

# Ispitivanje anizotropije posmične čvrstoće gline na lokaciji glinokopa u Šenkovcu

---

**Kramarić, Dalibor**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:790872>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**

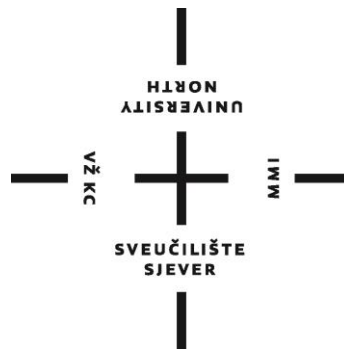


*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER  
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



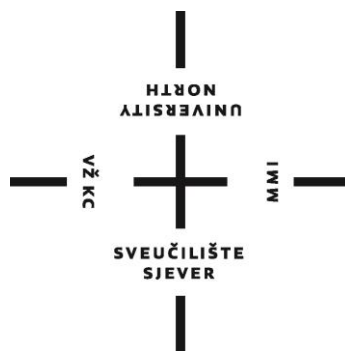
DIPLOMSKI RAD br. 4/GRD/2020

**ISPITIVANJE ANIZOTROPIJE POSMIČNE  
ČVRSTOĆE GLINE NA LOKACIJI  
GLINOKOPA U ŠENKOVCU**

Dalibor Kramarić

Varaždin, listopad 2020.

**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**  
**Studij Graditeljstva**



DIPLOMSKI RAD br. 4/GRD/2020

**ISPITIVANJE ANIZOTROPIJE POSMIČNE  
ČVRSTOĆE GLINE NA LOKACIJI  
GLINOKOPA U ŠENKOVCU**

Student:  
Dalibor Kramarić, 0231043249

Mentor:  
doc. dr. sc. Aleksej Aniskin

Varaždin, listopad 2020.



# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za graditeljstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo

PRISTUPNIK Dalibor Kramarić

MATIČNI BROJ 0965/336D

DATUM 9.9.2020.

KOLEGIJ Geotehničko inženjerstvo

NASLOV RADA Ispitivanje anizotropije posmične čvrstoće gline na lokaciji glinokopa u Šenkovcu

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Investigation of clay shear strength anisotropy at location of a clay pit in Šenkovec

MENTOR doc. dr. sc. Aleksej Aniskin

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. prof. dr. sc. Božo Soldo

2. doc. dr. sc. Matija Orešković

3. doc. dr. sc. Aleksej Aniskin

4. doc. dr. sc. Željko Kos

5.

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 004/GRD/2020

OPIS

Pristupnik treba u radu obraditi slijedeća poglavlja zadane teme:

1. Uvod
2. Općenito o anizotropiji tla
3. Terensko uzimanje uzoraka
4. Laboratorijska ispitivanja
5. Primjer proračuna nosivosti tla prema Eurocodu 7
6. Zaključak
7. Literatura

ZADATAK URUČEN

POTPIS MENTORA

**Zahvala:**

*Zahvaljujem se svome mentoru doc.dr.sc. Alekseju Aniskinu na poticaju za odabir zahtjevne ali vrlo zanimljive teme, vodstvu kod izrade diplomskog rada te na znanstvenim i stručnim savjetima tokom izrade istog.*

*Također se zavaljujem višem predavaču Damiru Štuhecu dipl.ing.geoteh. pod čijim su stručnim vodstvom provedena sva laboratorijska ispitivanja i obrađeni rezultati te na detaljnim objašnjenjima svakog postupka za bolje razumijevanje teme.*

*Zahvaljujem svim profesorima, asistentima i osoblju Sveučilišta Sjever na ugodnoj suradnji i prenesenom znanju.*

*Veliku zavalu upućujem svojoj obitelji, a posebno roditeljima, sestri i djevojci, na strpljenju, razumijevanju i najvećoj podršci tijekom studija.*

## SAŽETAK

Tema ovog rada je anizotropija posmične čvrstoće gline, razlike u rezultatima ispitivanja parametara posmične čvrstoće, kohezije ( $c$ ) i kuta unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ), s obzirom na smjer ispitivanja te utjecaj dobivenih vrijednosti kod proračuna nosivosti tla. U radu se iznose općenite definicije o anizotropiji i pojavi iste utvrđenoj kroz rad mnogih autora. Opisan je postupak odabira lokacije i uzimanja uzoraka na terenu te niz laboratorijskih ispitivanja od kojih je najvažniji pokus izravnog posmika. Dobiveni rezultati su uspoređeni te je na temelju istih proračunat konkretan primjer nosivosti tla. Na temelju svega navedenog zaključeno je da je razlika parametara posmične čvrstoće, odnosno anizotropija posmične čvrstoće jasno vidljiva te da znatno utječe na rezultate proračuna nosivosti tla i nikako se ne bi trebala zanemariti.

**Ključne riječi:** anizotropija, kohezija, kut unutarnjeg trenja, posmična čvrstoća, pokus izravnog posmika.

## SUMMARY

The theme of this paper is anisotropy of shear strength of clay, differences in test results of shear strength parameters, cohesion ( $c$ ) and internal friction angle ( $\varphi$ ), considering the direction of testing and the influence of obtained values in soil bearing capacity calculation. The paper presents general definitions of anisotropy and its occurrence established through the work of many authors. The procedure for site selection and field sampling is described, as well as a series of laboratory tests, of which the most important is the direct shear test. The obtained results were compared and based on them, a concrete example of soil bearing capacity was calculated. Based on all the above, it was concluded that the difference in shear strength parameters, i.e. shear strength anisotropy is clearly visible and that it significantly affects the results of soil bearing capacity calculations and should not be neglected.

**Key words:** anisotropy, cohesion, internal friction angle, shear strength, direct shear test



# Sadržaj

SAŽETAK .....	I
SUMMARY .....	II
1. Uvod .....	1
2. Općenito o anizotropiji tla .....	2
3. Terensko uzimanje uzoraka .....	7
4. Laboratorijska ispitivanja .....	10
4.1. Ispitivanje fizikalnih i mehaničkih karakteristika tla .....	10
4.1.1. Određivanje konzistentnih granica te klasifikacija tla .....	12
4.1.2. Određivanje granulometrijskog sastava tla areometriranjem .....	16
4.2. Pokus izravnog posmika .....	17
4.2.1. Opis uređaja i popratnog softwarea .....	19
4.2.2. Priprema ispitnih tijela i tijek ispitivanja .....	20
4.2.3. Rezultati ispitivanja i obrada podataka .....	27
4.2.4. Analiza rezultata posmika .....	33
5. Primjer proračuna nosivosti tla prema Eurocodu 7 .....	34
5.1. Proračun nosivosti tla ispod temelja za granično stanje sloma (GEO) .....	34
5.1.1. Analiza utjecaja različitih parametara posmične čvrstoće s obzirom na promjenu širine temelja i dubine temeljenja .....	37
5.2. Proračun aktivnog tlaka tla na potporni zid za granično stanje ravnoteže (EQU) .....	40
5.2.1. Analiza rezultata proračuna aktivnog tlaka .....	45
5.3. Proračun stabilnosti kosina računalnim programom GEO 5 .....	46
6. Zaključak .....	48
7. Literatura .....	49

# 1. Uvod

U novije vrijeme sve bržeg razvoja gradova, industrije i prometa te sve češća pojava preizgrađenosti dovodi do pomanjkanja broja zemljišta pogodnih za gradnju što dovodi do situacije da se ne bira mjesto izgradnje velikih i zahtjevnih građevina. Zbog toga se sve češće takve građevine grade u izrazito složenim geološkim uvjetima.

