Probna ispitivanja posmične čvrstoće tla terenskom krilnom sondom

Burečić, Mirela

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:310766

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

PROBNA ISPITIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE TLA TERENSKOM KRILNOM SONDOM

Diplomski rad

Mirela Burečić

R157

Zagreb, 2017

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

PROBNA ISPITIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE TLA TERENSKOM KRILNOM SONDOM

Mirela Burečić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U ovom radu prikazana su probna ispitivanja nedrenirane posmične čvrstoća tla u laboratorijskim uvjetima i na terenu. Korištene su dvije krilne sonde, jedna tvrtke Eijkelkamp a druga tvrtke ELE. Sonde se razlikuju u izvedbi i veličini krilaca. Glavni cilj istraživanja bio je utvrditi povezanost između vrste materijala, njegovih fizičkih svojstava i indeksnih pokazatelja s vrijednostima vršne i rezidualne čvrstoće tla. Probna laboratorijska ispitivanja obavljena su u Geomehaničkom laboratoriju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, a terenska ispitivanja obavljena su na jednoj lokaciji u Zagrebu te na jednoj lokaciji u mjestu Lupoglav nedaleko od Dugog Sela. Cilj istraživanja je ostvaren obzirom da su dobivene vrijednosti posmične čvrstoće za različite materijale i uvjete ispitivanja.

Ključne riječi: krilna sonda, posmična čvrstoća, laboratorijska ispitivanja

Završni rad sadrži: 46 stranica, 9 tablica, 29 slika, 1 prilog , 7 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentorica: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica RGNF

Pomagao pri izradi: Evelina Oršulić, dipl. ing.

Ocjenjivači: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica RGNF
Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr. sc. Gordan Bedeković, redoviti profesor RGNF

Datum obrane: 1.9.2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

TRIAL TESTINGS OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH BY FIELD VANE TEST

Mirela Burečić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining and Geotechnical Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

This thesis presents the trial testing of undrained shear strength of the soil in laboratory conditions and in the field. Two field inspection vane test devices were used, one of them is made by Eijkelkamp company and another is made by ELE company. The vane test devices differ in the construction and the size of the vanes. The main aim of the research was to establish the correlation between the type of material, its physical and index properties with the values of shear strength of the soil at a certain depth. Trial testings were performed in the Soil mechanics laboratory at the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering in Zagreb and field tests were conducted at a location in Zagreb and in the place Lupoglav near Dugo Selo. The aim of the research was realized as the shear strength was obtained for different materials and test conditions.

Keywords: field vane test, shear strength, laboratory testing

Thesis contains: 46 pages, 9 tables, 29 figures, 1 appendix, 7 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Biljana Kovačević Zelić, Full Professor

Tech. assistance: MSc Evelina Oršulić

Reviewers: PhD Biljana Kovačević Zelić, Full Professor
PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor
PhD Gordan Bedeković, Full Professor

Defence date: September 01, 2017, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Zahvala

Zahvaljujem se mentorici prof. dr.sc. Biljani Kovačević Zelić na predloženoj temi, stručnoj pomoći i izdvojenom vremenu tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Također se zahvaljujem Evelini Oršulić na tehničkoj pomoći i strpljenju tijekom obavljanja laboratorijskih i terenskih ispitivanja.

Najveće hvala mojoj obitelji na podršci i razumjevanju kroz sve godine studiranja.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS PRILOGA V
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA VI
1. UVOD 1
2. EUROKOD 2
2.1. Uzorkovanje tla 2
2.2. Određivanje nedrenirane posmične čvrstoće terenskim istraživačkim radovima 3
2.3. Ocjena i korištenje rezultata ispitivanja terenskom krilnom sondom 4
3. TERENSKA KRILNA SONDA 5
3.1. Općenito o krilnoj sondi 5
3.2. Povijesni razvoj 5
3.3. Prednosti i nedostaci 6
3.4. Oprema 7
3.5. Postupak ispitivanja 9
3.6. Proračun 10
3.7. Interpretacija 11
3.8. Terenski izvještaj 12
4. OPIS OPREME 13
4.1. Krilna sonda tvrtke ELE 13
4.2. Krilna sonda tvrtke Eijkelkamp 15
4.2.1. Postupak ispitivanja 16
5. PROBNA LABORATORIJSKA ISPITIVANJA 18
5.1. Ispitivanje indeksnih i fizičkih značajki bentonitne gline 18
5.2. Ispitivanja posmične čvrstoće bentonitne gline krilnom sondom tvrtke ELE 21
5.3. Ispitivanje posmične čvrstoće bentonitne gline krilnom sondom tvrtke Eijkelkamp 24
5.4. Ispitivanja fizičkih značajki na uzorku s terena 26
6. TERENSKA ISPITIVANJA 30
6.1. Ispitivanja terenskom krilnom sondom ELE na lokaciji u Zagrebu 30
6.2. Uzorkovanje tla 36
6.3. Ispitivanja terenskom krilnom sondom Eijkelkamp na lokaciji Lupoglav 39

7. ZAKLJUČAK 44
8. LITERATURA 46

POPIS SLIKA

Slika 3-1 Geometrija krilne sonde s pravokutnom i trokutnom oštricom 7
Slika 3-2 Prikaz omjera površine krilca sonde 8
Slika 4-1 Okretna glava i krilca sonde ELE 13
Slika 4-2 Detaljan prikaz krilaca 14
Slika 4-3 Sonda s pripadajućim krilcima 15
Slika 4-4 Prikaz krilne sonde s pripadajućom opremom tvrtke Eijkelkamp 16
Slika 5-1 Grafički prikaz ovisnosti broja udaraca i vlažnosti uzorka bentonitne gline 19
Slika 5-2 Dijagram plastičnosti 20
Slika 5-3 Granulometrijska krivulja uzorka bentonitne gline 20
Slika 5-4 Ovisnost posmične i rezidualne čvrstoće i vlažnosti bentonitne gline dobivene sondom ELE 22
Slika 5-5 Ovisnost vršne i rezidualne posmične čvrstoće i vlažnosti bentonitne gline dobivene sondom Eijkelkamp 25
Slika 5-6 Grafički prikaz ovisnosti broja udaraca i vlažnosti uzorka 27
Slika 5-7 Dijagram plastičnosti 28
Slika 5-8 Granulometrijska krivulja 28
Slika 6-1 Lokacija u Zagrebu na kojoj su obavljena terenska ispitivanja 30
Slika 6-2 Raspored točaka mjerenja 31
Slika 6-3 Prikaz rastera s iskolčenim točkama na terenu 32
Slika 6-4 Krilna sonda utisnuta u tlo 32
Slika 6-5 Prikaz vršne čvrstoće za dvije dubine ispitivanja 34
Slika 6-6 Prikaz rezidualne čvrstoće za dvije dubine ispitivanja 34
Slika 6-7 Prikaz vršne i rezidualne čvrstoće na dubini 0,04 m 35
Slika 6-8 Prikaz vršne i rezidualne čvrstoće na dubini 0,08 m 36
Slika 6-9 Uzorkivač sa pripadajućom opremom 37
Slika 6-10 Uzorkivač utisnut u tlo 38
Slika 6-11 Uzorak tla u foliji izvađen na terenu 38
Slika 6-12 Lokacija Lupoglav na kojoj su obavljena terenska ispitivanja 39
Slika 6-13 Grafički prikaz raspodjele točaka za ispitivanje 40
Slika 6-14 Grafički prikaz raspodjele vršne i rezidualne čvrstoće do dubine 0,5 m 42
Slika 6-15 Raspodjela osjetljivosti materijala s dubinom 43

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Grupe uzoraka materijala za laboratorijska ispitivanja 3
Tablica 5-1 Ovisnost broja udaraca i vlažnosti uzorka za ispitivanje granice tečenja 18
Tablica 5-2 Vrijednosti vlažnosti valjčića za određivanje granice plastičnosti..... 19
Tablica 5-3 Rezultati mjerenja nedrenirane vršne i rezidualne posmične čvrstoće bentonitne gline sondom tvrtke ELE 22
Tablica 5-4 Rezultati mjerenja nedrenirane vršne i rezidualne posmične čvrstoće bentonitne gline sondom tvrtke Eijkelkamp 24
Tablica 5-5 Ovisnost broja udaraca i vlažnosti uzorka za ispitivanje granice tečenja…….26
Tablica 5-6 Vrijednosti vlažnosti valjčića za određivanje granice plastičnosti..... 27
Tablica 6-1 Vrijednosti dobivene ispitivanjem krilnom sondom na terenu u Zagrebu 33
Tablica 6-2 Vrijednosti dobivene ispitivanjem krilnom sondom na terenu u Lupoglavu ... 41

POPIS PRILOGA

PRILOG 1 Formular za terenski izvještaj

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
s_u	kPa	vršna nedrenirana posmična čvrstoća
s_{ur}	kPa	rezidualna nedrenirana posmična čvrstoća
T	Nm	okretni moment
K	m^2	konstanta sonde
m_{fv}	-	popravni koeficijent
S_T	-	osjetljivost
w_L	%	granica tečenja
w_P	%	granica plastičnosti
I_P	-	indeks plastičnosti
D_{10}	mm	karakteristični promjer zrna kod 10 % prolaza
D_{30}	mm	karakteristični promjer zrna kod 30 % prolaza
D_{60}	mm	karakteristični promjer zrna kod 60 % prolaza
C_u	-	koeficijent jednoličnosti
C_c	-	koeficijent zakrivljenosti

1. UVOD

Pokus krilnom sondom, kao jedan od geotehničkih istražnih radova, služi za određivanje nedrenirane posmične čvrstoće mekih do srednje tvrdih tala. Metoda je brza i ekonomski prihvatljiva što je omogućilo vrlo široku primjenu zadnjih nekoliko desetaka godina.

Parametri koji utječu na rezultate mjerenja su: vrsta tla, dubina mjerenja, oblik i veličina krilaca sonde, mehanizam utiskivanja sonde u tlo te izvedba sonde. Za provjeru utjecaja gore navedenih parametara i određivanja nedrenirane vršne i rezidualne čvrstoće tla korištene su sonde tvrtke ELE i Eijkelkamp te su uspoređeni dobiveni rezultati. Vrijednosti su se značajnije mijenjale ovisno o vlažnosti tla i dubini mjerenja. Ovo ispitivanje je vrlo važno za sigurno i ekonomično projektiranje i građenje na mekim tlima, često se koristi u kombinaciji sa statičkim penetracijskim pokusim tj. CPT-om i laboratorijskim ispitivanjem. Kod obrade rezultata potrebno je napraviti korekcije u odnosu na granice tečenja, indeks plastičnosti i vertikalni pritisak.

Zadatak u ovom diplomskom radu je bio određivanje nedrenirane vršne i rezidualne posmične čvrstoće tla krilnim sondama tvrtke ELE i Eijkelkamp na terenu i na uzorcima u Geomehaničkom laboratoriju. Ciljevi rada su obuhvaćali usporedbu rezultata za dva različita korištena uređaja u laboratorijskim uvjetima bez utjecaja bočnog tlaka, određivanje utjecaja vlažnosti na vršnu i rezidualnu posmičnu čvrstoću probnim laboratorijski ispitivanjima, te određivanja promjene vršne i rezidualne čvrstoće s dubinom na terenu.

U prvoj je fazi osnovni cilj bio provjeriti da li nova oprema tvrtke Eijkelkamp daje zadovoljavajuće rezultate u odnosu na rezultate dobivene sondom tvrtke ELE. U ispitivanjima su korištene različite veličine krilaca na istim uzorcima te je provedena usporedba rezultata.

Rezultati ispitivanja pokazali su da vrijednosti nedrenirane vršne i rezidualne čvrstoće variraju ovisno o vrsti tla, indeksnim pokazateljima, konstrukciji korištene krilne sonde te fizičkim karakteristikama tla.

U poglavlju 2. opisan je pokus krilnom sondom prema normi Eurokod, u poglavlju 3. detaljno je opisana namjena krilne sonde, povijesni razvoj, postupak korištenja te interpretacija rezultata. U poglavlju 4. opisana je oprema korištena za laboratorijska i terenska ispitivanja. Poglavlje 5. sadrži detaljan opis fizičkih značajki i indeksnih pokazatelja uzoraka materijala te opis probnih laboratorijskih ispitivanja. Terenska

ispitivanja na dvije lokacije opisana su u poglavlju 6., te su svi zaključci objedinjeni u poglavlju 7.

2. EUROKOD

Konstrukcijski Eurokodovi (eng. Eurocodes) obuhvaćaju skupinu normi za konstruktorsko i geotehničko projektiranje građevina. One trebaju poslužiti kao sredstvo da se dokaže kako građevine udovoljavaju osnovnim zahtjevima. U nadležnosti su Povjerenstva Europske unije (CEN). Eurokod 7 (za geotehniku) se sastoji od dva dijela:

- EN 1997-1: 2004, Geotehničko projektiranje – Dio 1. Opća pravila (publiciran i kao British standard 1997-1:2004)
- EN 1997-2 : 2007, Geotehničko projektiranje – Dio 2. Terenska i laboratorijska ispitivanja (Kvasnička, 2015)

2.1. Uzorkovanje tla

Eurokod veliki značaj pridaje kvaliteti uzoraka i položaju u kojem su se ti uzorci nalazili u tlu te ih je iz tog razloga potrebno sačuvati tijekom uzorkovanja. Uzorci moraju sadržavati sve sastojke slojeva iz kojih su uzeti i ne smiju biti kontaminirani bilo kojim drugim materijalima iz drugih slojeva ili od aditiva korištenih tijekom uzorkovanja. Postoje tri kategorije uzoraka ovisno o potrebnoj kvaliteti (tablica 2-1):

- Kategorija A: dobivanje uzoraka kvalitete razreda od 1-5
- Kategorija B: dobivanje uzoraka kvalitete razreda 3-5
- Kategorija C: dobivanje uzoraka kvalitete razreda 5

Uzorci razreda 1 do 2 mogu se dobivati korištenjem metode uzorkovanja kategorije A. Namjera je dobiti uzorke materijala kvalitete prikazane razredima 1 ili 2 kod kojih je dozvoljena neznatna promjena strukture tijekom uzorkovanja. Potrebno je zadržati porozitet i vlažnost uzoraka kakvi su bili u tlu. Primjenom metode uzorkovanja kategorije B mogu se dobiti uzorci razreda 3 ili veći. Namjera je dobiti uzorke koji sadrže sve sastojke in situ tla u izvornim omjerima i da tlo zadrži svoju prirodnu vlažnost. Može se identificirati opći raspored različitih slojeva ili komponenti tla, ali je struktura tla poremećena. Određene nepredviđene okolnosti kao što su varijacije u geološkim slojevima mogu dovesti do nižih razreda kvalitete uzorka. Primjenom metode uzorkovanja kategorije C mogu se dobiti uzorci razreda 5. Slojevitost u uzorku je potpuno promijenjena. Struktura tla je izmjenjena tako da slojevi in-situ ne mogu biti točno određeni. Vlažnost u uzorku ne

mora predstavljati prirodnu vlažnost u uzorku sloja tla. Uzorci tla za laboratorijske pokuse podijeljeni su u pet razreda kvalitete s obzirom na svojstva tla za koje se pretpostavlja da ostaju nepromijenjeni tijekom uzorkovanja i rukovanja, transporta i skladištenja. Razredi su opisane u tablici 2-1 zajedno s kategorijom uzorkovanja koju je potrebno koristiti.

Tablica 2-1 Grupe uzoraka materijala za laboratorijska ispitivanja (European Standard, Final draft, prEN 1997-2)

Karakteristike tla / Razred	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Nepromijenjene karakteristike tla					
Veličina čestica	*	*	*	*	
Vlažnost	*	*	*		
Gustoća	*	*			
Posmična čvrstoća, stišljivost	*				
Karakteristike koje se mogu odrediti					
Slijed slojeva	*	*	*	*	*
Granice slojeva-opće	*	*	*	*	
Granice slojeva-detaljne	*	*			
Atterbergove granice, sadržaj organske tvari	*	*	*	*	
Vlažnost	*	*	*		
Gustoća, poroznost, propusnost	*	*			
Stišljivost, posmična čvrstoća	*				
Kategorije uzoraka prema EN ISO 22475-1	**A**				
			B		
					C

U slučajevima kada prethodna istraživanja ne daju dovoljno rezultata pristupa se in-situ terenskim ispitivanjima kao što su statički penetracijski pokus i piezokon (oznaka, eng.: CPT i CPTU), presiometarski pokus, standardni penetracijski pokus (SPP, eng. SPT), plosnati dilatometrom DMT i terenska krilna sonda (eng. FVT). U sljedećim poglavljima će detaljnije biti opisan pokus terenskom krilnom sondom.

