
- [16] Mayne, P. W. (2016): Evaluating Effective Stress Parameters and Undrained Shear Strengths of Soft-Firm Clays from CPTu and DMT. In Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC 2016. Queensland, Australia 2016: Australian Geomechanics Society (AGS).
- [17]Hight, D.W., Mcmillan, F., Powell, J.J.M., Jardine, R. J., Allenou, C.P. (2003): Some characteristics of London Clay. In: Proceedings of the 1st international workshop on characterisation and engineering properties of natural soils, Singapore, Tan TS, Phoon KK, Hight KW, Leroueil S, Balkema AA (eds), 851–907.

- [18] Vesić, A.S. (1977). Design of pile foundations. NCHRP, Synthesis 42, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 68p.
- [19] Robertson, P.K., (2009). Interpretation of Cone Penetration Tests a Unified Approach. Canadian Geotechnical Journal 46 (11): 1337–55.
- [20] Robertson, P.K. (2016): Cone Penetration Test (CPT)-Based Soil Behaviour Type (SBT) Classification System - an Update. Canadian Geotechnical Journal 53 (12): 1910–27.
- [21] Mayne, P.W., Kemper, J.B. (1998): Profiling OCR in Stiff Clays by CPT and SPT. Geotechnical Testing Journal. 11(2)
- [22] Lunne, T., Robertson, P.K., Powell J. (1997): Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Soil Mechanics and Foundation Engineering 46(6).
- [23] HRN EN 1997-1:2012, Eurokod 7, Geotehničko Projektiranje - 1. Dio: Opća Pravila. HZN/TO 548.
- [24] HRN EN ISO 22476-11:2017, Geotehničko Istraživanje i Ispitivanje - Terensko Ispitivanje - 11. Dio: Ispitivanje Plosnatim Dilatometrom.
- [25] ConeTec. DMT/SDMT. In-situ testing. Dostupno na: www.conetec.com/services/in-situ-testing/dmtsdt. Datum pristupa: 03.06.2022.
- [26] Rabarijoely, S.(2018): A New Approach to the Determination of Mineral and Organic Soil Types Based on Dilatometer Tests (DMT). Applied Sciences. 8, 2249.
- [27] Marchetti, S. (1997):. The Flat Dilatometer: Design Applications. Keynote Lecture, Proc. 3rd Int. Geotech. Engineering Conference, Cairo, 421-448
- [28] Marchetti, S. (2016): Incorporating the Stress History Parameter KD of DMT into the Liquefaction Correlations in Clean Uncemented Sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 142(2), 04015072.

- [29] Totani G., Calabrese M., Marchetti S., Monaco P (1997): Use of in situ flat dilatometer (DMT) for ground characterization in the stability analysis of slopes", Proc. XIV ICSMFE, Hamburg Session 1.2.
- [30] Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., Calabrese, M. (2001): The DMT in soil investigations. A report by ISSMGE TC 16. International Conference on In Situ Measurements of Soil Properties and Case Histories, 95-132.
- [31] Špiranec, M., Grabar, K., Strelec, S. (2016): Određivanje klizne plohe in-situ pomoću dilatometarskog (DMT) istraživanja ("Kd metoda"), (Determination slip surface in situ by dilatometer (DMT) test ("Kd method")). Geotechnical aspects of damages caused by natural phenomena, 7th conference of Croatian Geotechnical Society with international participation, 10. – 12 .11.2016. Varaždin, Croatia.
- [32] Vrkljan I.(2013): Inženjerska mehanika stijena. Skripta. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet.
- [33] Geotech. Klizišta. Monitoring klizišta - mjerenje inklinometrom. Dostupno na: www.geotech.hr/monitoring-klizista-mjerenje-inklinometrom/. Datum pristupa: 07.06.2022.