Glineno tlo spada u složene inženjersko geološke uvjete gradnje pri izgradnji različitih objekata u graditeljstvu kao što su podzemne građevine, podzemne garaže, podzemne željeznice te temeljenje svih građevina, a posebno razvedenih zgrada nepravilnog oblika.

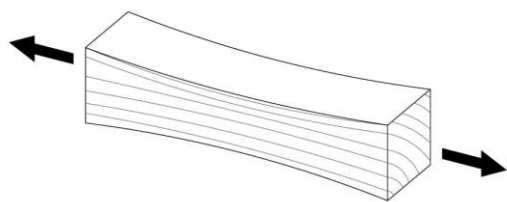
Prilikom projektiranja građevina te dimenzioniranja nosivih konstrukcija potrebno je odrediti parametre posmične čvrstoće tla iz kojih se prema poznatim metodama te sukladno propisanim normama mogu izračunati nosivost temeljnog tla, aktivni tlak, pasivni otpor, stabilnost kosina i ostalo.

Posmična čvrstoća se obično prikazuje pomoću Mohr - Coulombovog modela sa parametrima, kohezijom ( $c$ ) i kutom unutarnjeg trenja( $\phi$ ), a koji se vrlo često u praksi određuju pokusom izravnog posmika. Vrlo složena struktura i priroda gline dovodi do različitog ponašanja glina u ovisnosti o smjerovima, odnosno anizotropiju fizikalnih karakteristika koje uvelike utječu na parametre posmične čvrstoće.

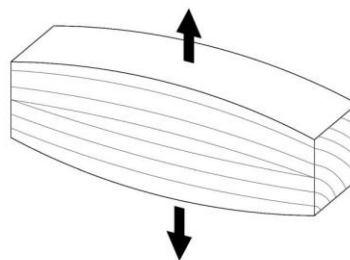
Kroz ovaj rad želi se, laboratorijskim ispitivanjima niza neporemećenih uzoraka gline te obradom i analizom dobivenih rezultata, istražiti razlika u parametrima posmične čvrstoće s obzirom na smjer ispitivanja u odnosu na orijentaciju uzoraka u prirodi. Također se želi analizirati u kolikoj mjeri dobivene razlike u parametrima posmične čvrstoće utječu na rezultate prilikom proračuna realnih konstrukcija.

## 2. Općenito o anizotropiji tla

Anizotropija općenito označava promjenjivost pojedinih osobina i karakteristika materijala u različitim smjerovima unutar volumena materijala. Golim okom najbolje vidljiv primjer anizotropije je kod drva koje ima potpuno različita svojstva paralelno s vlakancima i okomito na vlakanca upravo zbog svoje vlaknaste strukture. Najznačajnija razlika javlja se kod vlačne čvrstoće drva paralelno s vlakancima i vlačne čvrstoće okomito na vlakanca gdje razlike mogu biti od 15 do 40 puta u korist vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima.



*Slika 2.1. Vlačna čvrstoća drva paralelno s vlakancima =87,6 MPa [20]*



*Slika 2.2. Vlačna čvrstoća drva okomito na vlakanca =2,0 MPa [20]*

Kada govorimo o svojstvima tla, inženjerski gledano jedno od najvažnijih svojstava tla je posmična čvrstoća pa tako i u slučaju anizotropije tla. Izotropnost tla je karakteristika tla iskazivati jednakost svojstava ili identična svojstva bez obzira na smjer proučavanja mase tla [2]. U slučaju realnog tla to gotovo nikada nije slučaj. Anizotropija tla određuje razliku u mehaničkim karakteristikama u različitim smjerovima odnosno, kada parametar svojstva tla nije jednak (nije identičan) ovisno o smjeru u prostoru.

Postoje dvije glavne vrste anizotropije tla. Prva se odnosi na slojevitost teksturnih elemenata koji se sastoje od slojeva tla s različitim granulometrijskim sastavom, strukturom i fizikalno-mehaničkim svojstvima. Odstupanje tla od izotropije u tom slučaju definirano je prirodnom ili umjetnom slojevitošću [2]. Proces sedimentacije stijena koje formiraju prirodne heterogene naslage tla karakterizira prirodna slojevitost dok se umjetna slojevitost ostvaruje u novoformiranim masivima posredstvom tehnoloških specifičnosti gradnje, te karakteristikama tla ispod nivoa novoformiranih nasipa. Druga vrsta anizotropije određena je prevladavajućom orijentacijom anizometrijskih čestica u prostoru. Smatra se da su čestice tla asimetrične te da se orijentirano sedimentiraju i uklapaju u slojeve pod djelovanjem gravitacijskih sila pretežno horizontalno većom površinom [2].

Za objektivno karakteriziranje, realni diskretni medij tla zahtjeva eksperimentalno ispitivanje parametara jer u stvarnosti u tlu, na primjer, otpor "niz dlaku i kontra dlake" nije uvijek jednak [2].

Zapravo, broj svojstava tla koja su uključena u tvorbu njegovog diskretnog modela, određuje broj izotropija, odnosno anizotropija u njegovim kvalitativnim i kvantitativnim karakteristikama koje se proučavaju.

U praksi uzimanje u obzir anizotropije prilikom izračuna bočnog tlaka na stjenke potpornih konstrukcija često dovodi do pozitivnog rezultata. Naime, s pravilno usmjerenom tehnologijom građevinskih radova bočni tlak se smanjuje [2]. Mnogi autori su do sada proučavali anizotropiju tla, a neki od njih su navedeni u tablici u nastavku.

**Tablica 2.1. Svojstva anizotropnih tla – (izvor [2])**

R.br.	Izvor, autor	Tlo, mjesto uzorkovanja	Ispitivanja, pribor	Dodatni podaci i karakteristike
1	Rogatkina Ž.E.	Glina, Neocomian, Saratovskaya Hidroelektrana	Uređaj M-2 troosna kompresija. Visina uzorka - 110 mm, promjer - 55 mm. Izrezivanje uzoraka iz tla i polaganje u uređaj s vodoravnom i okomitom orijentacijom u odnosu na ravninu slojeva.	Tekstura je tanko slojevita s tankim međuslojevima prašnjavih čestica i sitnim zrnima kvarca. Čestice gline 50-70%. Indeks plastičnosti je 40-60, sadržaj vlage u uzorcima 26-33%, $\gamma = 1,89-1,94 \text{ g / cm}^3$ , poroznost 46-48%. Horizontalno $\varphi = 25^\circ$ , vertikalno $\varphi = 27^\circ$ . $c = 0,5 \text{ kg / cm}^2$ -jednak u oba smjera.
2	Rogatkina Ž.E.	Aleuitska glina srednje Azije		Gline su slojevite, guste. U zraku se uzorci dekomprimiraju mrežom pukotina. Trošne se raspadaju na pločice. Sadržaj čestica gline 40-80%. Indeks plastičnosti je 30-40, vlaga 13-18%, $\gamma = 2,05-2,10 \text{ g / cm}^3$ , $n = 46-48\%$ . Horizontalno $\varphi = 25^\circ$ , vertikalno $\varphi = 18^\circ$ . $c = 5,4 \text{ i } 7,0 \text{ kg / cm}^2$ .
3	Rogatkina Ž.E.	Mezozoik / kenozoik sedimenti, Aralsko more		Tekstura je tanko slojevita u krednim sedimentima i neogenu. Škriljac u sedimentima Cheganske skupine paleogena. Mreža pukotina u masivu glina horizontalna. Čestice gline 76-47%. Indeks plastičnosti 36-15. Vlaga 35-13%. $\gamma = 1,77-2,13 \text{ g / cm}^3$ . Poroznost 52-32%. Horizontalno $\varphi = 23^\circ$ , vertikalno $\varphi = 21^\circ$ , $c = 0,3; 0,5 \text{ kg/cm}^2$ .
4	Filimonov V.A.	aluvialna tla deponija pepela, hidrauličke deponije pljeva i deponije otpadaka mineralnih sirovina.	VSV-1 uređaj. Neporemećeni uzorci s dubine od 10 do 25 cm aluvijalne plaže. 300 eksperimenata.	Tekstura uslojena s prostornom orijentacijom čestica. Otpornost na smicanje uz slojevitost: sporo smicanje $\varphi = 27-38^\circ$ brzo smicanje $\varphi = 24-31^\circ$ okomito na slojevitost: sporo smicanje $\varphi = 35-44^\circ$ brzo $\varphi = 25-37^\circ$ .