2.2. **Određivanje nedrenirane posmične čvrstoće terenskim istraživačkim radovima**

Nedrenirana posmična čvrstoća određuje se tijekom izvedbe terenskih istraživačkih radova terenskom krilnom sondom. Osim nedrenirane posmične čvrstoće tim se uređajem

određuje još i senzitivnost tla, koja je definirana kao omjer vršne i rezidualne čvrstoće. Pokus krilnom sondom prema Eurokodu treba izvoditi pomoću sonde pravokutnog oblika koja se sastoji od 4 krilca postavljena pod međusobnim kutevima od 90°, koja se utiskuje u tlo do određene dubine i zatim rotira. Nakon zakretanja sonde, događa se slom po obodu krilaca te je u tom području tlo pregnječeno i može se izmjeriti rezidualna čvrstoća i izračunati osjetljivost glina.

Pokus krilnom sondom namijenjen je uglavnom za malo do srednje tvrda tla, ali može se koristiti i za određivanje nedrenirane posmične čvrstoće čvrstih glina, muljeva i glacijalnih tala.

2.3. **Ocjena i korištenje rezultata ispitivanja terenskom krilnom sondom**

Pokus određivanja nedrenirane čvrstoće tla terenskom krilnom sondom izvodi se po normiranom postupku (na pr. EN ISO 22476-9). Bilo kakva odstupanja od normiranog postupka moraju biti zabilježena u komentaru. Rezultati moraju biti evaluirani prema normi EN ISO 22476-9. Potrebno je prikazati i rezultate drugih ispitivanja provedenih na istom području kao što su CPT (statički penetracijski pokus) ili SPT (standardni penetracijski pokus).

Ako se na temelju rezultata pokusa krilnom sondom određuje nosivost temeljne ploče, nosivost pilota ili nagiba pokosa mora se primijeniti metoda analitičkog projektiranja. Kako bi se dobile izvedene vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće iz rezultata pokusa krilnom sondom, rezultat ispitivanja mora se korigirati popravnim koeficijentom prema formuli 2-1.

$$C_u=\mu C_{ft} \qquad (2\text{-}1)$$

gdje je:

C_u – nedrenirana posmična čvrstoća (korigirana)

C_{ft} – nedrenirana posmična čvrstoća (izmjerena)

μ – korekcijski faktor

Korekcijski faktor μ određuje se na temelju iskustva. Postojeći korekcijski faktori su često povezani s granicom tečenja, indeksom plastičnosti, stupnjem konsolidacije i efektivnim naprezanjima (European Standard, Final draft, prEN 1997-2).

3. TERENSKA KRILNA SONDA

S obzirom da je jedan od ciljeva rada bio i uhodavanje procesa mjerenja krilnom sondom, u ovom radu je korištena norma ASTM 2573. Uređaj, postupak mjerenja i interpretacija rezultata su u ovoj normi znatno detaljnije objašnjeni nego u Eurokodu tako da je sam postupak izvedbe na taj način znatno olakšan.

ASTM „American Society for Testing and Materials International“ tj. Američko društvo za ispitivanje i materijale, međunarodna je organizacija za norme koja razvija i objavljuje tehničke norme za različite materijale, proizvode, sustave i usluge. ASTM je osnovan 1898. kao američki odjel Međunarodne udruge za ispitne materijale te prethodi drugim tijelima za standardizaciju kao što su BSI (1901), IEC (1906), DIN (1917), ANSI (1918), AFNOR (1926) i ISO (1947). (www.astm.org)

3.1. Općenito o krilnoj sondi

Pokus krilnom sondom (eng. Field Vane Test, skraćenica FVT) je prilično brza i ekonomična terenska metoda za određivanje vršne i rezidualne nedrenirane posmične čvrstoće mekih do srednje tvrdih tala. Pokus se provodi utiskivanjem sonde u tlo i laganim rotiranjem uz mjerenje momenta otpora. FVT mjerna oprema sastoji se od: uređaja za rotaciju krilca, mjerača okretnog momenta, šipki kojima se krilca utiskuju u tlo i rotiraju, te klizne spojke i krilaca. Umjesto klizne spojke može se koristiti i neki drugi sklop za eliminaciju ili mjerenje trenja duž šipki. Analiza granične ravnoteže koristi se za definiranje odnosa maksimalnog okretnog momenta i nedrenirane posmične čvrstoće tla s_u. Najčešće krilna sonda ima pravokutni oblik oštrica i visinu koja je dvostruko veća od promjera.

Sonda mora biti kreirana tako da se postigne omjer od 12% ili manje između ukupne cilindrične površine koja nastaje u tlu zakretanjem sonde i površine poprečnog presjeka krilaca sonde. Pokus se ne provodi za vlaknaste tresete, pijeske, šljunke, gline koje sadrže laminacije pijesaka ili kamenje (Barlett, 2002).

3.2. Povijesni razvoj

Prije nego što se pojavila prva krilna sonda bilo je teško odrediti posmičnu čvrstoću mekih i osjetljivih glina. Laboratorijska ispitivanja nisu bila primjenjiva obzirom da nije bilo moguće izvaditi dobar uzorak tla na terenu. Upravo zbog toga je razvijen pokus krilnom sondom. Prvi uređaj za mjerenje je kreirao John Olsson, švedski geotehničar.

Korištena je prvi puta 1919. godine tijekom izgradnje Lidingeo mosta u Stockholmu. U Velikoj Britaniji takav uređaj se koristio 1944. u vojne svrhe kako bi se ispitala mobilnost (prohodnost) vojnih vozila. Krilna sonda kakva se danas koristi predstavljena je 1948. u Rotterdamu. Popravljena verzija uređaja pojavila se dvije godine kasnije. Originalni Cadling uređaj koji je kreiran za meka tla utiskivan je u tlo bez predbušenja. Šipka je bila obložena kako bi se otklonio utjecaj trenja, a okretni moment se mjerio pomoću zasebnog instrumenta. Krilca sonde su bila vrlo tanka kako bi se otklonio poremećaj koji nastaje utiskivanjem uređaja u tlo. Uređaj je u početku bio nezaštićen te su naknadno uvedene zaštite koje su štitile sondu od šljunka prisutnog u glini (Barlett, 2002).

3.3. **Prednosti i nedostaci**

Krilna sonda ima mnogo prednosti kada se koristi u tlu za koje je namijenjena. Intenzivnije se počela koristiti tijekom posljednjih nekoliko desetaka godina, te postoji opsežna literatura na raspolaganju za usporedbe s drugim metodama i ispitivanjima. Pokus je prihvatljivija alternativa za određivanje karakteristika osjetljivih glina, čije se karakteristike mogu odrediti i laboratorijskim ispitivanjima. Najčešće se primjenjuje za gline sa $s_u \leq 50$ kPa (meke do srednje tvrde gline).

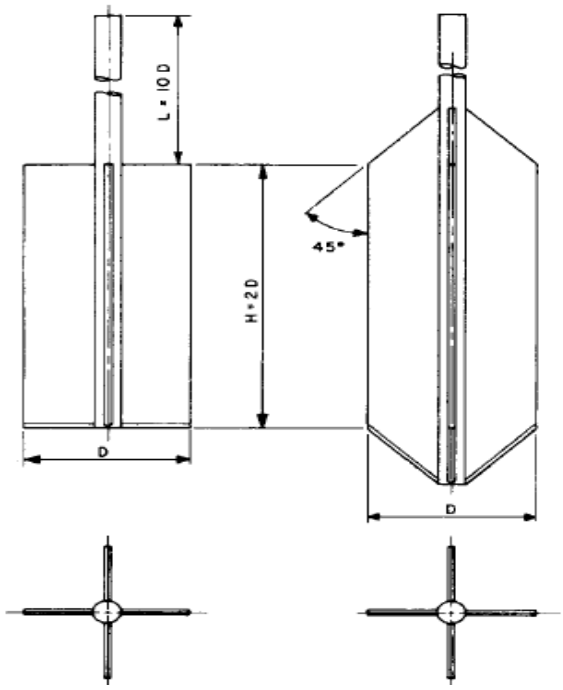
Prednosti ispitivanja su: mogućnost procjene nedrenirane čvrstoće tla, jednostavnost izvedbe i opreme, ekonomska isplativost, brzina metode i određivanje in-situ osjetljivosti glina. Nedostaci su: ograničena primjena samo na gline i mješavine drugih materijala s glinama; podložnosti pogreškama u mjerenjima provedenim u slojevima pijeska i tlima u kojima su razvijene pukotine; nakon mjerenja potrebno je korigirati vrijednosti izmjerene nedrenirane posmične čvrstoće.

Pokus ima određena ograničenja pri određivanju karakteristika tla. Moguće greške pri mjerenju se mogu javiti zbog trenja na kontaktu šipke i tla ili loše kalibracije pri određivanju okretnog momenta. Pored toga, ne zna se točan uzrok sloma tla pri izvođenju pokusa pa je zato važna korelacija rezultata in-situ i laboratorijskih ispitivanja. Vrlo često se uz krilnu sondu koristi i SPT pokus s obzirom da se u jednoj izbušenoj bušotini mogu napraviti oba ispitivanja, te se troškovi na taj način optimiziraju (Barlett, 2002).

3.4. **Oprema**

Lopatica se sastoji od četiri krilca koja su obično izrađena od čelika ili različitih legura čelika kao što su nikal-krom ili korištenjem različitih postupaka obrade čelika kao što je stvrdnjavanje koje se može koristiti za smanjenje debljina noža. Krajevi lopatice mogu biti ravni ili suženi kao što je prikazano na slici 3-1. Dimenzije lopatica su sljedeće:

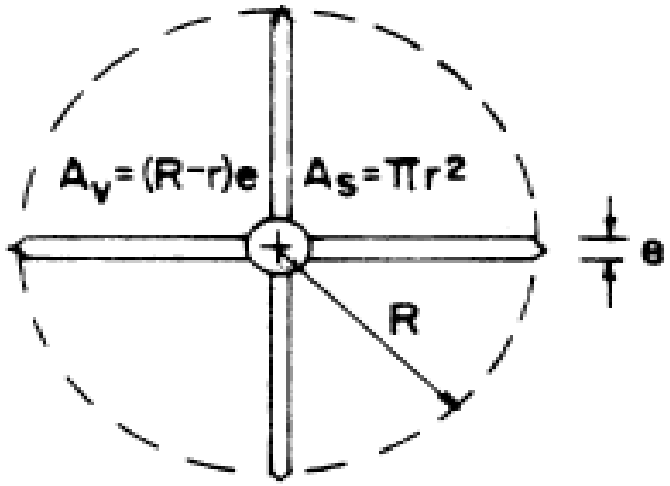
- Promjer noža, D: 35 do 100 mm
- Promjer vratila, d: 12,5 do 16,5 mm
- Visina krila, H: $1D \leq H \leq 2{,}5D$
- Kut nagiba krajeva, i: obično 0 (pravokutni) ili 45 stupnjeva (suženi)



Slika 3-1 Geometrija krilne sonde s pravokutnom i trokutnom oštricom (Barlett, 2002)

Za dobru raspodjelu okretnog momenta, potrebno je odabrati promjer krila koji je dovoljno velik da osigura optimalnu raspodjelu okretnog momenta. Odabrani promjer je izravno vezan uz konzistenciju tla koje se ispituje. Za mekša tla potrebne su veće veličine dok su kod čvršćih tala potrebna manja krilaca. Maksimalna debljina oštrice je ograničena na e <3 mm, a prosječna debljina mora biti e = 2 mm. Rub oštrice lopatica ili dimenzija (e) može se sužavati da bude tanji na rubovima kako bi se tlo što manje poremetilo pri utiskivanju. Promjer vratila (d) iznad vrha noževa s lopaticama mora biti manji od 17 mm i ne smije prelaziti 14 mm u središtu krila. Rubovi krila i varovi moraju biti dovoljno mali kako bi se smanjile smetnje u tlu tijekom umetanja. Omjer idealne cilindrične površine

nastale zakretanjem krilaca i površine krilaca, V_A, mora biti manji od 12% (slika 3-2). S oštricom koja se sužava na krajevima omjer površine, V_A može biti smanjen na manje od 10%. Udaljenost od vrha ruba lopatice do šipke za zakretanje je 5d gdje je d promjer lopatice na vrhu. Donji rub krila lopatica može se izoštriti kako bi se olakšalo prodiranje u tlo.



$$V_A = \frac{4(R-r)e + \pi r^2}{\pi R^2}$$

Slika 3-2 Prikaz omjera površine krilca sonde (ASTM D 2573)

Okretni moment mora biti primijenjen preko šipki do lopatica. To se postiže uređajem za nanošenje okretnog momenta postavljenim na površini. Poželjno je primijeniti okretni moment s vanjskim pogonom. U nedostatku pogona, prihvatljivo je nanošenje okretnog momenta ručno. Neki mjerni uređaji, podatke okretnog momenta mogu odmah pohraniti na računalo dok se kod ručno nanesenog okretnog momenta podaci očitavaju pomoću prstena i brojčanih mjerača. Automatski sustavi za čitanje imaju prednost nad sustavima za ručno čitanje, jer se smanjuje mogućnost pogreške i generira se stalni zapis tijekom izvedbe pokusa.

Krilca su povezana s površinom pomoću čeličnih šipki za nanošenje okretnog momenta. Tipični promjer šipke je u rasponu od 18 do 25 mm. Šipke moraju imati dovoljan promjer tako da njihova granica elastičnosti ne bude prekoračena kada se nanese maksimalna sila. Šipke mogu biti presvučene kućištem malog promjera kako bi se smanjilo trenje. Štapovi moraju biti opremljeni dobro podmazanim ležajevima kako bi nesmetano prolazili kroz

kućište. Kućište treba omogućiti odzračivanje zbog tlakova. Mjerenje trenja šipke moguće je jedino pri uvjetima bez bočnog opterećenja.

Spojnica između lopatice i šipke može stvarati trenje. Uređaj koji se koristi je namijenjen da ne zakreće krilca sonde do određenog stupnja rotacije, najčešće 15 stupnjeva, i tako omogućuje određivanje trenja šipke prije provođenja pokusa. Ovakvo mjerenje trenja šipke prije pokusa je važno kako bi se kasnije lakše uspostavila veza dobivenih rezultata i utjecaja trenja.

Za pokus koji se izvode pomoću bušaće garniture, potrebno je opremiti šipke za nanošenje okretnog momenta usmjerivačima kako bi se osiguralo okomito utiskivanje sonde u tlo. Usmjerivači su kreirani za podupiranje, uz istovremeno minimiziranje trenja na šipkama kada se rotira te moraju biti manjeg promjera od promjera bušotine (ASTM D 2573).

3.5. **Postupak ispitivanja**

Ispitivanje terenskom krilnom sondom se može izvesti u prethodno izbušenoj bušotini, utiskivanjem s površine, ili bušenjem kroz kućište. Kod izvedbe pokusa, bušenje treba zaustaviti na dubini ispitivanja tako da vrh sonde može prodrijeti u neporemećeno tlo do dubine najmanje pet puta veće od vanjskog promjera kućišta. Sondu treba potisnuti s dna bušotine jednim potiskom do dubine na kojoj će se pokus izvoditi. Utiskivanje treba obaviti bez primjene udaraca, vibracija ili rotacije. Ne smije se nanositi okretni moment preko štapova za vrijeme utiskivanja.