SAŽETAK

Autor: Anja Bek

Naslov: Komparacija metoda statičkog konusnog penetrometra (CPTu) i plosnatog dilatometra (DMT) za karakterizaciju klizišta primjenom in-situ istraživanja

Sve češća pojava klizišta u svijetu uzrokuje mnoge ljudske žrtve i ogromne socio-ekonomske gubitke. Zbog toga je što brža i točnija karakterizacija klizišta od velike važnosti. Glavnim (primarnim) uzrokom nastanka razmatranih klizišta, ali i općenito klizišta, smatra se zasićenost pora tla vodom. Cilj ovog rada je istražiti osjetljivost statičkog konusnog penetrometra (CPTu) i plosnatog dilatometra (DMT) za detekciju dubine klizne plohe. Za verifikaciju pouzdanosti dubine klizne plohe korištena su mjerenja horizontalnih pomaka tla inklinometrima. Poklapanje rezultata in-situ statičkih sonde i pomaka inklinometara sigurna su potvrda dubine klizne plohe. Na primjeru klizišta Bedekovčina i Kravarsko primjenom in-situ statičkih sonde dobivene su vrijednosti ulaznih parametara na kliznoj plohi (nedrenirana posmična čvrstoća c_U , koeficijent prekonsolidacije OCR , modul stišljivosti M i indeksa horizontalnog naprezanja K_d) za parametarsku analizu osjetljivosti. Analiza osjetljivosti provedena je izradom dijagrama odnosa navedenih parametara i vertikalnog efektivnog naprezanja σ'_{vo} na kliznoj plohi. Analiza osjetljivosti parametara 11 ispitivanih uzoraka pokazuje da se za parametre dobivene DMT sonde dobiva veća osjetljivost parametara, bliža vrijednostima u odnosu na očekivani raspon, te manja standardna devijacija (odstupanje od aritmetičke sredine). Parametri kliznih ploha detektiranih na većoj dubini pokazuju bolje uklapanje u očekivani raspon rezultata. Parametar K_d koji se dobiva dilatometarskim sondiranjem najbolji je pokazatelj dubine klizne plohe. Literaturna vrijednost $K_d = 1,8 - 2,0$ na kliznoj plohi u ovom radu proširena je na raspon $K_d = 1,8 - 2,5$, a njegova osjetljivost detekcije je pod utjecajem prekonsolidacije u plitkim slojevima tla. Generalno, rezultati rada pokazuju da je dilatometarska sonda u prednosti pred konusnim penetrometrom za potrebe karakterizacije klizišta.

Ključne riječi: in-situ statičke sonde, karakterizacija klizišta, klizna ploha, verifikacija rezultata inklinometrima, analiza osjetljivosti parametara.

SUMMARY

Author: Anja Bek

Title: Comparison of static cone penetrometer (CPTu) and flat dilatometer (DMT) methods for landslide characterization using in-situ research

The increasing occurrence of landslides in the world results in many human casualties and enormous socioeconomic losses. Therefore, characterizing landslides as quickly and accurately as possible is of great importance. The main cause of the considered landslides, but also of landslides in general, is considered to be the saturation of soil pores with water. The aim of this work is to investigate the sensitivity of a cone penetrometer (CPTu) and a flat dilatometer (DMT) for detecting the depth of the sliding surface. Measurements of horizontal ground displacements with inclinometers were used to verify the reliability of slip surface depth. The agreement of the results of the in-situ static soundings and the displacements of the inclinometers are a reliable confirmation of the depth of the slip surface. Using the Bedekovčina and Kravarsko landslides as examples, static in-situ soundings were used to obtain the values of input parameters on the slip surface (undrained shear strength c_U , overconsolidation coefficient OCR , compressibility modulus M , and horizontal stress index K_d) for parametric sensitivity analysis of parameters. The sensitivity analysis was performed by plotting the relationship between the above parameters and the vertical effective stress σ'_{v0} on the sliding surface. The sensitivity analysis of the parameters of 11 tested samples shows that for the parameters of the obtained DMT probe, a higher sensitivity of the parameters, a greater closeness to the values with respect to the expected range and a lower standard deviation (deviation from the arithmetic mean) are obtained. The parameters of the sliding surfaces obtained at a greater depth fit better in the expected range of results. The parameter K_d determined by dilatometer probing is the best indicator of the depth of the slip surface. The value $K_d = 1,8 - 2,0$ for the slip surface reported in the literature is extended to the range $K_d = 1,8 - 2,5$ in this work, and its detection sensitivity is affected by overconsolidation in shallow soil layers. In general, the results of the work show that the dilatometer probe has an advantage over the cone penetrometer test for landslide characterization needs.

Key words: in-situ static probes, landslide characterization, sliding surface, inclinometer verification of results, parameter sensitivity analysis.