Tablica 2.1.(nastavak) Svojstva anizotropnih tla – (izvor [2])

R.br.	Izvor, autor	Tlo, mjesto uzorkovanja	Ispitivanja, pribor	Dodatni podaci i karakteristike															
5	Hira R.P.	Muljevita glina, Belskaya i Mala Belskaya	Triaksialna ispitivanja. Uzorci promjera 150 mm, visine 400 mm.	Omjer čvrstoće u vodoravnom i okomitom smjeru iznosi 0,87-0,80.															
6	Lokh A.K., Holt R.T.	glina vrha, smeđa, Winnipeg, Manitoba	Triaksialni uređaj za kompresiju. Uzorci visine 76,2 mm, promjera 35,6 mm. Nedrenirani pokusi.	<p>Tekstura smeđe gline slojevita od 3 sloja:</p> <p>a - tanko slojevita svjetla;</p> <p>b - obična,</p> <p>c – tamna</p> <p>sa sadržajem čestica gline 85% u svim slojevima.</p> <p>Indeks plastičnosti:</p> <p>a - 67,3%, b - 76,2%, c - 8,8%.</p> <p>Vlažnost, % <math>W_L</math> <math>W_P</math></p> <table style="margin-left: 40px;"> <tr> <td>a</td> <td>99</td> <td>31.7</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>108,6</td> <td>32,4</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>123,3</td> <td>34,5</td> </tr> </table> <p>Uzorci su izvađeni iz monolita volumena 0,31m<sup>3</sup> na dubini od 4,9m. u raznim smjerovima s kutovima <math>\beta = 0^\circ, 90^\circ, 45^\circ</math> u odnosu na horizontalu.</p>	a	99	31.7	b	108,6	32,4	c	123,3	34,5						
a	99	31.7																	
b	108,6	32,4																	
c	123,3	34,5																	
7	Evertovskaja - Madej S.	Koherentno tlo, Siedlecki kaolinit	Uređaj za izravni posmik. Uzorci 60x60 mm visine 20 mm s mehaničkom brtvom u spremniku promjera i visine 200 mm.	<p>Čestice gline 52%, čestice prašine - 48%. Granica plastičnosti -38,8%, granica tečenja -70,1%.</p> <p>Koeficijent izračunavanja orijentacije čestica gline PR za:</p> <table style="margin-left: 40px;"> <tr> <td>Vlažnost,%:</td> <td>32</td> <td>37</td> <td>42</td> <td>47.</td> </tr> <tr> <td>Brzo kons.</td> <td>2,92</td> <td>4,58</td> <td>1,86</td> <td>1,82.</td> </tr> <tr> <td>Sporo kons.</td> <td>4,89</td> <td>7,50</td> <td>8,35</td> <td>7,48.</td> </tr> </table> <p>Uzorke u Siedletskom kaolinitu su se vadili s različitom orijentacijom čestica gline. Uzorci su smicani paralelno, okomito i pod 45° na smjer opterećenja.</p>	Vlažnost,%:	32	37	42	47.	Brzo kons.	2,92	4,58	1,86	1,82.	Sporo kons.	4,89	7,50	8,35	7,48.
Vlažnost,%:	32	37	42	47.															
Brzo kons.	2,92	4,58	1,86	1,82.															
Sporo kons.	4,89	7,50	8,35	7,48.															
8	Lo K. Ja. Morin Dž. P.	Gline, Quebec, Ottawa	Triaksialni uređaj za kompresiju.	Ispitivanja uzoraka uklanjanjem (dehidracijom) vode i bez njenog uklanjanja na različitim $\beta$ .															
9	Lo K. Ja., Milligan V.	Glina, Vallier	Triaksialni uređaj za kompresiju.	<p>Tekstura je slojevita, siva. 25 mm sloj pijeska i istaložene prašinate gline. Sloj 50 - 100 mm istaložene čestice gline, uključujući slojeve crne boje.</p> <p>Vlažnost - 59%. <math>W_L = 60\%</math>, <math>W_P = 23\%</math>.</p> <p><math>I_L = 0,97</math>.</p>															