Kod krilaca opremljenih kliznim spojnicama, nakon utiskivanja krilaca, prvi dio pokusa će biti nanošenje okretnog momenta i mjerenje sile potrebne za zakretanje šipke. Potrebno je zabilježiti trenje štapa. Nakon što lopatica dosegne dubinu ispitivanja, pokus odnosno rotaciju krilaca treba obaviti u prvih 5 minuta. Kada je uređaj postavljen na traženu poziciju nanosi se okretni moment brzinom 0,1°/ s. Dopuštene varijacije su u rasponu od 0,05 do 0,2°/s. Najčešće se stanje sloma dosegne u vremenu od 2 do 5 minuta od pokretanja rotacije, osim u vrlo mekim glinama, gdje vrijeme do sloma može biti od 10 do 20 min. U tvrđim materijalima, koji dostižu slom pri malim deformacije, poželjno je smanjiti kutnu brzinu kako bi se omogućilo očitavanje naprezanja. Tijekom rotacije, sondu je potrebno držati na konstantnoj visini te zabilježiti maksimalni zakretni moment. Kod opreme s vizualnim očitanjima rezultata (bez kontinuiranog zapisa) poželjno je zabilježiti srednje vrijednosti momenta u intervalima od 15 s ili češće ako to dopuštaju uvjeti. Nakon

određivanja maksimalnog okretnog momenta, rotirati sondu brzo 5 do 10 puta s ciljem određivanja rezidualne čvrstoće. Određivanje rezidualne čvrstoće treba započeti odmah po završetku brze rotacije, najkasnije u roku od 1 minute (ASTM D 2573).

3.6. **Proračun**

Proračun se bazira na dvije formule koje ovise o obliku sonde. Nedrenirana posmična čvrstoća (S_u) za pravokutni oblik sonde računa se pomoću formule 3-1.

$$s_u = \frac{6T_{max}}{7\pi D^3} \tag{3-1}$$

gdje je:

s_u - nedrenirana posmična čvrstoća (kPa)

T_{max} - maksimalna vrijednost izmjerenog okretnog momenta (Nm)

D - promjer krilca (mm)

Vrijednost T_{max} se korigira za određenu vrstu opreme i trenje štapa.

Za konusne i druge sonde sužene na oba kraja gdje je samo dno konusno, kao i za romboidna krila za bilo koje kutove, proračun je prikazan formulom 3-2.

$$s_u = \frac{12T_{max}}{\pi D^2\left(\frac{D}{COS(i_T)}+\frac{D}{COS(i_B)}+6H\right)} \tag{3-2}$$

gdje je:

s_u - nedrenirana posmična čvrstoća (kPa)

T_{max} - maksimalna vrijednost izmjerenog momenta ispravljenog za vrijednosti opreme i trenje štapa (Nm)

D - promjer krilca (mm)

H - visina krilca (mm)

i_T - kut konusa na vrhu lopatica (°)

i_B - kut konusa na dnu lopatice (°)

Vršna nedrenirana posmična čvrstoća se izračunava iz vrijednosti maksimalnog zabilježenog okretnog momenta. Nakon mjerenja, sonda se zakreće velikom brzinom deset puta kako bi došlo do pregnječenja tla te se iz vrijednosti maksimalnog zabilježenog okretnog momenta računa rezidualna čvrstoća.

Osjetljivost, S_T izračunava prema formuli 3-3.

$$S_T = \frac{s_u}{s_{ur}} \tag{3-3}$$

gdje je:

S_T - osjetljivost (bezdimenzionalna veličina),

s_u - vršna nedrenirana posmična čvrstoća (kPa)

s_{ur} - rezidualna nedrenirana posmična čvrstoća (kPa) (ASTM D 2575)

3.7. **Interpretacija**

Postoje mnoge pretpostavke o proračunu nedrenirane posmične čvrstoće iz rezidualnog okretnog momenta uključujući:

- Tlo je nedrenirano tj. ne odvija se proces konsolidacije tijekom utiskivanja sonde i obavljanja pokusa
- Nisu prouzrokovani nikakvi poremećaji u tlu tijekom bušenja ili postavljanja sonde
- Zona pregnječenja oko sonde je vrlo mala
- Nije došlo do progresivnog sloma tako da je maksimalni okretni moment povezan s mobiliziranom posmičnom čvrstoćom na cilindričnoj površini
- Tlo se nalazi u izotropnom stanju naprezanja

Vrlo je važno da izmjerena nedrenirana čvrstoća bude popravljena prije upotrebe u analizi stabilnosti koja uključuje nasipe na mekom tlu, određivanje nosivosti i stabilnosti iskopa u mekim glinama. Mobilizirana posmična čvrstoća je opisana izrazom 3-4.

$$\tau_{mobilizirano} = \mu_v(s_u) \quad (3\text{-}4)$$

gdje je:

μ_v - empirijski faktor korekcije koji je povezan s indeksom plastičnosti (PI) i/ili granicom tečenja (LL)

s_u - vršna nedrenirana posmična čvrstoća (kPa)

Na temelju opsežnog pregleda čimbenika i odnosa koji utječu na mjerenje u glinama s indeksom plastičnosti većim od 5% preporučuje se izraz 3-5.

$$\mu_v = 1{,}05 - b(PI)^{0{,}5} \quad (3\text{-}5)$$

gdje je:

b - faktor brzine koji ovisi o vremenu do sloma (t_f) i izračunava se prema izrazu 3-6.

$$b = 0{,}015 + 0{,}0075 \log t_f \quad (3\text{-}6)$$

gdje je:

t_f - vrijeme do sloma (min)

Osjetljivost, S_T, se temelji na omjeru izmjerene vršne i rezidualne čvrstoće i nije korigirana, nego se u proračunu koriste „sirovi“ mjereni podaci (ASTM D 2573).

3.8. **Terenski izvještaj**

Terenski izvještaj je dokument koji se koristi za bilježenje podataka tijekom istražnog bušenja i uzorkovanja. Za svaki pokus krilnom sondom u terenskom izvještaju moraju biti navedeni podaci kao što su datum ispitivanja, broj bušotine, ime nadzornog inženjera i izvođača radova. Vezano za opremu koja se koristi potrebno je navesti veličinu i oblik korištene lopatice (dvostruko suženi, jednostrano suženi ili pravokutni), opis opremljenosti lopatica i napretka, vrstu metode (s kućištem ili bez njega). Pri početka provedbe ispitivanja potrebno je opisati metodu i način mjerenja okretnog momenta, odrediti dubinu vrha lopatica, dubina vrha krilca ispod kućišta ili dna bušotine i vrijeme od kraja utiskivanja do početka rotacije. Tijekom mjerenja bilježe se najveća očitanja i srednje očitanje okretnog momenta, vrijeme do sloma tla, vršna nedrenirana posmična čvrstoća S_u, rezidualna čvrstoća S_{ur}. Ukoliko je došlo do odstupanje od normiranog postupka važno je zabilježiti sve promjene (ASTM D 2573).

4. OPIS OPREME

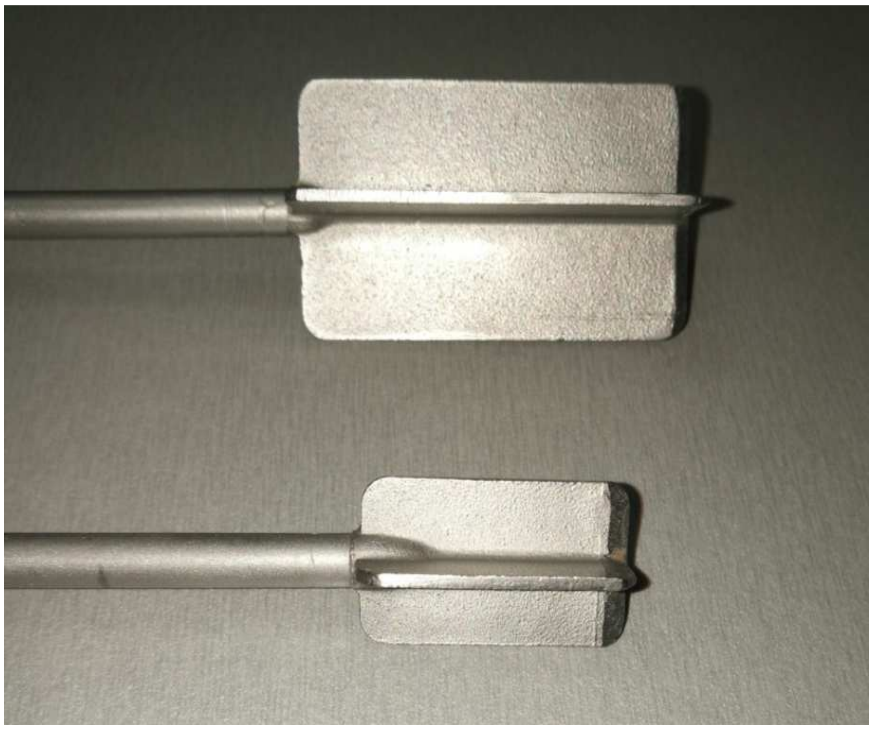
4.1. Krilna sonda tvrtke ELE

Sonda tvrtke ELE je prijenosni uređaj za određivanje nedrenirane posmične čvrstoće kohezivnih tala na terenu ili na neporemećenim uzorcima u laboratoriju. Uređaj se sastoji od okretne glave koja se zakreće ručno. Na njoj se nalaze dvije skale za izravno očitanje vrijednosti ovisno o tome koriste li se krilca promjera 19 mm ili 33 mm (slika 4-1), te nisu potrebne dodatne korekcije vrijednosti. Krilca veličine 19 i 33 mm, zajedno s produžnim šipkama, pričvrste se na okretnu glavu i utiskuju u tlo. Za potrebe istraživanja na većim dubinama pričvršćuju se šipke duljine 300 ili 1000 mm. Detaljan prikaz krilaca sonde nalazi se na slici 4-2.

Postupak ispitivanja počinje vertikalnim utiskivanjem sonde s krilcima u tlo uz što manje pomake. Minimalna dubina utiskivanja je 70-80 mm. Okretna glava se zakreće konstantnom brzinom dok ne dođe do sloma tla, što ostaje zabilježeno na mjernoj skali. Vrijednost se izravno očita i bilježi. Za određivanje rezidualne čvrstoće sonda se zakreće 10 puta vrlo velikom brzinom u smjeru kazaljke na satu, nakon čega se opet provodi prethodno opisani postupak. Mjerno područje uređaja, za krilca promjera 19 mm je 0-120 kPa, a za krilca promjera 33 mm je 0-28 kPa (http://www.ele.com/Department/soils-testing-equipment).



Slika 4-1 Okretna glava i krilca sonde ELE



Slika 4-2 Detaljan prikaz krilaca

4.2. **Krilna sonda tvrtke Eijkelkamp**

Mjerni dio uređaja načinjen je od spiralne opruge s maksimalnim okretnim momentom od 38 kg/cm. Kada je ručica zakrenuta, opruga se deformira te gornji i donji dio uređaja imaju jednak međusobni kutni pomak. Vrijednost pomaka ovisi o torziji koja zakreće sondu. Na skali se dobije očitanje čvrstoće tla. Gornja i donja polovica uređaja su povezane pomoću navoja. Mjerni dio je također povezan pomoću navoja i spojen na gornji dio uređaja pomoću dvije stope. Nulti položaj je određen linijom na gornjem dijelu uređaja. Kada se primjeni torzija mjerni dio uređaja (skala) se također pomiče s gornjem dijelom uređaja, te kada dođe do sloma mjerni dio ostaje u svom položaju zbog trenja u navojima i bilježi rezultat.

Tri veličine krilaca (slika 4-3) koje se koriste su:

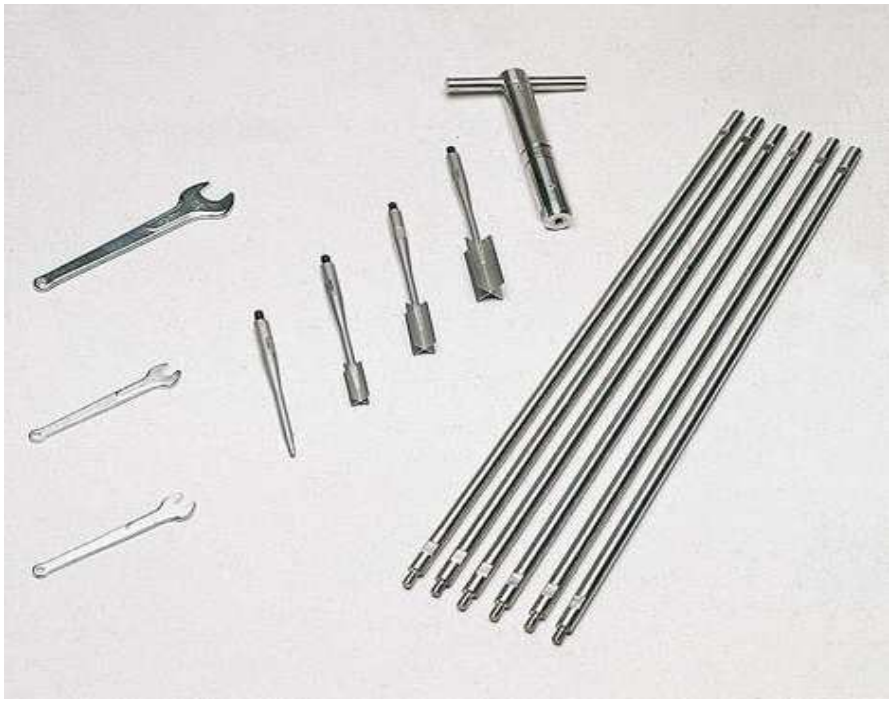
- 16×32 mm
- 20×40 mm
- 25,4×50,8 mm



Slika 4-3 Sonda s pripadajućim krilcima

Ukoliko se koriste krilca veličine 16×32 mm rezultati mjerenja moraju se pomnožiti s 2. Za krilca veličine 20×40 mm rezultati se izravno očitavaju na skali te nisu potrebne dodatne korekcije, dok se kod krilaca veličine 25,4×50,8 mm rezultati mjerenja množe s 0,5. Na ovaj način moguća su mjerenja posmične čvrstoće u vrijednostima, 0-260, 0-130,

0-65 kPa. Lopatice su zalemljene na osovinu koja se nastavlja na jednu ili više šipki duljine 0,5 m. Povezanost između osovina šipke i instrumenta je ostvarena pomoću navoja. Kako bi se uspostavila što bolja veza, šipke moraju biti postavljene čvrsto i povezane navojima. Maksimalna vrijednost nedrenirane čvrstoće koja može biti izmjerena uređajem je 260 kPa. U glinama sa ovakvom čvrstoćom potrebna je sila od 40-50 kg koja utiskuje sondu u glinu. Osovina krilne sonde je kreirana kako bi mogla preuzeti silu, ali u slučaju da se koriste šipke, moraju se provesti prethodna ispitivanja šipki na izvijanje. Prikaz sonde s krilcima i šipkama nalazi se na slici 4-4.



Slika 4-4 Prikaz krilne sonde s pripadajućom opremom tvrtke Eijkelkamp

4.2.1. Postupak ispitivanja

Postupak ispitivanja sastoji se od postavljanja odgovarajućih krila i šipke na instrument te postavljanja sonde u tlo na određenu dubinu ispitivanja bez zakretanja. Skala prije početka mjerenja mora biti postavljena u nulti položaj. Zakretanjem ručice u smjeru kazaljke na satu konstantnom brzinom zakreće se gornji i donji dio uređaja. Ukoliko se gornji dio instrumenta zakreće jednako kao i donji ili ukoliko se vrati u početni položaj postignuta je maksimalna posmična čvrstoća gline. Čvrstim držanjem ručice osigurava se vraćanje u nulti položaj i obavlja očitanje na skali. Bilježi se rezultat, zajedno s položajem ispitivanja i dubinom mjerenja. Mjerna skala se vraća u nulti položaj zakretanjem u smjeru

obrnutom od kazaljke na satu. Nakon prvog očitanja sonda se zakreće barem 25 okretaja nakon čega se skala vraća u nulti položaj i provode se još dva ispitivanja zakretanjem što sporijom brzinom. Manja vrijednost od ta dva mjerenja predstavlja rezidualnu čvrstoću. Nakon obavljenog mjerenja na određenoj dubini sonda se postavlja na drugi položaj te se postavljaju dodatne šipke ukoliko je potrebno. Ponavlja se isti proces mjerenja. Nakon zadnjeg provedenog ispitivanja sonda se vadi iz tla. Ako su mjerenja obavljena u mekim glinama sonda će se moći izvaditi ručno, ali ukoliko se radi o tvrđim glinama sondu je potrebno izvući pomoću mehaničkog uređaja.

Kada se mjeri posmična čvrstoća na vrlo velikim dubinama, trenja između gline i šipki može biti osjetno. Kako bi se trenje izmjerilo, šipke i osovina bez krilaca se umeću u tlo na dubinu na kojoj će se mjeriti posmična čvrstoća gline. Rezultat se naknadno reducira za vrijednost trenja nastalog od opreme (https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/field-inspection-vane-tester.html).

5. PROBNA LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Laboratorijska ispitivanja nedrenirane posmične čvrstoće krilnom sondom obavljena su na dva različita uzorka tla: na uzorku bentonitne gline (industrijski dobiveni granulat) i uzorku materijala donesenom sa terena. S obzirom da se radilo o potpuno novoj krilnoj sondi cilj ispitivanja je bio provjeriti kakve vrijednosti se dobivaju potpuno novom krilnom sondom tvrtke Eijkelkamp u odnosu na već korištenu krilnu sondu tvrtke ELE prije odlaska na teren. S obzirom na nedostatak iskustva u provođenju pokusa krilnom sondom probna laboratorijska ispitivanja su poslužila za uhodavanje procedure mjerenja. Cilj ispitivanja je bio odrediti ovisnost vršne i rezidualne čvrstoće o vlažnosti uzorka, te provedba usporedbe rezultata za dvije korištene sonde. Laboratorijska ispitivanja su obuhvaćala probna ispitivanja na uzorcima ugrađenim u čaše gdje nije bio prisutan utjecaj bočnog tlaka te se pratila samo promjena čvrstoće u ovisnosti o vlažnosti uzorka. Na obje vrste uzoraka dodatno su provedena ispitivanja indeksnih i fizičkih značajki.

5.1. Ispitivanje indeksnih i fizičkih značajki bentonitne gline

Prije provedbe pokusa krilnom sondom na uzorcima su obavljana ispitivanja indeksnih i fizičkih značajki:

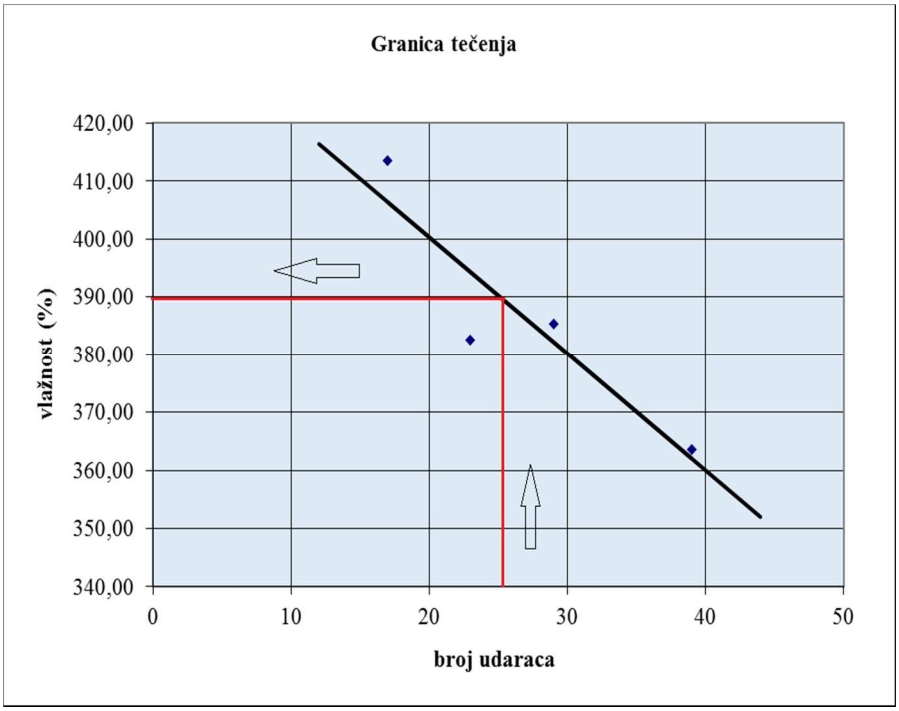
- granice plastičnosti materijala
- granulometrijski sastav tla

Granica tečenja (w_L) određena je korištenjem Casagrandeovog uređaja. U tablici 5-1 prikazani su rezultati ispitivanja dobiveni za četiri uzorka različite početne vlažnosti.

Tablica 5-1 Ovisnost broja udaraca i vlažnosti uzorka za ispitivanje granice tečenja (w_L)

Vlažnost uzorka w_n (%)	413,43	382,51	385,29	363,49
Broj udaraca (N)	17	23	19	39

Rezultati se unose na dijagram w (% - lin. mjerilo) i N (broj udaraca - log mjerilo), povuče se pravac i odredi vlažnost za 25 udaraca. Tako dobivena vrijednost predstavlja granicu tečenja w_L. Vrijednosti dobivene za uzorak bentonitne gline su obrađene grafički (slika 5-1) te je određena granica tečenja w_L=390,00 %.



Slika 5-1 Grafički prikaz ovisnosti broja udaraca i vlažnosti uzorka bentonitne gline

Granica plastičniosti određena je valjanjem valjčića. Vrijednosti vlažnosti valjčića za određivanje granice plastičnosti prikazani su u tablici 5-2.

Tablica 5-2 Vrijednosti vlažnosti valjčića za određivanje granice plastičnosti

Vlažnost uzoraka w_n (%)	35,0	38,17	28,99

Srednja aritmetička vrijednost vlažnosti uzoraka je vrijednost granice plastičnosti w_p i iznosi 35,05%.

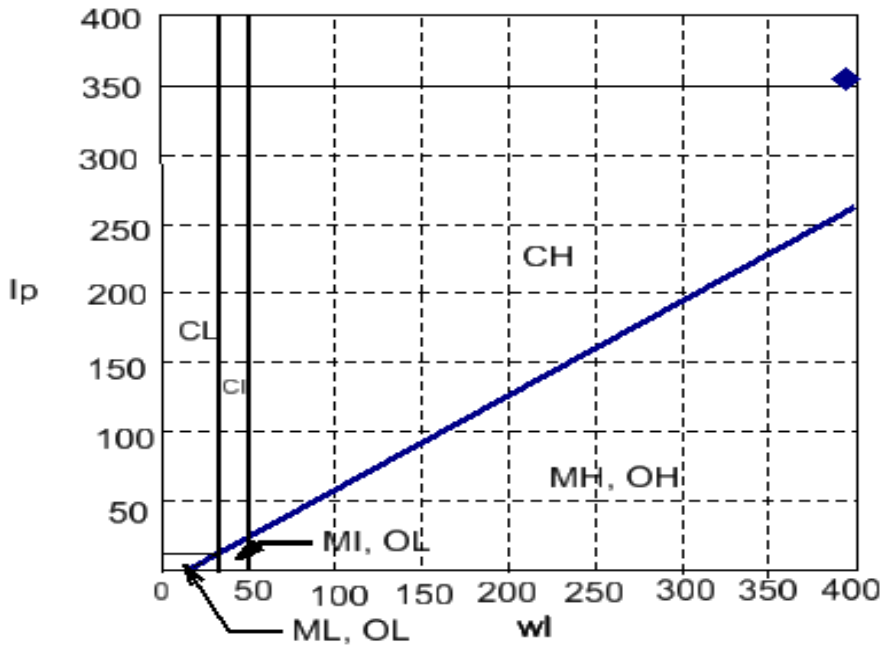
Iz dobivenih vrijednosti može se izračunati vrijednost indeksa plastičnosti Ip prema formuli 5-1.

$$Ip = W_L - W_P \quad (5\text{-}1)$$

$$Ip = 390{,}00 - 35{,}05$$

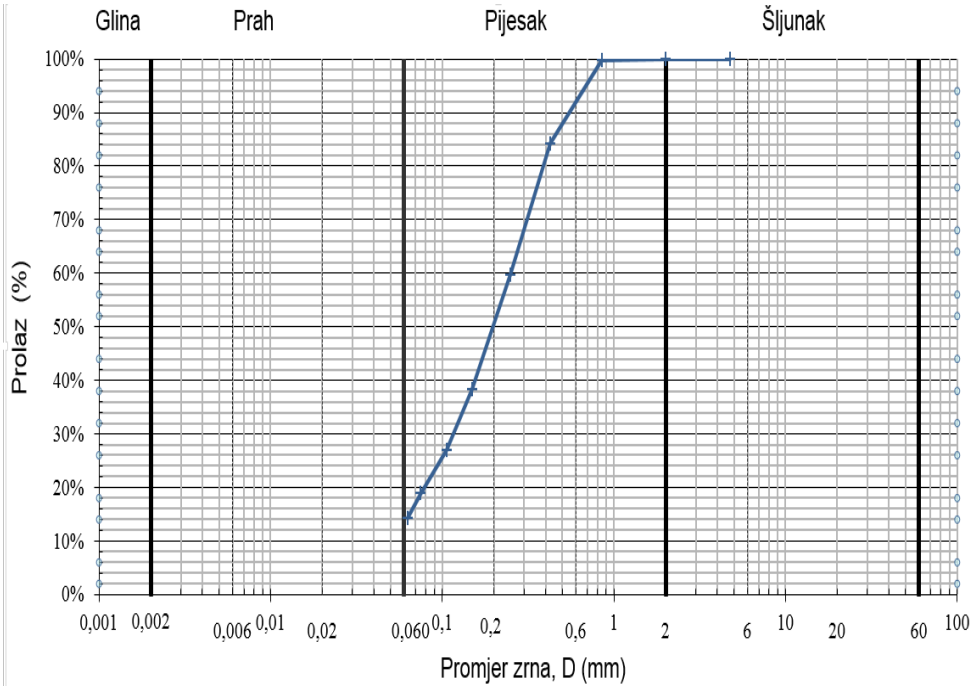
$$Ip = 354{,}95\%$$

Na temelju dobivenih vrijednosti može se zaključiti kako se radi o visokoplastičnom tlu. Klasifikacija materijala provedena je primjenom dijagrama plastičnosti (slika 5-2).



Slika 5-2 Dijagram plastičnosti

Određivanje granulometrijskog sastava tla suhim sijanjem provedeno je na uzorku bentonitne gline. Uzorak se prosijava na garnituri sita, a iz dobivenih podataka kreira se granulometrijska krivulja koja je prikazana na slici 5-3.



Slika 5-3 Granulometrijska krivulja uzorka bentonitne gline

Za klasifikaciju materijala potrebno je provesti očitanja promjera zrna kod 10 %, 30% i 60% prolaza. Promjer zrna D10 iznosi 0,05 mm, D30 iznosi 0,13 mm i D60 iznosi 0,25 mm. Za karakterizaciju granulometrijskog sastava tla definiraju se dva koeficijenta: koeficijent jednoličnosti i koeficijent zakrivljenosti. Oni se definiraju na temelju karakterističnih vrijednosti promjera zrna. Koeficijent jednoličnosti računa se prema formuli 5-2.

$$\mathrm{Cu}=\frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{5-2}$$

i iznosi 5; dok se koeficijent zakrivljenosti računa prema formuli 5-3.

$$\mathrm{Cc}=\frac{(D_{30})^2}{D_{10}\cdot D_{60}} \tag{5-3}$$

i iznosi 1,352. Iz dobivenih vrijednosti karakterističnih promjera zrna materijal se klasificira kao jednoliko do srednje graduirani pijesak (SU). Ovakva klasifikacija materijala je dobivena zbog toga što se radi o bentonitnoj glini koja nije u prirodnom stanju nego je granulirana industrijskim procesima.

5.2. **Ispitivanja posmične čvrstoće bentonitne gline krilnom sondom tvrtke ELE**

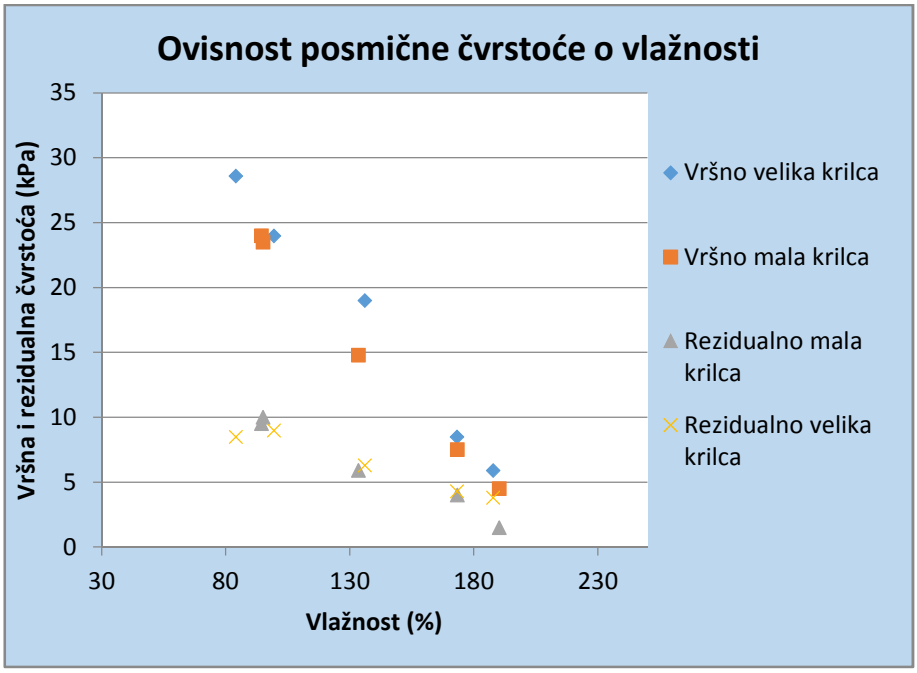
Pri ispitivanju bentonitne gline pripremljeno je pet uzoraka različite vlažnosti, za svaku vlažnost u dvije staklene čaše kako bi se mogla obaviti ispitivanja velikom i malom sondom. U laboratoriju su simulirani uvjeti s terena kako bi se uvidjela povezanost vlažnosti materijala i vršne i rezidualne čvrstoće tla.

Uzorci su ugrađeni u čaše i provedeno je ispitivanje nedrenirane posmične čvrstoće krilnom sondom tvrtke ELE. Korištena su mala krilca veličine 19 mm i velika krilca veličine 33 mm. U tablici 5-3 su navedene vrijednosti vlažnosti uzorka materijala uzetog neposredno u području sloma te vrijednosti očitane vršne i rezidualne posmične čvrstoće uz izmjereno vrijeme do sloma uzorka. Sva ispitivanja su obavljena na dubini 0,08 m od vrha ruba čaše u koju je materijal ugrađen.

Tablica 5-3 Rezultati mjerenja nedrenirane vršne i rezidualne posmične čvrstoće bentonitne gline sondom tvrtke ELE

Br.	Veličina sonde	Vlažnost (%)	Očitana vrijednost vršne čvrstoće (kPa)	Vrijeme do sloma za S_u (s)	Očitana vrijednost rezidualne čvrstoće (kPa)	Vrijeme do sloma za S_{ur} (s)
I	Mala	95,01	23,5	12,0	10,0	4,00
	Velika	84,11	28,6	38,0	8,50	10,0
II	Mala	94,46	24,0	8,00	9,50	3,00
	Velika	99,41	24,0	33,0	9,00	12,0
III	Mala	133,55	14,8	15,0	5,90	4,00
	Velika	136,09	19,0	56,0	6,30	7,00
IV	Mala	173,41	7,50	3,00	4,00	2,00
	Velika	173,24	8,50	12,0	4,30	5,00
V	Mala	190,32	4,50	2,20	1,50	1,70
	Velika	187,75	5,90	10,18	3,80	4,30

Izmjerene vrijednosti za sve izvedbe krilaca prikazane su na slici 5-4.