**Tablica 2.1.(nastavak) Svojstva anizotropnih tla – (izvor [2])**

R.br.	Izvor, autor	Tlo, mjesto uzorkovanja	Ispitivanja, pribor	Dodatni podaci i karakteristike																																														
10	Lo K. Ja.	Glina, Louis	Triaksalni uređaj za kompresiju.	Dvoslojna, čvrstoća na smicanje suhih obrazaca poprečno slojevima tri puta veća od one uzduž. Vlažnost - 69%. $W_l = 50\%$ , $W_p = 27\%$ . $I_L = 1,83$ .																																														
11	Jang R.N., V.Silvestri	Glina, St. Louis. Bonsecore, Quebec	Triaksalni uređaj za kompresiju. Osnovno simetrično opterećenje nesmetano osušenih uzoraka promjera 38 mm i visine 76 mm. Ispitivanja složenim troosnim opterećenjem nesmetanih uzoraka, visine 102 mm, dimenzije 51x38mm.	Glina slojevita (trakasta) sa svetlim i tamno sivim slojevima debljine 5-15 mm i sadržajem čestica gline 79%, sedimenta 20%, pijeska 1 %. Vlažnost - 66%. $W_l = 48\%$ , $W_p = 28\%$ . Maksimalna sila smicanja u okomitom i vodoravnom smjeru. Minimalna sila smicanja pri $\beta = 50^\circ$ .																																														
12	Dunstan T.	Pijesak, prirodni šljunak, Florida	Ispitivanje smicanja pomoću ćelije 60x60 mm pri normalnim napreznanjima 71, 127, 266 [kN / m <sup>2</sup> ]. Ispitivanja su provedena na četiri frakcije pijeska, od kojih su: 1 - 100% čestica 14-25 mm, p - 0,60; 2 - 60% čestica 14-25 mm, 40% čestica 52-72 mm, p - 0,49; 3 - 35% čestica 14-25 mm, 65% čestica 52-72 mm, p - 0,52; 4 - 100% čestica 52-72 mm, p - 0,56. <b>Dobiva se kut unutarnjeg trenja u dva smjera:</b> Kut unutarnjeg trenja $\varphi^\circ$ u vodoravnom smjeru pri različitim normalnim napreznanjima $\sigma$ , [kN / m <sup>2</sup> ] :	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tlo, R.br.</th> <th colspan="3"><math>\sigma</math> [kN/m<sup>2</sup>]</th> </tr> <tr> <th>71</th> <th>127</th> <th>266</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>27°</td> <td>27°</td> <td>27,5°</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>28°</td> <td>28°</td> <td>28°</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>26,5°</td> <td>26,5°</td> <td>27,5°</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>28°</td> <td>27°</td> <td>27°</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tlo, R.br.</th> <th colspan="3"><math>\sigma</math> [kN/m<sup>2</sup>]</th> </tr> <tr> <th>71</th> <th>127</th> <th>266</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>30°</td> <td>29°</td> <td>29,5°</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>31°</td> <td>31°</td> <td>30°</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>29°</td> <td>29,5°</td> <td>29,5°</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>30°</td> <td>30°</td> <td>31°</td> </tr> </tbody> </table>	Tlo, R.br.	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]			71	127	266	1	27°	27°	27,5°	2	28°	28°	28°	3	26,5°	26,5°	27,5°	4	28°	27°	27°	Tlo, R.br.	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]			71	127	266	1	30°	29°	29,5°	2	31°	31°	30°	3	29°	29,5°	29,5°	4	30°	30°	31°
Tlo, R.br.	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]																																																	
	71	127	266																																															
1	27°	27°	27,5°																																															
2	28°	28°	28°																																															
3	26,5°	26,5°	27,5°																																															
4	28°	27°	27°																																															
Tlo, R.br.	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]																																																	
	71	127	266																																															
1	30°	29°	29,5°																																															
2	31°	31°	30°																																															
3	29°	29,5°	29,5°																																															
4	30°	30°	31°																																															

**Tablica 2.1.(nastavak) Svojstva anizotropnih tla – (izvor [2])**

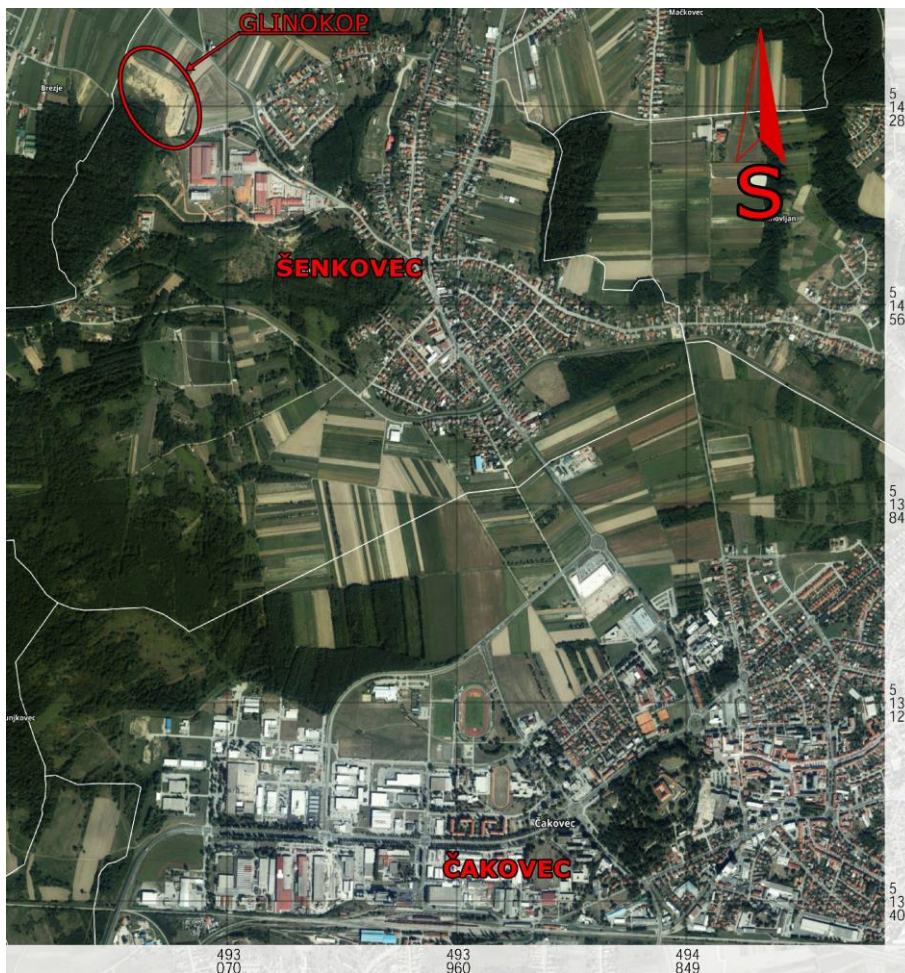
R.br.	Izvor, autor	Tlo, mjesto uzorkovanja	Ispitivanja, pribor	Dodatni podaci i karakteristike
13	Zdenek P., Bazant	Glineni sediment	Triaksalni uređaj za kompresiju. Monoliti promjera 200 mm, visine 150 mm urezani u jami.	Uzorci promjera 35 mm i visine 40 mm ispitani su u okomitom smjeru, vodoravnom smjeru i pod kutom od 45° u odnosu na smjer glavnog naprezanja.
14	Abelev M.Ju.	Les s makro porama, Zaporožje	Urežaj za smicanje od fimre "Gidroprojekt".	Makro pore vertikalno i okomito na ravninu smicanja i obrnuto. 3 serija eksperimenata makro pore pod 45° prema ravnini smicanja.
15	Shkola A.V., Hejdar A.	3 vrste ilovače: 1 - smeđa makroporozna, 2 - smeđa pješčana glina 3 - žuto-siva.	GGGT-30 Hydro Project dizajnerski uređaj za smicanje. Uzorkovanje 393 uzorka s reznim prstenom s kutom prema horizontalnim slojevima [ $\beta^\circ = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ].	Testovi primjenom nekonsolidirane metode smicanja. Određivanje standardnih vrijednosti C i $\varphi$ vrši se metodom najmanje kvadrata. Podaci se nalaze u tablici niže (Tablica 2.2. ).

**Tablica 2.2. Svojstva anizotropnih tla – rezultati ispitivanja Shkola A.V., Hejdar A. – (izvor [2])**

TLO	$\beta^\circ$							
	0°		45°		60°		90°	
	$\varphi^\circ$	c, kPa	$\varphi^\circ$	c, kPa	$\varphi^\circ$	c, kPa	$\varphi^\circ$	c, kPa
1	21°19'	4,2	30°07'	3,3	-	-	23°45'	4,4
2	14°34'	3,1	12°57'	2,3	16°10'	1,9	12°25'	2,6
3	22°17'	3,3	25°38'	4,0	-	-	26°34'	3,0

### 3. Terensko uzimanje uzoraka

Da bi za ispitivanje imali što homogeniji uzorak tla, za mjesto uzimanja uzorka odabran je glinokop. Izlaskom na teren, na lokaciji glinokopa u mjestu Šenkovec, uzeti su uzorci za ispitivanje. Šenkovec je mjesto u Međimurskoj županiji, dva kilometra sjeverno od grada Čakovca.