Slika 5-4 Ovisnost posmične i rezidualne čvrstoće i vlažnosti bentonitne gline dobivene sondom ELE

Očekivano, vrijednosti vršne i rezidualne čvrstoće smanjuju se s povećanjem vlažnosti uzorka. Vrijednosti posmične čvrstoće za ispitani materijal variraju u rasponu od 1,5 do 28,6 kPa . Vrijeme do sloma varira u rasponu od 2,20 do 38 sekundi te se ne može vidjeti jasna veza između vlažnosti uzoraka i vremena do sloma. Najveće vrijednosti vršne i rezidualne čvrstoće dobivene su ispitivanjem velikim krilcima sonde. Vrijednosti dobivene malim krilcima su manje kod ispitivanja vršne čvrstoće pri svim vlažnostima za ±20%. Odstupanja se javljaju pri vlažnostima manjim od 100 % za dvije točke mjerenja gdje je vrijednost rezidualne čvrstoće malim krilcima premašila vrijednost čvrstoće ispitivanjem velikim krilcima. Važno je uzeti u obzir i pogreške koje su se javljale tokom mjerenja, a odnose se na brzinu rotacije sonde. Kod većih uređaja postoji vanjski mehanički uređaj kojim se zakretni moment nanosi kontinuirano, točno određenom brzinom. Kod manjih uređaja kakvima smo se koristili, okretni moment se nanosi ručno te nije bilo moguće osigurati postupno istu brzinu zakretanja sonde kod svih ispitivanja. Najveći utjecaj na rezultate mjerenja ima vlažnost uzorka, dakle, sa povećanjem vlažnosti vrijednosti posmične čvrstoće se smanjuju. Ispitivanjem su dobiveni trendovi rasta vrijednosti kakvi su i očekivani. Također, pri povećanju vlažnosti osjetljivost gline je opadala.

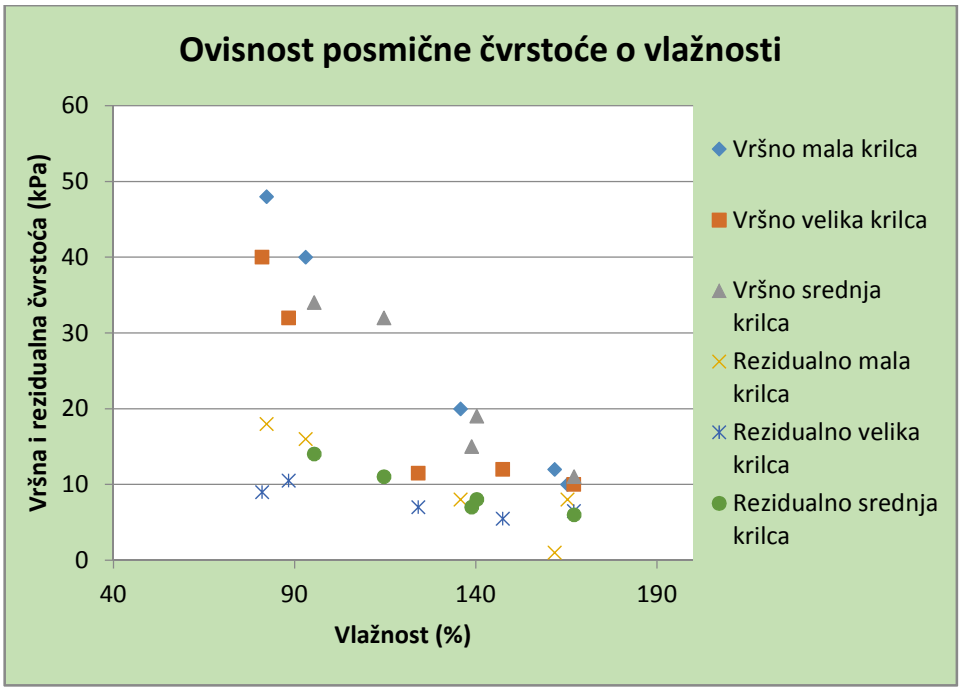
5.3. **Ispitivanje posmične čvrstoće bentonitne gline krilnom sondom tvrtke Eijkelkamp**

Pri ispitivanju bentonitne gline sondom Eijkelkamp pripremljeno je također pet uzoraka različite vlažnosti, za svaku vlažnost u tri staklene čaše kako bi se mogla obaviti ispitivanja za sve tri veličine krilaca. Vrijednosti vlažnosti uzoraka materijala u području sloma te vrijednosti posmične i rezidualne čvrstoće uz potrebna vremena do sloma su prikazane u tablici 5-4.

Tablica 5-4 Rezultati mjerenja nedrenirane vršne i rezidualne posmične čvrstoće bentonitne gline sondom tvrtke Eijkelkamp

Br.	Veličina sonde	Vlažnost (%)	Korigirana vrijednost vršne čvrstoće (kPa)	Vrijeme do sloma S_u (s)	Korigirana vrijednost rezidualne čvrstoće (kPa)	Vrijeme do sloma S_{ur} (s)
I	Mala	82,26	48,00	4,00	18,0	2,00
	Srednja	95,46	34,00	5,00	14,0	3,00
	Velika	81,00	40,00	10,0	9,00	4,00
II	Mala	93,070	40,00	4,00	16,0	2,00
	Srednja	114,64	32,00	7,00	11,0	2,00
	Velika	88,37	32,00	9,00	10,5	3,00
III	Mala	161,76	12,00	4,00	1,00	2,00
	Srednja	138,87	15,00	4,00	7,00	2,00
	Velika	124,09	11,50	4,00	7,00	2,00
IV	Mala	135,77	20,00	4,00	8,00	2,00
	Srednja	140,31	19,00	2,00	8,00	2,00
	Velika	147,45	12,00	4,00	5,50	2,00
V	Mala	165,26	10,00	3,00	8,00	2,00
	Srednja	167,13	11,00	3,00	6,00	2,00
	Velika	167,03	10,00	4,00	6,50	2,00

Izmjerene vrijednosti za sve izvedbe sondi prikazane su na slici 5-5.



Slika 5-5 Ovisnost vršne i rezidualne posmične čvrstoće i vlažnosti bentonitne gline dobivene sondom Eijkelkamp

Ispitivanjem sa sve tri veličine krilaca dobivene su približno iste vrijednosti neovisno o odabiru pojedinog krilca sonde. Pri mjerenju vršne posmične čvrstoće vrijednosti rastu sa smanjenjem vlažnosti tla u rasponu od 10 do 48 kPa, dok je trend rasta sa smanjenjem vlažnosti pri mjerenju rezidualne posmične čvrstoće znatno manji i varira u rasponu od 1 do 18 kPa. Vrijednost vršne čvrstoće poprima maksimalnu vrijednost pri ispitivanju najmanjim krilcima veličine 16×32 mm i iznosi 48 kPa. Minimalna vrijednost posmične čvrstoće kod sve tri veličine sonde je gotovo ista i iznosi približno 10 kPa. Odstupanja u vrijednosti maksimalne posmične čvrstoće kod ispitivanja krilnom sondom Eijkelkamp moguća su zbog eventualnih grešaka tijekom izvođenja pokusa, a mogu se odnositi na brzinu rotacije ili nemogućnost održavanja sonde potpuno vertikalno tijekom obavljanja mjerenja. Vrijednosti rezidualne čvrstoće imaju vrlo slična odstupanja kao i vrijednosti vršne posmične čvrstoće.

Ispitivanjem na uzorku bentonitne gline s dvije različite sonde dobivene su različite vrijednosti vršne i rezidualne čvrstoće tla. Krilnom sondom tvrtke Eijkelkamp vršna čvrstoća poprima znatno veće vrijednosti u odnosu na vršnu čvrstoću ispitivanjem sondom tvrtke ELE. S povećanjem vlažnosti uzorka razlika u rezultatima je veća. Maksimalna vrijednost vršne čvrstoće dobivena sondom ELE je 28,6 kPa, dok je kod ispitivanja sondom Eijkelkamp ta vrijednost 48 kPa. Razliku u rezultatima je 20 kPa pri najmanjoj

vlažnosti i 5 kPa pri najvećoj vlažnosti. Vrijednosti rezidualne čvrstoće također poprimaju manje vrijednosti pri mjerenjima sondom ELE u odnosu na vrijednosti dobivena mjerenjima sondom Eijkelkamp ali su razlike između vrijednosti znatno manje s maksimalnim odstupanjem od 10 kPa. S obzirom da se radilo o industrijski granuliranoj bentonitnoj glini moguća su odstupanje zbog nedovoljne homogenizacije materijala i postizanja iste vlažnosti za sva ispitivanja. Razlika u izvedbi krilaca također utječe na dobivene rezultate. Sonde ELE imaju deblja krilca i zaoštrene rubove te lakše prodiru u materijal, dok su krilca sonde Eijkelkamp tanja ali nisu zaoštrena na rubovima što je jedan od mogućih razloga manjih vrijednosti vršne i rezidualne čvrstoće ispitivanjem tvrtke ELE.

5.4. **Ispitivanja fizičkih značajki na uzorku s terena**

Laboratorijska ispitivanja su obavljena na poremećenom uzorku materijala koji je donesen s terena u Zagrebu. Detaljnije će terenski radovi biti opisani u slijedećem poglavlju. Od laboratorijskih ispitivanja na ovom uzorku napravljeno je:

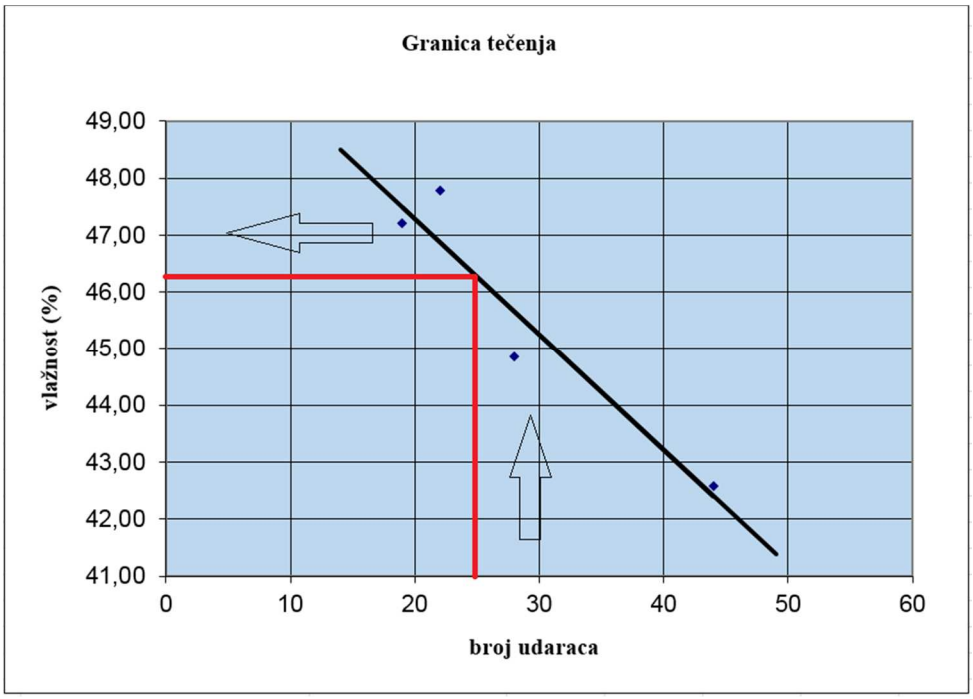
- ispitivanje granica plastičnosti
- određivanje granulometrijskog sastava tla areometriranjem i sijanjem
- određivanje posmične čvrstoće izravnim posmikom

Ispitivanje granica plastičnih stanja (Atterbergove granice) sastoji se od određivanja granice tečenja (W_L) i granice plastičnosti (W_P). Ovisnosti vlažnosti uzoraka i broja udaraca dobivene ispitivanjem granice tečenja Casagrandeovim uređajem prikazane su u tablici 5-5.

Tablica 5-5 Ovisnost broja udaraca i vlažnosti uzorka za ispitivanje granice tečenja (W_L)

Vlažnost uzorka w_n (%)	47,21	47,78	44,85	42,58
Broj udaraca (N)	19	22	28	44

Pomoću dobivenih vrijednosti kreiran je dijagram ovisnosti broja udaraca (N) i vlažnosti (%) uzoraka (slika 5-6) iz kojeg se može očitati granica tečenja w_L koja iznosi 46,3 %.



Slika 5-6 Grafički prikaz ovisnosti broja udaraca i vlažnosti uzorka

Za određivanje granice plastičnosti valjanjem valjčića uzorak se pripremi u mekoplastičnom stanju. Dobivene vrijednosti vlažnosti su prikazane u tablici 5-6.

Tablica 5-6 Vrijednosti vlažnosti valjčića za određivanje granice plastičnosti

Vlažnost uzoraka w_n (%)	22,38	23,24	24,15

Srednja aritmetička vrijednost vlažnosti uzoraka je vrijednost granice plastičnosti w_p i iznosi 23,26%.

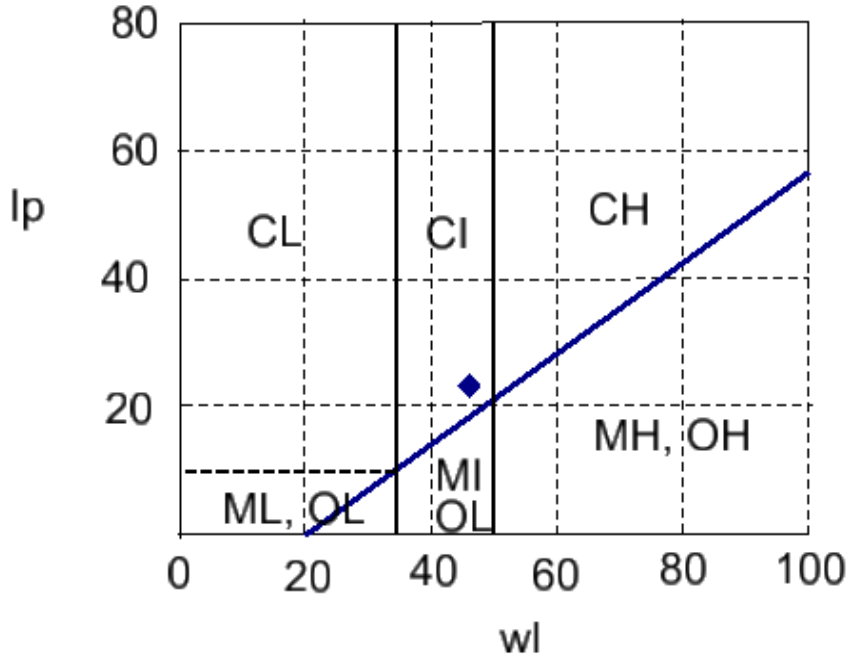
Iz dobivenih vrijednosti može se izračunati vrijednost indeksa plastičnosti Ip prema formuli 5-4.

$$Ip = W_L - W_P \quad (5\text{-}4)$$

$$Ip = 46{,}3 - 23{,}26$$

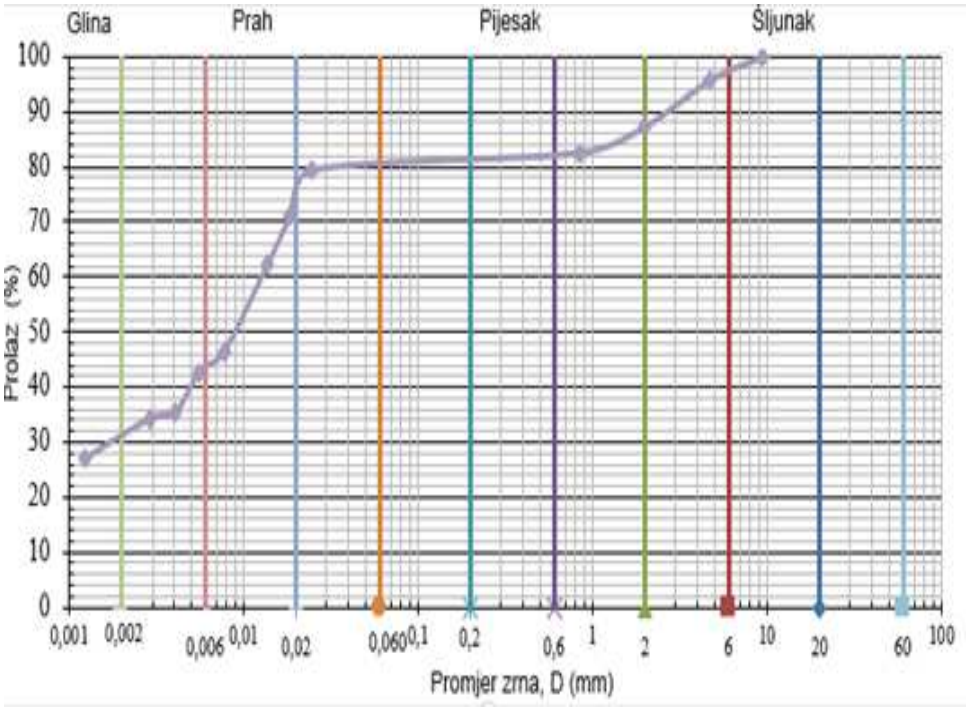
$$Ip = 23{,}04\%$$

Uzorak s ovakvim vrijednosti granice tečenja w_L i indeksa plastičnosti Ip klasificira se kao srednje plastično tlo (CI), a klasifikacija uzorka je prikazana dijagramom plastičnosti na slici 5-7.