*Slika 3.1. Lokacija glinokopa u mjestu Šenkovec (izvor geoportal)*



*Slika 3.2. Lokacija uzimanja uzoraka u glinokopu*



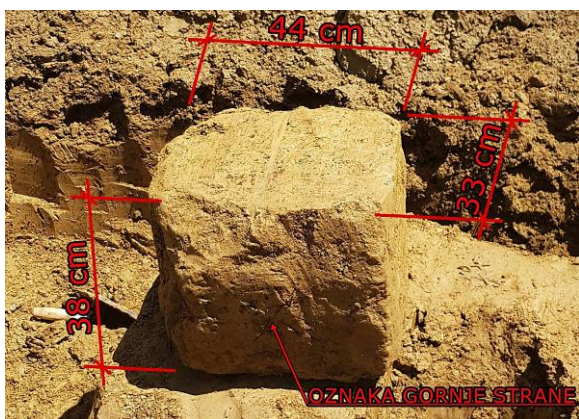
Nakon odabira lokacije u glinokopu, uklonjen je površinski sloj tla u debljini od 10,0 do 15,0 cm koji je bio vidno poremećen utjecajem atmosferilija. Nakon toga iskopan je kružni jarak dubine 40,0 cm koji nam je omogućio uzimanje uzorka približnih dimenzija  $44,0 \times 38,0 \times 33,0$  cm. Zbog lakšeg transporta uzorak je prepolaovan na dva približno jednaka ispitna uzorka iz kojih će se u laboratoriju uzimati ispitna tijela za ispitivanje fizičkih i mehaničkih karakteristika te za pokus izravnog posmika ovisno o željenom smjeru smicanja. Kako bi uzorci ostali neporemećeni, odmah su umotani u plastičnu foliju da ne dođe do promjene vlage. Prilikom vađenja i baratanja s uzorcima, s obzirom na cilj ispitivanja, posebno se pazilo na prirodnu orijentaciju uzoraka u prostoru.



*Slika 3.3. Prikaz geodetskih visina lokacije (prema podacima dobivenim od strane glinokopa)*



*Slika 3.4. Uzorak pripremljen za vađenje*



*Slika 3.5. Prikaz približnih dimenzija izvađenog uzorka*



*Slika 3.6. Izvađeni uzorak prepolaovan na dva ispitna uzorka*



*Slika 3.7. Ispitni uzorci umotani u plastičnu foliju i pripremljeni za transport*

## 4. Laboratorijska ispitivanja

### 4.1. Ispitivanje fizikalnih i mehaničkih karakteristika tla

Nad uzorkom uzetim na terenu proveden je niz ispitivanja kako bi se što detaljnije okarakteriziralo i klasificiralo tlo. Sva ispitivanja provedena su sukladno propisanim i usvojenim normama za laboratorijska ispitivanja prikazanim u tablici 4.1.

*Tablica 4.1. Popis provedenih ispitivanja i normi prema kojima su provedena*

Naziv ispitivanja	Norma
Gustoća	BS 1377-2:1990, točka 7.2
Gustoća čvrstih čestica	ASTM D854-10
Vlažnost	ASTM D2216-10
Atterbergove granice	
Granica tečenja	BS 1377-2:1990, točka 4.4
Granica i indeks plastičnosti	1377-2:1990, točka 5
Granulometrija, areometriranje	HRN EN ISO 17892-4:2016

Prilikom pripreme ispitnih tijela za pokus izravnog posmika provedena su ispitivanja za određivanje vlažnosti i gustoće ispitnih tijela te gustoće čvrstih čestica. Na temelju dobivenih vrijednosti izračunato je niz izvedenih fizikalnih svojstava tla prikazanih u tablici 4.2. kako bi potvrdili homogenost ispitnih tijela. Iako postoji niz povezanih izraza za proračun fizikalnih svojstava tla, nastojalo se koristiti formule koje sadrže što više mjerenih veličina.

- Suha gustoća ispitnih tijela izračunata je prema formuli:

$$\rho_d = \frac{\rho}{(1 + w)} \left[ \frac{g}{cm^3} \right] \quad (4.1.)$$

$\rho_d$  – gustoća suhog uzorka

$\rho$  – gustoća uzorka

$w$  – vlažnost uzorka

- Stupanj zasićenosti materijala odnosno saturacija je omjer volumena vode i volumena pora te predstavlja postotak pora popunjenih vodom, a izračunata je prema formuli:

$$S_r = \frac{w \times \rho_s \times \rho_d}{(\rho_s - \rho_d) \times \rho_w} \quad [\%] \quad (4.2.)$$

$S_r$  – stupanj zasićenosti – saturacija

$w$  – vlažnost uzorka

$\rho_s$  – gustoća čvrstih čestica

$\rho_d$  – gustoća suhog uzorka

$\rho_w$  – gustoća vode

- Porozitet predstavlja omjer volumena pora i ukupnog volumena uzorka te je izračunat prema formuli:

$$n = \frac{(\rho_s - \rho_d)}{\rho_s} \quad [\%] \quad (4.3.)$$

$n$  – porozitet

$\rho_s$  – gustoća čvrstih čestica

$\rho_d$  – gustoća suhog uzorka

- Koeficijent pora je omjer volumena pora i volumena čvrstih čestica, a izračunat prema formuli:

$$e = \frac{(\rho_s - \rho_d)}{\rho_d} \quad [1] \quad (4.4.)$$

$e$  – koeficijent pora

$\rho_s$  – gustoća čvrstih čestica

$\rho_d$  – gustoća suhog uzorka

**Tablica 4.2.** Rezultati fizikalnih svojstava ispitnih tijela

Oznaka uzorka	Vlažnost $w$ [%]	Gustoća $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Suha gustoća $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Gustoća čvrstih čestica $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Porozitet $n$ [%]	Koeficijent pora $e$ [1]	Saturacija $S_r$ [%]
uz1a0	24.3	1.83	1.47	2.747	46.48	0.8683	76.88
uz1b0	23.3	1.85	1.50		45.25	0.8264	77.45
uz1c0	22.6	1.87	1.52		44.58	0.8043	77.19
uz2a0	22.7	1.88	1.53		44.18	0.7915	78.78
uz2b0	21.8	1.89	1.55		43.49	0.7695	77.82
uz2c0	25.4	1.93	1.54		43.90	0.7825	89.16
uz1a90	24.2	1.89	1.52		44.66	0.8070	82.38
uz1b90	26.7	1.88	1.48		46.06	0.8539	85.89
uz1c90	24.7	1.88	1.51		45.12	0.8220	82.54
uz2a90	25.6	1.86	1.48		46.13	0.8564	82.11
uz2b90	26.3	1.91	1.52		44.84	0.8130	88.86
uz2c90	25.4	1.87	1.49		45.66	0.8402	83.05

#### 4.1.1. Određivanje konzistentnih granica te klasifikacija tla

Iako je Atterberg definirao sedam granica konzistencije, danas se za klasifikaciju koherentnog tla upotrebljavaju samo tri od kojih najčešće granica plastičnosti [ $w_p$ ] i granica tečenja [ $w_L$ ] dok granica stezanja [ $w_s$ ] tek povremeno.



Slika 4.1. Atterbergove granice konzistencije

Za klasifikaciju tla najprije je određena zatečena vlaga [ $w_0$ ] odnosno vlažnost ispitivanih uzoraka. Vlažnost predstavlja omjer mase vode i mase čvrstih čestica te se izražava u postocima. Istu određujemo na način da vaganjem odredimo masu vlažnog uzorka kojeg zatim stavljamo sušiti u sušionik na 105 °C do prestanka promjene mase. Nakon sušenja vaganjem odredimo masu suhog uzorka, a razlika između mase vlažnog i mase suhog uzorka predstavlja masu vode.

Tablica 4.3. Rezultati određivanja zatečene vlažnosti tla

		ZATEČENA VLAGA $w_0$ [%]	
Oznaka posude		40	55
Masa posude	$M_p$ [g]	34.30	35.20
Masa posude i vlažnog uzorka	$M_{p1}$ [g]	90.80	88.10
Masa posude i suhog uzorka	$M_{p2}$ [g]	79.70	77.80
Masa vode	$M_w = M_{p1} - M_{p2}$ [g]	11.10	10.30
Masa suhog uzorka	$M_d = M_{p2} - M_p$ [g]	45.40	42.60
Vlažnost	$w = (M_w / M_d) \times 100$ [%]	24.45	24.18
<b>Vlažnost srednje</b>	<b>[%]</b>	<b>24.31</b>	

Granica plastičnosti [ $w_p$ ] predstavlja vlažnost tla kod koje se valjčić promjera 3 mm može plastično deformirati bez pojave površinskih pukotina. Ista se određuje na način da se uz dodavanje destilirane vode uzorci tla rukom valjaju u više valjčića do početka pojave površinskih pukotina. Prilikom pojave pukotina valjčići bi trebali biti približno promjera 3 mm. U slučaju da se na 3 mm promjera ne pojave pukotine znači da u tlu ima previše vode te se postupak ponavlja sa manje vlažnim tlom. Nakon formiranja više valjčića određuje se vlažnost takvih istih ranije opisanim standardnim postupkom određivanja vlažnosti.



*Slika 4.2. Valjčići na granici plastičnosti tijekom ispitivanja*

*Tablica 4.4. Rezultati određivanja granice plastičnosti*

		GRN. PLASTIČNOSTI	
		$w_p$ [%]	
Oznaka posude		V	X
Masa posude	$M_p$ [g]	59.90	59.30
Masa posude i vlažnog uzorka	$M_{p1}$ [g]	65.60	63.60
Masa posude i suhog uzorka	$M_{p2}$ [g]	64.70	62.80
Masa vode	$M_w = M_{p1} - M_{p2}$ [g]	0.90	0.80
Masa suhog uzorka	$M_d = M_{p2} - M_p$ [g]	4.80	3.50
Vlažnost	$w = (M_w / M_d) \times 100$ [%]	18.75	22.86
<b>Vlažnost srednje</b>	<b>[%]</b>	<b>20.80</b>	

Granica tečenja [ $w_L$ ] predstavlja onu vlažnost tla kod koje se pri malom poremećaju materijal počinje ponašati kao žitka masa. Kod ispitivanja granice tečenja konusnim penetrometrom, granica tečenja je ona vlažnost kod koje konusni šiljak mase 80 g, zašiljen pod kutom od  $30^\circ$  prodre u tlo 20 mm za 5 sekundi. Ispitivanje se provodi na način da se uzorak tla zamiješa i dobro homogenizira sa različitim količinama destilirane vode te se takvom smjesom napune posudice za ispitivanje. Nakon toga u uređaju se pušta konusni šiljak da prodire u smjesu 5 sekundi te se mjeri dubina prodiranja i određuje vlažnost smjese kako je ranije opisano. S obzirom da je teško pogoditi vlažnost kod koje će šiljak prodrti točno 20 mm, ispituju se 4 uzorka te formira dijagram granice tečenja u kojem se odredi vlažnost kod koje bi šiljak prodro točno 20 mm.

**Tablica 4.5.** Rezultati određivanja granice tečenja

	GRANICA TEČENJA			
	$w_L$ [%]			
Oznaka posude	47	38	64	49
Masa posude $M_p$ [g]	35.00	37.10	34.80	35.30
Masa posude i vlažnog uzorka $M_{p1}$ [g]	58.60	57.50	63.00	71.40
Masa posude i suhog uzorka $M_{p2}$ [g]	52.00	51.40	53.90	60.10
Masa vode $M_w = M_{p1} - M_{p2}$ [g]	6.60	6.10	9.10	11.30
Masa suhog uzorka $M_d = M_{p2} - M_p$ [g]	17.00	14.30	19.10	24.80
<b>Vlažnost</b> $w = (M_w/M_d) \times 100$ [%]	<b>38.82</b>	<b>42.66</b>	<b>47.64</b>	<b>45.56</b>
Dubina prodiranja [mm]	15.65	18.74	25.63	22.46
	15.52	18.68	25.27	22.7
<b>Dubina prodiranja srednje</b> [mm]	<b>15.59</b>	<b>18.71</b>	<b>25.45</b>	<b>22.58</b>



**Slika 4.3.** Proces homogeniziranja uzorka



**Slika 4.4.** Proces ispitivanja konusnim penetrometrom

Tablica 4.6. Rezultati provedenih ispitivanja za određivanje Atterbergovih granica

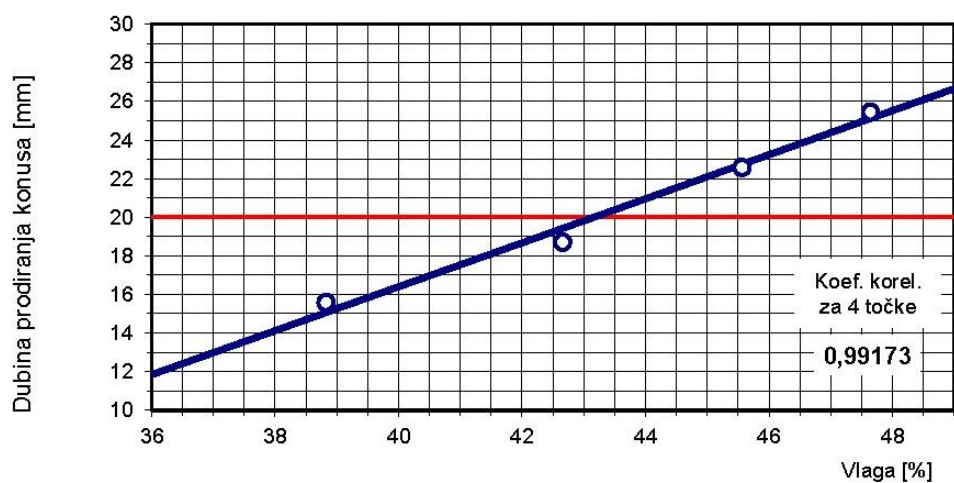
	ZATEČENA VLAGA		GRN. PLASTIČNOSTI		GRANICA TEČENJA			
	$w_0$ [%]		$w_p$ [%]		$w_L$ [%]			
Masa vode [g]	11,10	10,30	0,90	0,80	6,60	6,10	11,30	9,10
Masa suhe tvari [g]	45,40	42,60	4,80	3,50	17,00	14,30	24,80	19,10
Vlaga [%]	24,45	24,18	18,75	22,86	38,82	42,66	45,56	47,64
Vlaga <sub>prosjek</sub> [%]	24,31		20,80		Dubina prodiranja konusa lab. penetrometra [mm]			
					15,59	18,71	22,58	25,45