Slika 5-7 Dijagram plastičnosti

Određivanje granulometrijskog sastava tla obavljeno je areometriranjem te suhim sijanjem uzorka. Granulometrijska krivulja nalazi se na slici 5-8.



Slika 5-8 Granulometrijska krivulja

Za klasifikaciju materijala potrebno je provesti očitanja promjera zrna kod 10 %, 30% i 60% prolaza. Promjer zrna D10 iznosi 0 mm, D30 iznosi 0,0018 mm i D60 iznosi 0,0065 mm. Za karakterizaciju granulometrijskog sastava tla definiraju se dva koeficijenta: koeficijent jednoličnosti i koeficijent zakrivljenosti. S obzirom da je vrijednost D10 jednaka 0 za ovaj uzorak nije bilo moguće drediti koeficijente Cu i Cc. Međutim iz granulometrijske krivulje može se očitati udjele pojedinih frakcija tla: 18% uzorka su čestice veličine šljunka, 6% pijeska, 45% praha i 31% gline. Uzevši u obzir analizu granulometrijske krivulje te prethodno navedene granice plastičnosti, zaključuje se da uzorak predstavlja pjeskovito-prahovitu glinu srednje plastičnosti (CI).

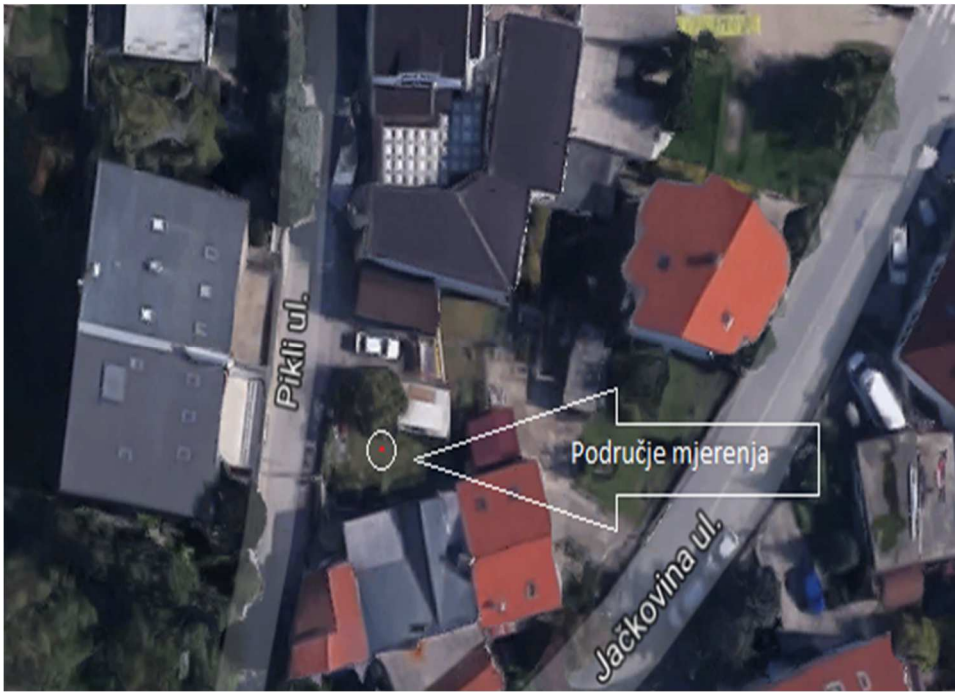
6. TERENSKA ISPITIVANJA

Nakon provedenih laboratorijskih ispitivanja i utvrđivanja ispravnosti opreme obavljena su terenska ispitivanja. Priprema se sastojala od pripreme dodatne opreme: čekića, lopate, GPS-a, oznaka za uzorke materijala, vrećica i kutija za transport uzoraka.

Priprema je također obuhvaćala kreiranje formulara za terenski izvještaj koji je prikazan u prilogu 1.

6.1. Ispitivanja terenskom krilnom sondom ELE na lokaciji u Zagrebu

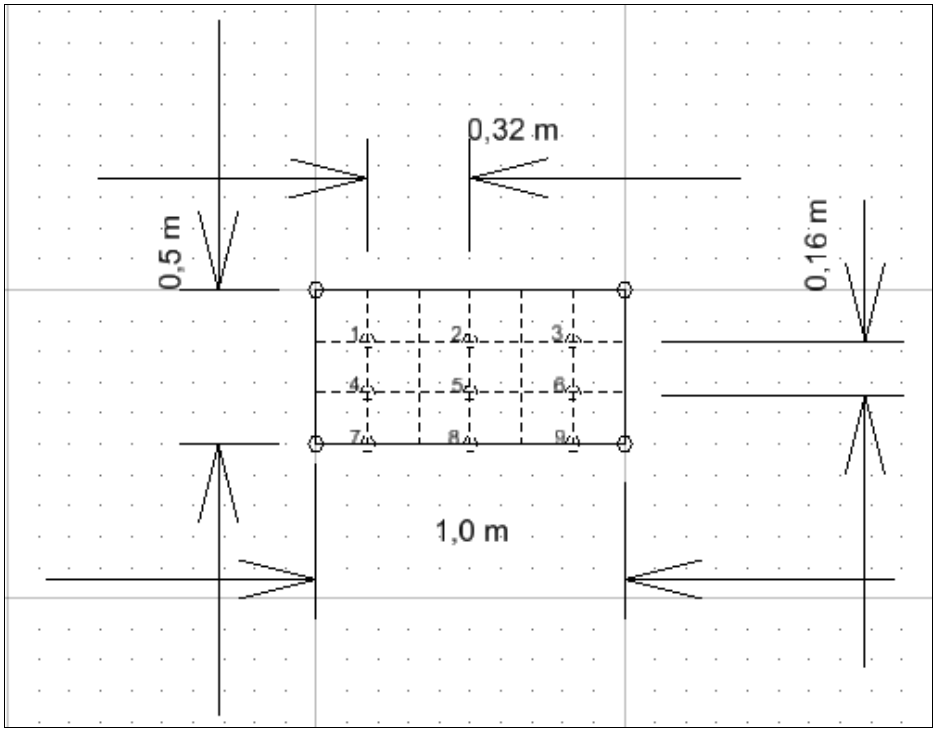
Terenska ispitivanja krilnom sondom obavljena su na lokaciji u Zagrebu koja je prikazana na slici 6-1.



Slika 6-1 Lokacija u Zagrebu na kojoj su obavljena terenska ispitivanja (https://www.google.com/earth/)

Za provođenje ispitivanja na terenu potrebno je skinuti gornji površinski sloj materijala zbog loših fizičko-mehaničkih karakteristika tako da su mjerenja obavljena na dubina 0,2 m ispod površine terena na rasteru prikazanom na slici 6-2 i 6-3 u točkama od 1 do 9. Kako bi se dobila što vjernija slika terena na kojem su ispitivanja obavljena kreiran je model pomoću programa Bentley Microstation kao što je prikazano na slici 6-2. Ispitivanja su obavljena samo malom krilnom sondom zbog velike čvrstoće i male vlažnosti tla. U tlu takvih karakteristika mjerenja velikom krilnom sondom nije moguće obavljati s obzirom da je mjerno područje uređaja 0-120 kPa, a vrijednosti čvrstoće tla su premašile

maksimalnu vrijednost. Ispitivanja su provedena na dubini 0,04 m i 0,08 m s dna prethodno poravnatog terena (slika 6-4). Rezultati dobiveni malom sondom prikazani su u tablici 6-1.



Slika 6-2 Raspored točaka mjerenja



Slika 6-3 Prikaz rastera s iskolčenim točkama na terenu

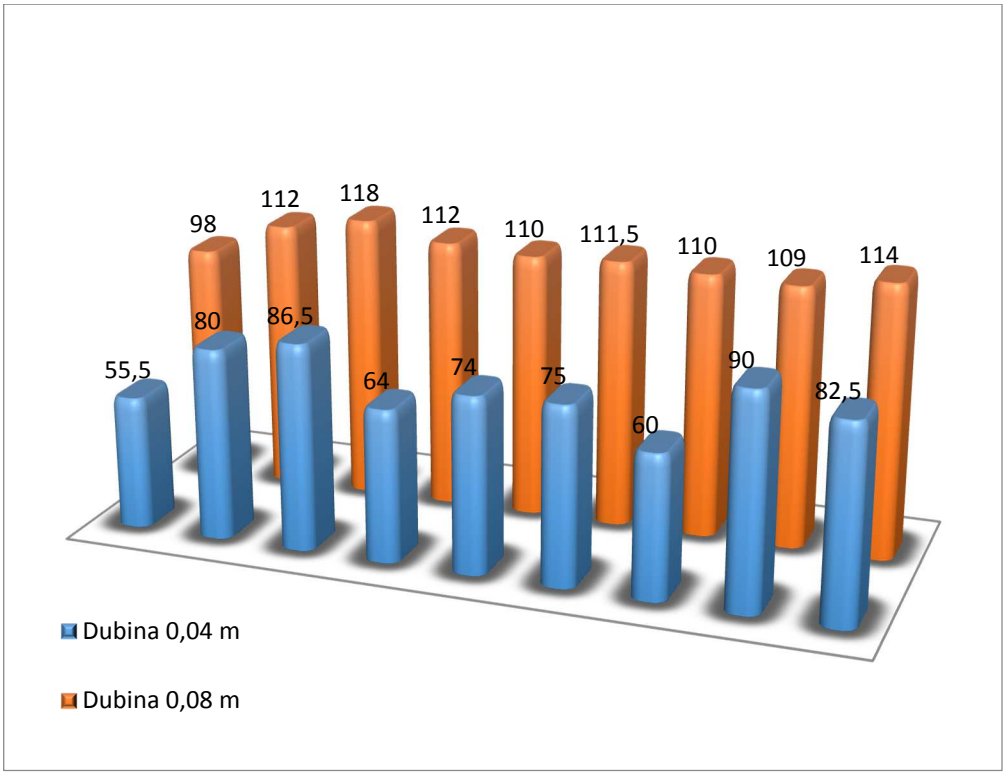


Slika 6-4 Krilna sonda utisnuta u tlo

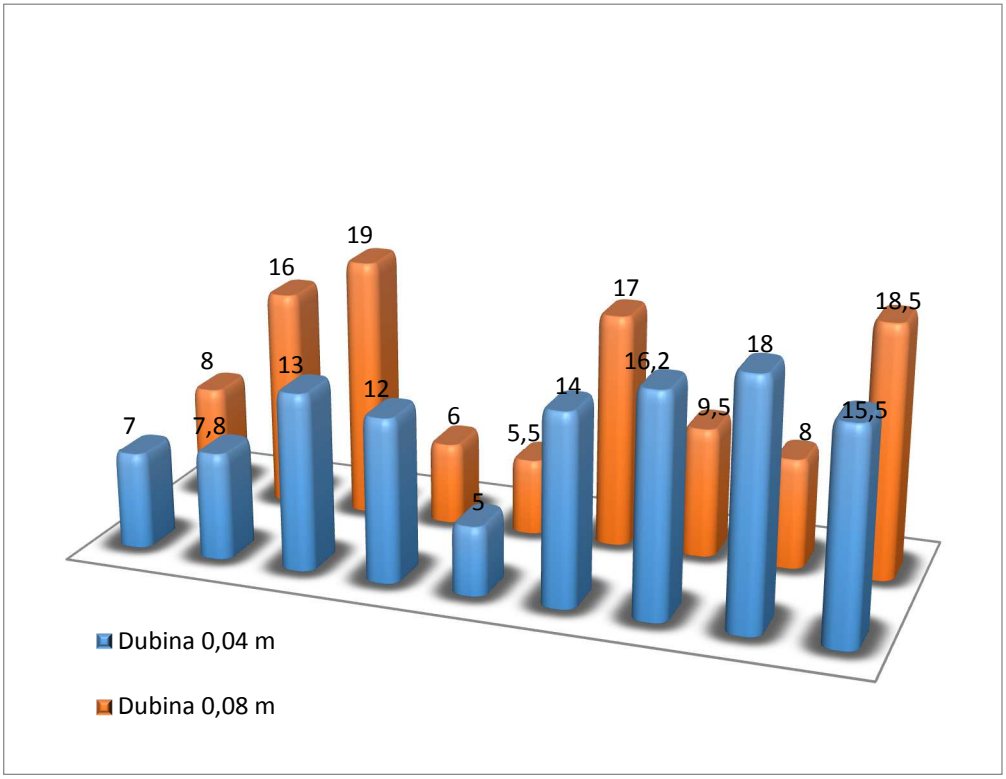
Tablica 6-1 Vrijednosti dobivene ispitivanjem krilnom sondom na terenu u Zagrebu

Br.	Dubina ispitivanja (m)	Očitana vrijednost vršne čvrstoće (kPa)	Vrijeme do sloma S_u (s)	Očitana vrijednost rezidualne čvrstoće (kPa)	Vrijeme do sloma S_{ur} (s)
1	0,04	55,50	18,81	7,00	2,80
	0,08	98,00	21,97	8,00	3,00
2	0,04	80,00	32,10	7,80	2,75
	0,08	112,00	41,50	16,00	5,82
3	0,04	86,50	19,48	13,00	3,21
	0,08	118,00	28,82	19,00	6,60
4	0,04	64,00	22,08	12,00	4,71
	0,08	112,00	27,20	6,00	2,85
5	0,04	74,00	21,70	5,00	1,62
	0,08	110,00	26,43	5,50	2,09
6	0,04	75,0	16,64	14,00	4,63
	0,08	111,50	21,74	17,00	5,25
7	0,04	60,00	10,54	16,20	5,75
	0,08	110,00	20,22	9,50	4,97
8	0,04	90,00	24,19	18,00	6,78
	0,08	109,00	21,69	8,00	2,52
9	0,04	82,50	22,53	15,50	5,13
	0,08	114,00	37,68	18,50	6,24

Na slici 6-5 i 6-6 prikazan je odnos vrijednosti vršne i rezidualne posmične čvrstoće za dvije dubine ispitivanja.

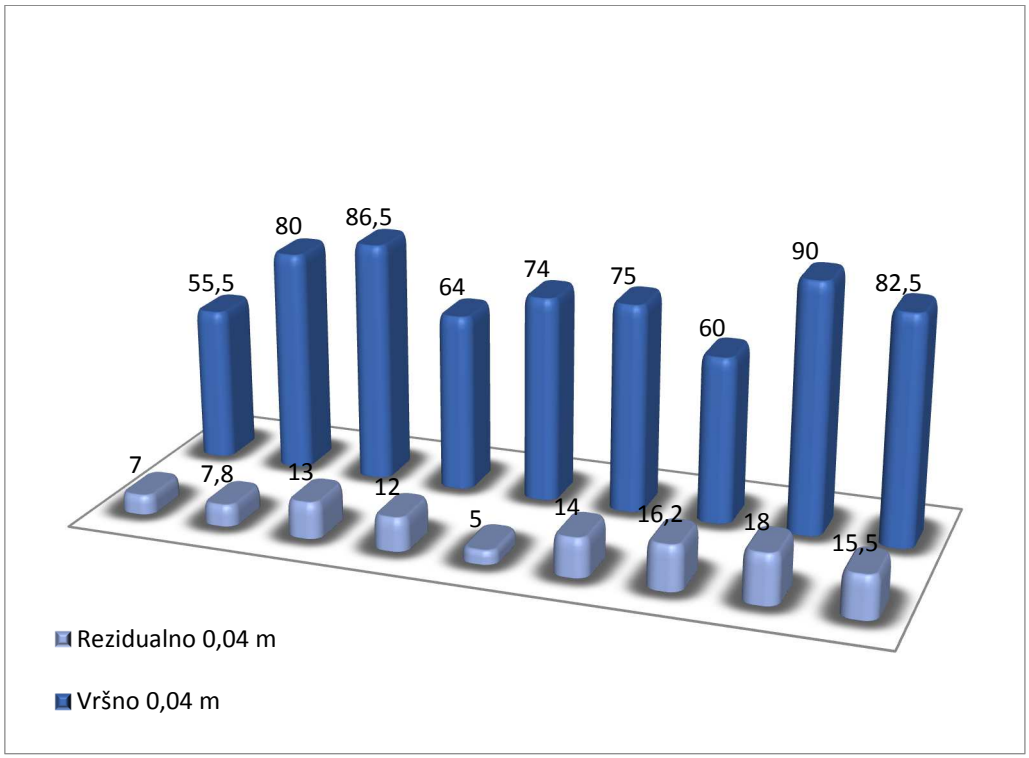


Slika 6-5 Prikaz vršne čvrstoće za dvije dubine ispitivanja

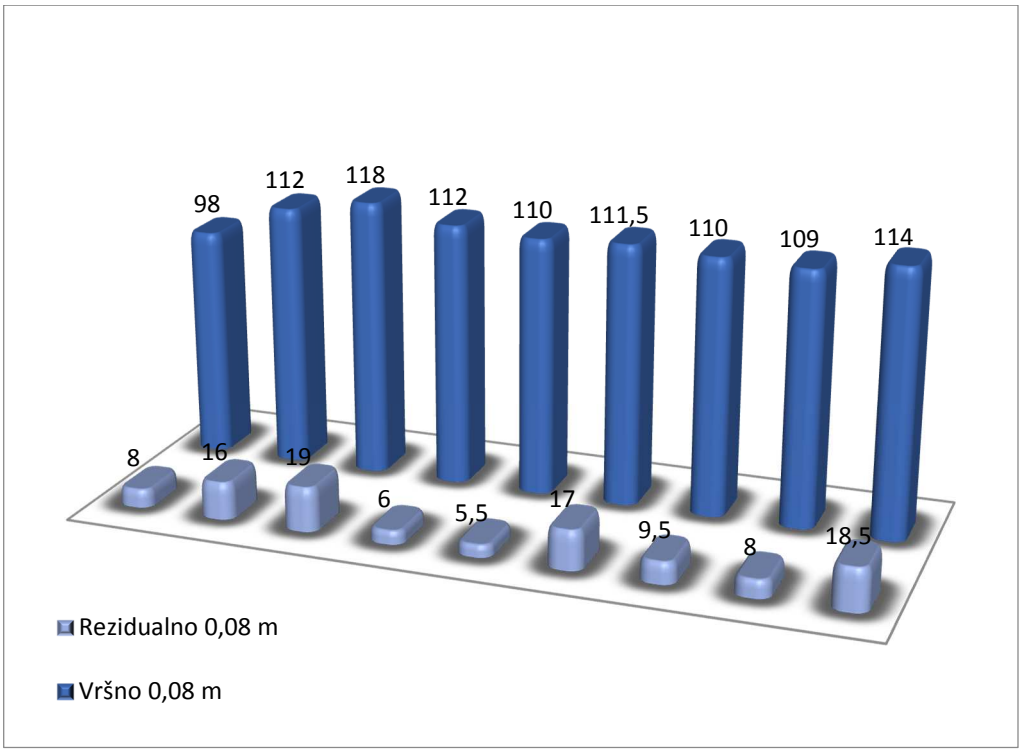


Slika 6-6 Prikaz rezidualne čvrstoće za dvije dubine ispitivanja

U svim točkama ispitivanja vršna čvrstoća poprima veće vrijednosti pri većim dubinama. Vrijednosti imaju porast od 50 do 100 % pri dubini 0,08 m u odnosu na vrijednosti na dubini 0,04 m. Ovakvi rezultati su očekivani s obzirom da bočna naprezanja rastu sa porastom dubini te određuju čvrstoću tla. Rezidualna čvrstoća uglavnom ostvaruje porast s povećanjem dubine. U točkama 4, 7 i 8 vrijednosti rezidualne čvrstoće su veće na manjoj dubini, što može biti uzrokovano pojavom šljunkovitog materijala na dubini 0,08 m te je u tim točkama izmjerena manja vrijednost rezidualne čvrstoće. Ovakav trend smanjenja vrijednosti s porastom dubini se pojavljuje kod mješavine glinovitih materijala sa šljunkom ili pijeskom kakav se nalazi na lokaciji gdje su ispitivanja obavljena.



Slika 6-7 Prikaz vršne i rezidualne čvrstoće na dubini 0,04 m



Slika 6-8 Prikaz vršne i rezidualne čvrstoće na dubini 0,08 m

Vršna čvrstoća je očekivano znatno veća od rezidualne i poprima vrijednosti od 8 do 10 puta veće. Maksimalna vrijednost vršne čvrstoće na dubini 0,04 m zabilježena je u točki 8 i iznosi 90 kPa, a najmanja u točki 1 i iznosi 55,5. Maksimalna vrijednost rezidualne čvrstoće je 18 kPa u točki 8, a najmanja u točki 5 i iznosi 5 kPa. Na dubini 0,08 m također je zabilježen očekivani porast vrijednosti vršne čvrstoće u odnosu na rezidualnu. Apsolutne vrijednosti vršne čvrstoće su veće na većeoj dubini. Vrijednosti vršne čvrstoće su veće na dubini 0,08 m za cca 40% u odnosu na vrijednosti na dubini 0,04 m. Rezidualne vrijednosti poprimaju gotovo iste vrijednosti pri obje dubine ispitivanja. S obzirom da je razlika između točaka mjerenja samo 0,04 m može se primijetiti veliki porast vrijednosti vršne čvrstoće u svim točkama ispitivanja.

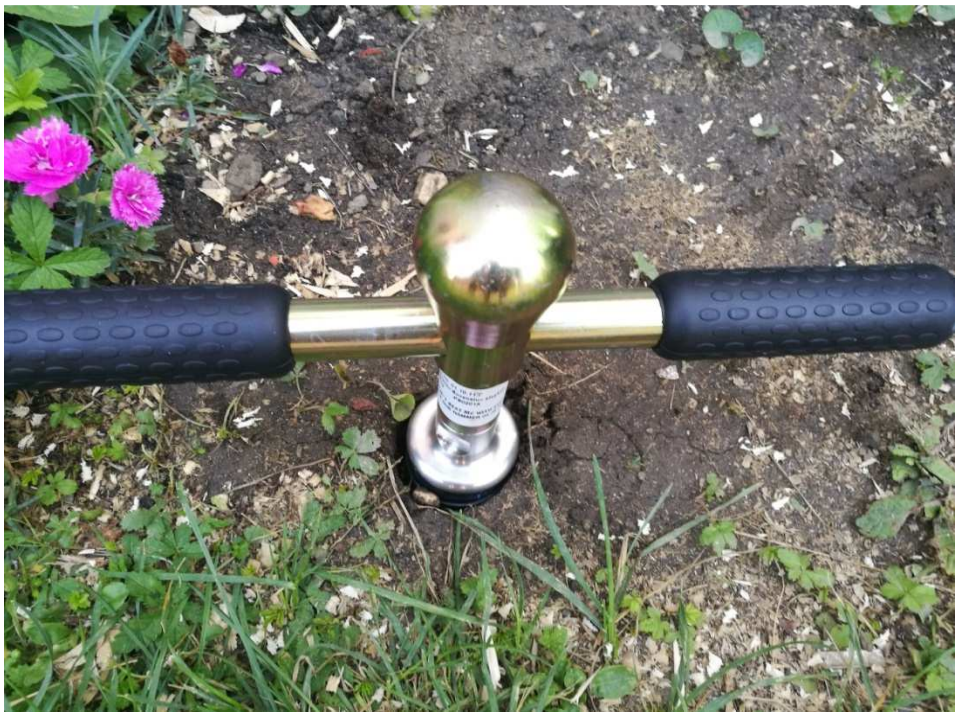
6.2. **Uzorkovanje tla**

Uzorkovanje tla obavljeno je na istoj lokaciji u Zagrebu na kojoj se provedena ispitivanja krilnom sondom ELE. Vrsta uzorkivača koja je korištena odgovara opisu uzorkivača iz norme ASTM D 3550. Radi se o uzorkivaču s debljim stjenkama kod kojeg imamo otvoreni tip cijevi. U cilindrični dio uzorkivača (2) umetne se folija s otvorom prema tlu koje se uzorkuje, priključi se rezni dio (1), glava sa priključkom (5) te ručka s

glavom za nabijanje (3). Preko gornjeg zaobljenog dijela nanosi se opterećenje maljem s gumenom ovojnicom (4) koja amortizira udarce i utiskuje uređaj do željene dubine (slika 6-9 i 6-10). Nakon što je uzorak ispunio foliju uzorkivač se vadi vertikalno prema gore uz što manje bočne pomake kako bi tlo ostalo u što boljem prirodnom stanju. Iz uzorkivača se vadi uzorak u foliji te se brtvi kako bi se sačuvala prirodna vlažnost što je prikazano na slici 6-11. Uzorak je potrebno čuvati na hladnom i tamnom mjestu i što prije dopremiti u laboratorij s ciljem održavanja reprezentativnosti tla koje se ispituje. Izvađeni uzorak je dopremljen s terena te je na njemu obavljeno ispitivanje izravnog posmika. S obzirom da je ispitivanje obavljeno s puno većim normalnim naprezanjem koje nije odgovaralo rasponu naprezanja koje je bilo prisutno na malim dubinama terenskih ispitivanja, ti se rezultati nisu mogli iskoristit za usporedbu s rezultatima dobivenim na terenu. Na uzorku materijala je provedena klasifikacija tla koja je detaljno opisana u poglavlju 5.4. (ASTM D 3550).



Slika 6-9 Uzorkivač sa pripadajućom opremom



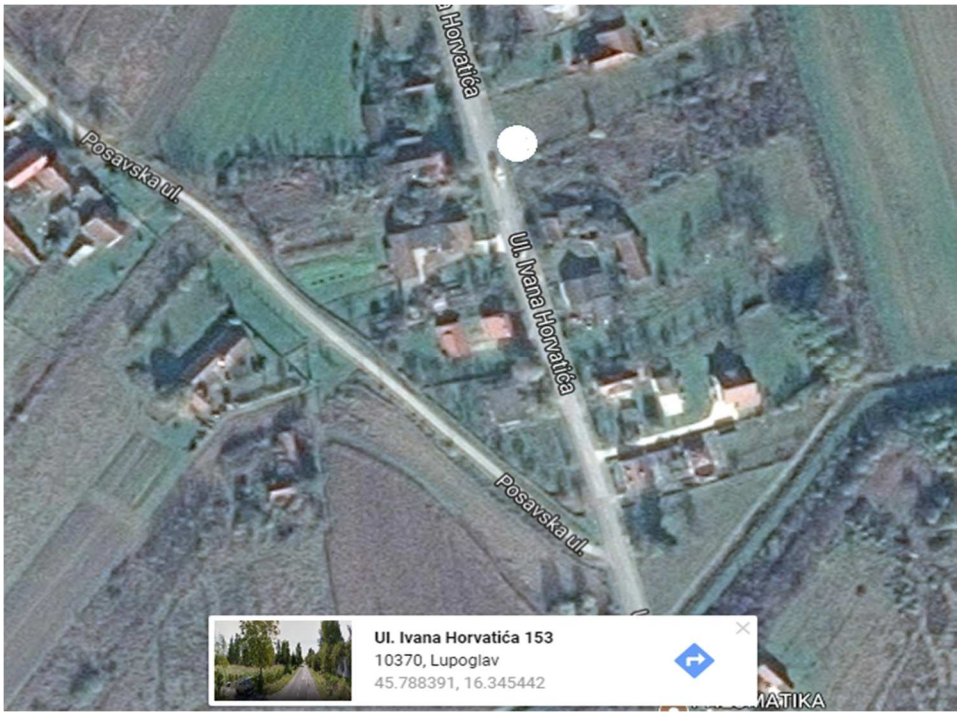
Slika 6-10 Uzorkivač utisnut u tlo



Slika 6-11 Uzorak tla u foliji izvađen na terenu

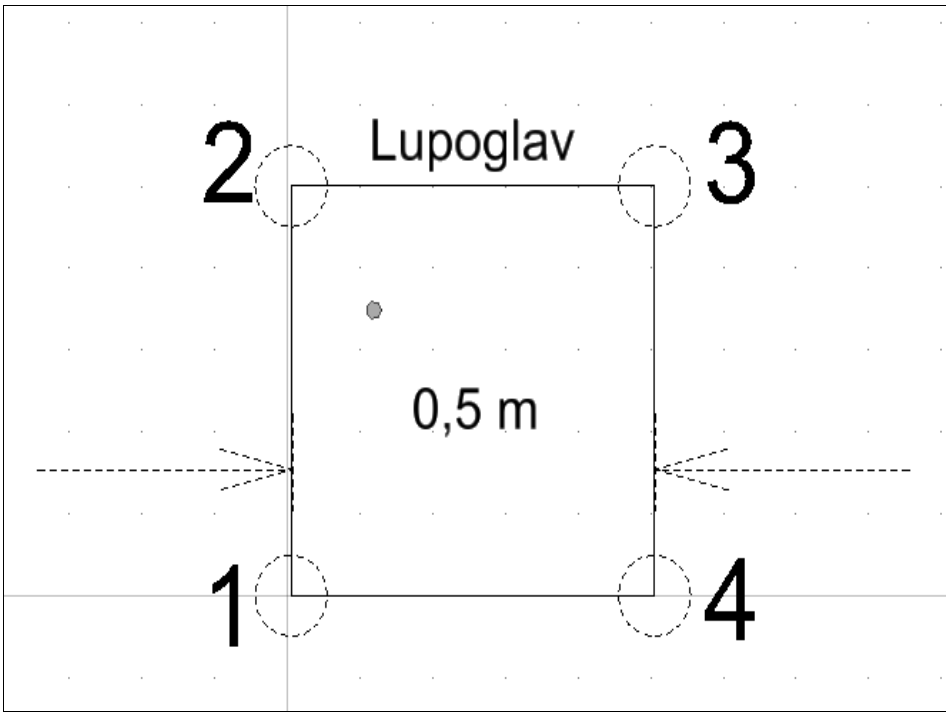
6.3. **Ispitivanja terenskom krilnom sondom Eijkelkamp na lokaciji Lupoglav**

Posmična čvrstoća tla krilnom sondom tvrtke Eijkelkamp mjerena je na lokaciji Lupoglav nedaleko od Dugog Sela. Lokacija je prikazana na karti (slika 6-12).



Slika 6-12 Lokacija Lupoglav na kojoj su obavljena terenska ispitivanja (https://www.google.com/earth/)

Mjerenja su obavljena samo sondom s malim krilcima, jer druge sonde nije bilo moguće utisnuti u tlo s obzirom da se radilo o tvrdoj glini,. Napravljen je raster kvadratnog oblika s četiri točke na međusobnoj udaljenosti 0,5 m (slika 6-13). Mjerenja su obavljena s površine bez prethodnog skidanja površinskog sloja.