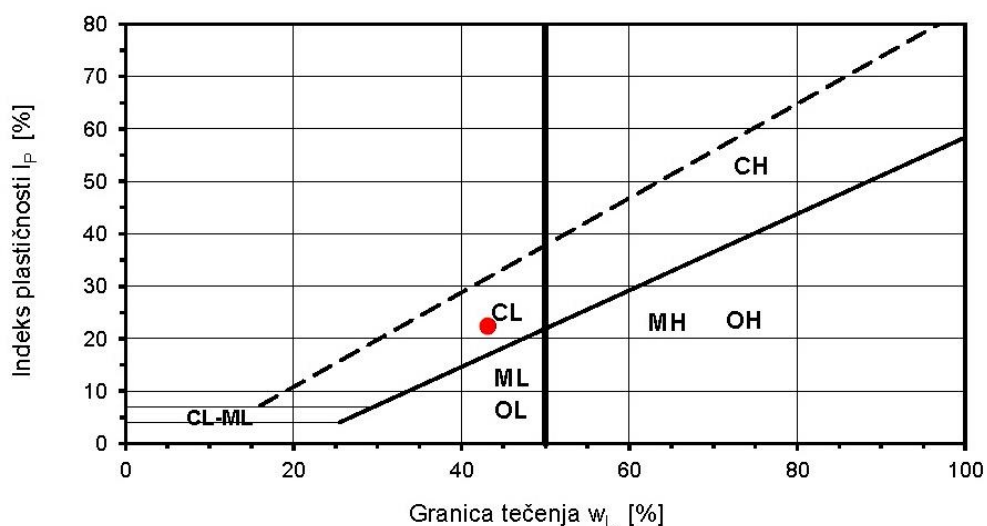
Zatečena vlaga	$w_0$ [%]	24,31
Granica plasičnosti	$w_p$ [%]	20,80
Granica tečenja	$w_L$ [%]	43,16
Indeks plastičnosti	$I_p$ [%]	22,36
Indeks konzistencije	$I_c$ [1]	0,843

Klasifikacija prema USCS	<b>CL</b>
--------------------------	-----------



Slika 4.5. Dijagram granice tečenja



Slika 4.6. Dijagram plastičnosti

Prema provedenim ispitivanjima i određenim Atterbergovim granicama tlo je sukladno USC sustavu klasificirano kao CL – neorganska glina niske plastičnosti.

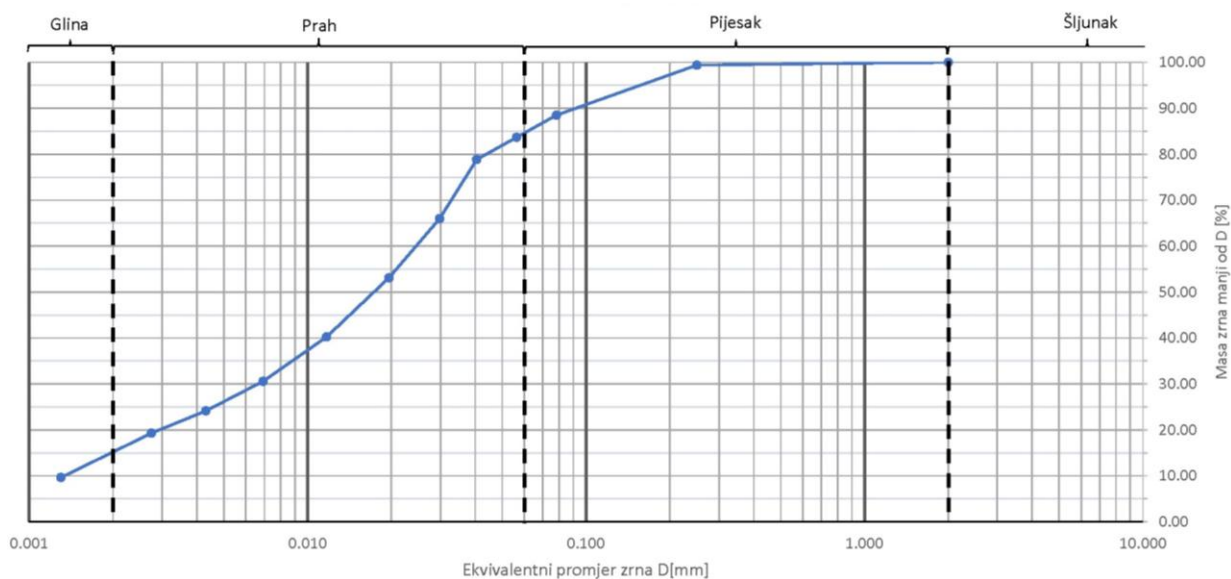


### 4.1.2. Određivanje granulometrijskog sastava tla areometriranjem

Da bi pobliže opisali tlo proveden je pokus određivanja granulometrijskog sastava. Za koherentna tla, odnosno tla koja sadrže zrna manja od 0,06 mm, granulometrijski sastav se određuje areometriranjem. Provedenim ispitivanjem utvrđeno je da tlo sadrži približno 15% pijeska, 70% praha te 15% gline (slika 4.8).



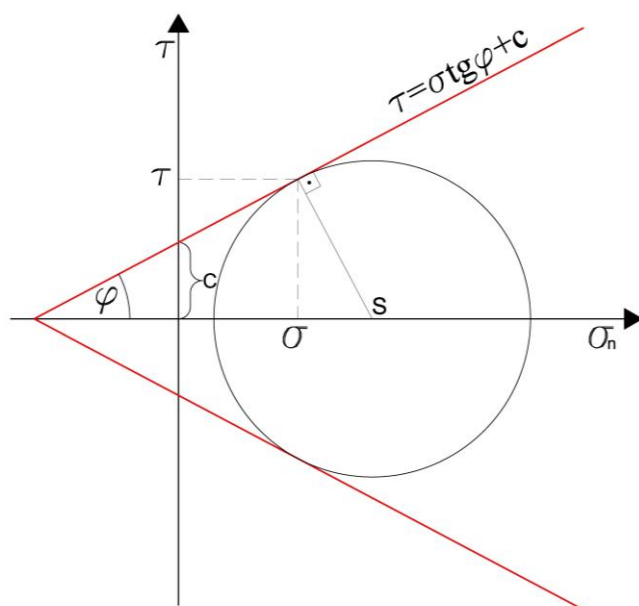
Slika 4.7. Provođenje pokusa areometriranja