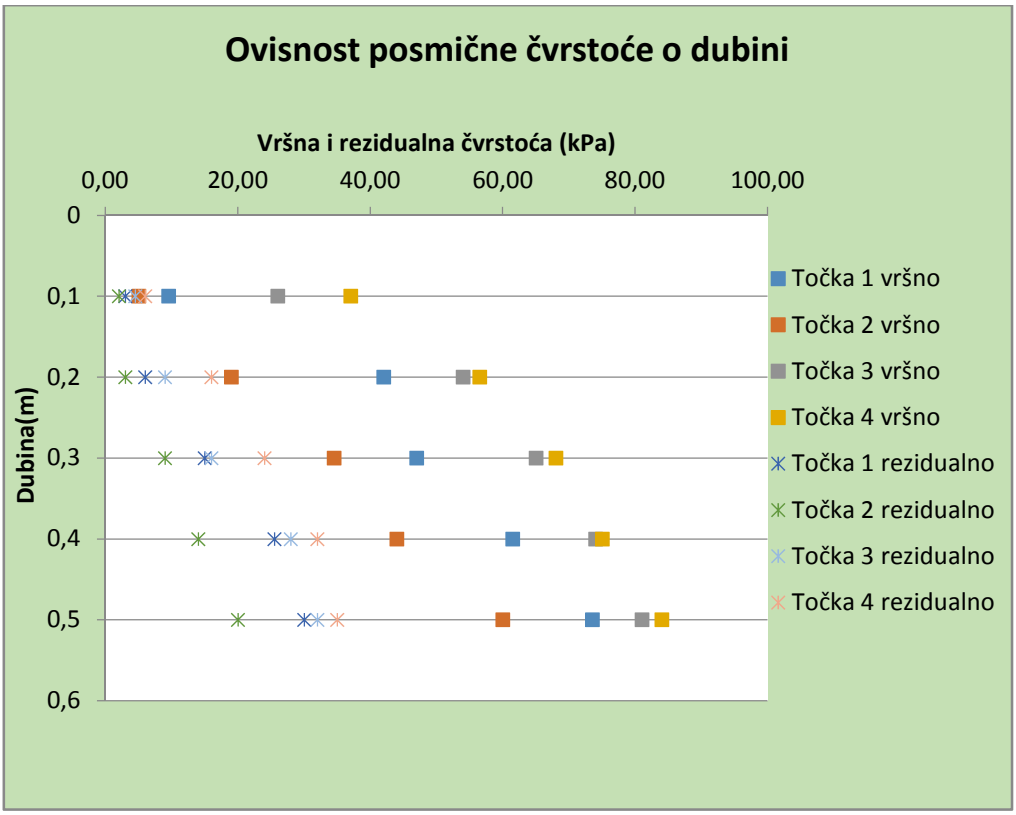
Slika 6-13 Grafički prikaz raspodjele točaka za ispitivanje

Korištena je produžna šipka duljine 0,5 m koja je navojem spojena na gornji dio uređaja preko kojeg se nanosi okretni moment. Mjerenja su obavljena na svakih 0,1 m dubine, tako da je u svakoj točki zabilježeno 5 vrijednosti posmične i rezidualne čvrstoće. Dobivene vrijednosti su prikazane u tablici 6-2.

Tablica 6-2 Vrijednosti dobivene ispitivanjem krilnom sondom na terenu u Lupoglavu

Br.	Dubina ispitivanja (m)	Korigirana vrijednost vršne čvrstoće (kPa)	Vrijeme do sloma S_u (s)	Korigirana vrijednost rezidualne čvrstoće (kPa)	Vrijeme do sloma S_{ur} (s)
1	0,10	19,0	3,00	6,00	1,00
	0,20	84,0	11,00	12,00	2,00
	0,30	94,00	10,00	30,00	4,00
	0,40	123,00	10,00	51,00	4,00
	0,50	147,00	10,00	60,00	3,00
2	0,10	10,00	2,00	4,00	1,00
	0,20	38,00	6,00	6,00	2,00
	0,30	69,00	8,00	18,00	2,00
	0,40	88,00	10,00	28,00	2,00
	0,50	120,00	13,00	40,00	3,00
3	0,10	52,00	3,00	9,00	1,50
	0,20	108,00	11,00	18,00	3,00
	0,30	130,00	7,00	32,00	3,00
	0,40	148,00	13,00	56,00	5,00
	0,50	162,00	15,00	64,00	7,00
4	0,10	74,00	6,00	12,00	3,00
	0,20	113,00	11,00	32,00	3,00
	0,30	136,00	12,00	48,00	5,00
	0,40	150,00	10,00	64,00	5,00
	0,50	168,00	13,00	70,00	5,00

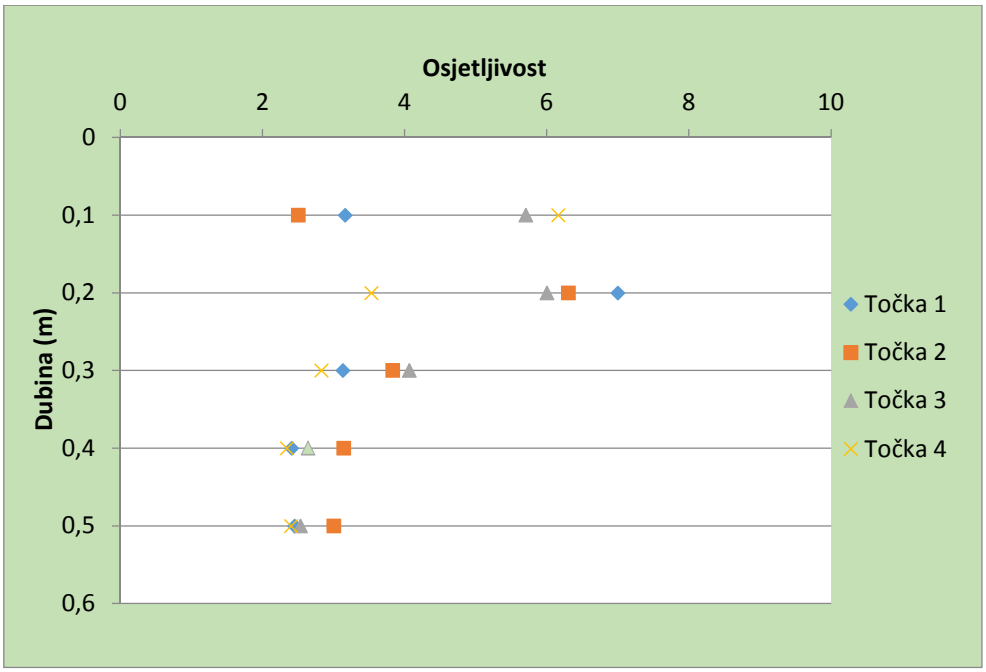
Grafički prikaz ovisnosti posmične čvrstoće o dubini nalazi se na slici 6-14.



Slika 6-14 Grafički prikaz raspodjele vršne i rezidualne čvrstoće do dubine 0,5 m

Kao i kod dosadašnjih ispitivanja, vrijednosti vršne posmične čvrstoće su znatno veće od rezidualnih i poprimaju gotovo dvostruko veće vrijednosti. Iznimno, u točki 2 primjećeno je da su vršna i rezidualna čvrstoća za najmanju dubinu ispitivanja gotovo jednake. Ovakva odstupanja mogu se objasniti pojavama sušenja u površinskom sloju. Međutim, za sve ostale dubine dobiven je očekivani trend. Može se primjetiti kako vrijednosti rastu proporcionalno s dubinom prodiranja sonde u tlo s obzirom da i efektivna naprezanja od vlastite težine također rastu s dubinom.

U svim mjernim točkama izračunata je osjetljivost materijala po dubini. Vrijednosti su prikazane na slici 6-15.



Slika 6-15 Raspodjela osjetljivosti materijala s dubinom

Pri mjerenju osjetljivosti materijala primjećuje se trend smanjenja osjetljivosti s povećanjem dubine. U mjernim točkama broj 3 i 4 u pravilu se najveća vrijednost javlja na dubini 0,1 m ispod površine terena te vrijednosti opadaju s dubinom. Odstupanja se mogu primijetiti u mjernim točkama broj 1 i 2 gdje se na dubini 0,2 m javlja porast osjetljivosti materijala za 100 % u odnosu na vrijednost izmjerenu na dubini 0,1 m, a vrijednosti na dubinama 0,3, 0,4 i 0,5 metara prate trend smanjenja osjetljivosti. Razlog ovakvom odstupanju bi mogao biti sloj materijala s primjesama pijeska ili šljunka u kojem su otežano provedena ispitivanja vršne i rezidualne čvrstoće te su dobivene vrlo male vrijednosti rezidualne čvrstoće u odnosu na susjedne mjerene točke i ostale dubine ispitivanja.

7. ZAKLJUČAK

Pokus krilnom sondom je terenska metoda za određivanje vršne i rezidualne nedrenirane posmične čvrstoće mekih do srednje tvrdih tala. Od svih in-situ ispitivanja jedino se ovim ispitivanjem izravno određuje čvrstoća tla. Kako međutim niti kod tog pokusa nisu u potpunosti definirani rubni uvjeti, niti uvjeti dreniranja, preporučljivo je rezultate uspoređivati s ispitivanjima uz korištenje drugih metoda.

Ciljevi ovog rada su bili: uhodati točnu proceduru izvođenja ispitivanja za koju je kao dio pripreme napravljen i formular za terenski izvještaj; probnim laboratorijskim ispitivanjima utvrditi utjecaj vlažnosti tla na vršnu i rezidualnu čvrstoću; usporediti laboratorijske rezultate dobivene ispitivanjima novom sondom tvrtke Eijkelkamp s rezultatima dobivenim sondom tvrtke ELE; terenskim ispitivanjima utvrditi promjenu vršne i rezidualne posmične čvrstoće tla s dubinom. S obzirom da su mjerenja obavljena u laboratorijskim uvjetima i na terenu s dvije različite izvedbe sondi posebna pažnja je posvećena prikazu rezultata na istim uzorcima materijala u laboratoriju te na prikazu rezultata dobivenih terenskim ispitivanjima.

U laboratoriju su pripremljeni uzorci gline različitih vlažnosti te su na takvom materijalu provedene usporedne analize vršne i rezidualne čvrstoće s dvije različite sonde. Rezidualna čvrstoće je pri svim ispitivanjima znatno manja od vršne čvrstoće. Očekivano, vrijednosti posmične čvrstoće materijala rastu sa smanjenjem vlažnosti uzorka. Najveća razlika (oko 20 kPa) između vršne i rezidualne čvrstoće dobivena je za uzorke s najmanjom početnom vlažnošću. S povećanjem vlažnosti uzoraka ta se razlika značajno smanjuje. S obzirom na drugačiju izvedbu uređaja koji su se najviše razlikovali po dimenzijama i obliku krilaca, na istim materijalima su dobiveni očekivani trendovi za obje sonde ali su se rezultati po apsolutnim vrijednostima razlikovali. Vrijednosti dobivene sondom tvrtke ELE nije bilo potrebno korigirati naknadno dok su vrijednosti dobivene ispitivanjem sondom tvrtke Eijkelkamp korigirane popravnim koeficijentom ovisno o veličini korištenih krilaca. Bitna razlika u izvedbi ovih dviju sondi je u obliku krilaca. Krilca sonde ELE imaju zaoštrene rubove ali deblje stjenke i veće dimenzije od sonde Eijkelkamp. Kod sonde ELE su zabilježene manje vrijednosti vršne i rezidualne posmične čvrstoće pri svim mjerenjima u odnosu na vrijednosti zabilježene sondom Eijkelkamp. Razlika u vrijednostima dobivenim tijekom probnih laboratorijskih ispitivanja može isto tako biti posljedica nedovoljne homogenizacije uzorka (vlažnost i zbijenost) bentonitne gline prilikom ugradnje u čaše. Osim toga, pri samom ispitivanju rubni uvjeti nisu bili

jednaki za ispitivanje svim krilcima sonde, s obzirom da je korištena jedna dimenzija čaše za sva ispitivanja, a veličine krilaca su se mjenjale u visini i promjeru, što znači da pri svim ispitivanjima nije bila jednaka udaljenost između rubova krilaca i čaše.

Pri terenskim ispitivanjima je bilo vrlo teško pronaći lokaciju na kojoj su materijali gline dovoljno mekani kako bi se omogućila ispitivanja sa svim veličinama krilaca. Naime, što je materijal tvrđi sonda teže prodire u tlo i ispitivanja su kod takvih tala moguća jedino s najmanjim krilcima. U nemogućnosti pronalaska dovoljno mekanog tla, ispitivanja su obavljena samo malom krilnom sondom do dubine 0,5 m. Terenskim ispitivanjima utvrđen je očekivani trend porasta čvrstoće s dubinom kao i redukcije rezidualnih u odnosu na vršne parametre. Stoga se može konstatirati da je pokazana uporabivost ovog uređaja. Bilo bi korisno slična ispitivanja napraviti na više lokacija te u različitim vrstama tala, kako bi se stekao potpuniji uvid u mogućnosti primjene uređaja.

Pokus terenskom krilnom sondom pokazao se kao vrlo brza i jednostavna metoda mjerenja in-situ posmične čvrstoće tla. Oprema je malih dimenzija i lako prenosiva tako da se ispitivanja mogu obavljati na bilo kojoj lokaciji na terenu što je najveća prednost ovog ispitivanja. Nedostatak je mogućnost mjerenja samo u glinovitim materijalima u kojima se ne pojavljuju šljunci ili pijesci u slojevima. Takvi krupnozrnasti materijali omogućuju dreniranje što onemogućuje određivanje nedreniranih parametara tla. Materijal u kojem se ispitivanje obavlja treba biti mekan kako bi se krilca mogla utisnuti do željene dubine ispitivanja. Na lokacijama gdje su obavljena terenska ispitivanja tlo je bilo tvrdo te je ručno utiskivanje sonde bilo otežano. S obzirom da je pokus krilnom sondom jedina metoda za izravno određivanje posmične čvrstoće tla našla je značajnije mjesto u praktičnoj primjeni.

8. LITERATURA

ASTM D 2573 - Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil

ASTM D 3550 - Standard Practice for Thick Wall, Ring-Lined, Split Barrel, Drive Sampling of Soils

Barlett F, S., Civil & Environmental Engineering at the University of Utah; URL: http://www.civil.utah.edu/~bartlett/CVEEN6340/vst.pdf (15.5.2017.)

ELE International, URL: http://www.ele.com/Department/soils-testing-equipment (30.5.2017)

Eijkelkam, URL: https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/tech-specs-field-inspection-vane-tester.html (20.4.2017.)

European Standard, Final draft, prEN 1997-2 (p. 66-68)

Kvasnička, P., 2015, Geotehničko projektiranje; predavanje, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko–geološko–naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, predavanje URL: http://rgn.hr/~pkvasnic/01_MT2_EC7.pdf (5.6.2017.)

PRILOG 1: Formular za terenski izvještaj

Sveučilište u Zagrebu RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET HR-10002 Zagreb, Pierottijeva 6, p.p. 390	OBRAZAC SUSTAVA UPRAVLJANJA	Zavod za rudarstvo i geotehniku GEOMEHANIČKI LABORATORIJ Tel./Fax: +385 1 48 36 061

ISPITIVANJE POSMIČNE ČVRSTOĆE TLA TERENSKOM KRILNOM SONDOM

Sonda tvrtke Eijkelkamp; veličina sonde 16x32 mm, 20x40 mm, 25,4x50,8 mm;
mjerno područje 0-260, 0-130, 0-65 kPa

Laboratorijski broj:	Datum:	Referentna ravnina:
Mjesto:	Vremenski uvjeti:	Vrijeme (t) do početka utiskivanja sonde:
Utiskivanje sonde s površine DA NE	Utiskivanje sonde s dna bušotine DA NE	Maksimalna vrijednost okretnog momenta:

Napomene uz ispitivanje:

Rb.	DUBINA (m)	POSMIČNA ČVRSTOĆA (kPa)	VRIJEME DO SLOMA (t)	REZIDUALNA ČVRSTOĆA (kPa)	VRIJEME DO SLOMA (t)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(Datum)	(Ime i prezime, potpis)	(Datum)	(Ime i prezime, potpis)

Oznaka:		Verzija / primjena od:		Stranica:	1 / 1

Prilog 1 Formular za terenski izvještaj