Slika 4.8. Granulometrijski dijagram

## 4.2. Pokus izravnog posmika

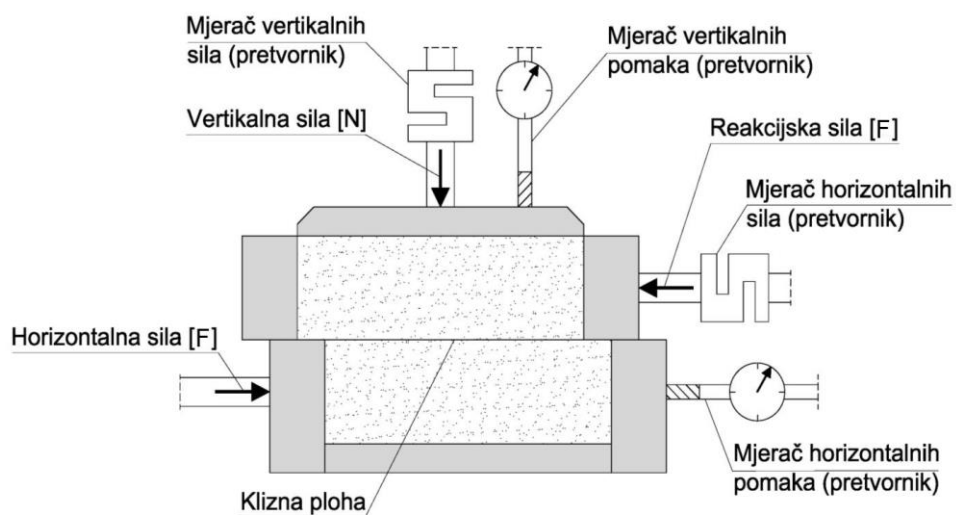
Jedno od najvažnijih inženjerskih svojstava tla je posmična čvrstoća. Posmična čvrstoća je vrijednost posmičnog naprezanja u trenutku sloma, duž klizne plohe unutar mase tla [2]. Važno je razlikovati vršnu i rezidualnu posmičnu čvrstoću tla. Vršna posmična čvrstoća je najveća očitana vrijednost te je u projektiranju mjerodavna kod malih deformacija, odnosno kada je naprezanje znatno manje od onog koje bi izazvalo slom [4]. Kada očekujemo da bi posmično naprezanje moglo doseći vršnu posmičnu čvrstoću te izazvati veće deformacije mjerodavna je vrijednost rezidualne posmične čvrstoće. Naprezanja koja odgovaraju slomu tla, odnosno velikim deformacijama, mogu se opisati parom pravaca u Mohrovom  $\sigma$ - $\tau$  dijagramu. Uobičajeni zapis pravca je preko nagiba pravca i odsječka na osi  $\tau$  pomoću parametara posmične čvrstoće kohezije ( $c$ ) i kuta unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ) (slika 4.9.). Takav pravac još se naziva Mohr-Coulombov kriterij posmične čvrstoće. U području omeđenom s takva dva pravca se nalaze sva moguća, realna stanja naprezanja kao i sve moguće, realne Mohrove kružnice [1].



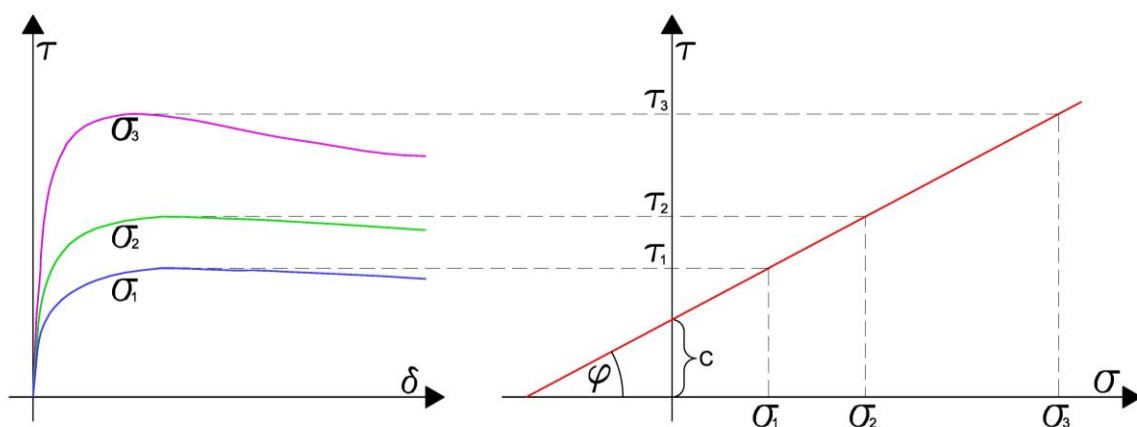
- $\tau$  – posmična čvrstoća u trenutku sloma
- $\sigma_n$  – normalno naprezanje na plohi sloma
- $c$  – kohezija
- $\varphi$  – kut unutarnjeg trenja

Slika 4.9. Mohr-Coulombov kriterij posmične čvrstoće

Često korišteni uređaj za laboratorijsko određivanje parametara posmične čvrstoće je uređaj za izravan posmik. Princip rada tog uređaja je da se ispitno tijelo optereti normalnim naprezanjem nanošenjem vertikalne sile, te se horizontalnom silom izazivaju posmična naprezanja po sredini uzorka (kliznoj plohi). Ovisno o tome da li se provodi drenirani ili ne drenirani pokus izravnog posmika ispitivanje se može odvijati u dvije faze. U slučaju dreniranog pokusa prva faza je konsolidacija uzorka nakon čeka počinje sporo smicanje, dok prilikom nedreniranog pokusa odmah započinjemo sa brzim smicanjem. Promjenom normalnog naprezanja na plohu smicanja mijenjaju se i posmična naprezanja u trenutku sloma. Zbog toga se za jedno ispitivanje obično uzimaju tri ispitna tijela koja se opterećuju sa tri različita normalna naprezanja, svako sljedeće duplo većim od prethodnog. Na taj način dobivamo koordinate triju točaka kroz koje povlačeći pravac dobivamo Mohr-Coulombov kriterij posmične čvrstoće [1] (slika 4.11.). Prednosti ovog pokusa su što je relativno jednostavan, brz i jeftin, a najveći nedostatak to što prisilno izazivamo plohu sloma.



Slika 4.10. Shematski prikaz uređaja za izravan posmik



Slika 4.11. Shematski prikaz rezultata jednog ispitivanja sa tri ispitna tijela

#### 4.2.1. Opis uređaja i popratnog softwarea

Za pokus izravnog posmika korišten je uređaj Shearmatic proizvođača Wykeham Farrance i Controls [18]. Shearmatic je automatski uređaj za pokus izravnog i reverznog posmika sa elektromehaničkim - servo upravljanjem. Pomoću namjenskog pribora uređaj se može koristiti i samo za edometarski test konsolidacije. Uređajem upravljamo pomoću popratnog softwarea preko zaslona osjetljivog na dodir koji nam omogućuje da prije samog testa podesimo postavke ispitivanja, te odaberemo način snimanja podataka. Također pomoću zaslona pokrećemo, pauziramo i zaustavljamo pokus, te numerički i grafički pratimo očitavanja tijekom izvršenja pokusa.

Sve sile i pomake uređaj automatski očitava pomoću mjernih instrumenata (pretvornika) za sile kapaciteta 10 kN, te mjernog instrumenta (pretvornika) za vertikalni pomak (max. 10 mm) i mjernog instrumenta (pretvornika) za horizontalni pomak (max. 25 mm). Horizontalno i vertikalno opterećenje nanosi se i održava konstantnim pomoću dva koračna motora visoke preciznosti. Sve očitane podatke uređaj sprema na USB memoriju u TXT formatu.

Velika prednost ovog uređaja je da, ovisno o podešenim postavkama, automatski pokreće pokus izravnog posmika nakon završene konsolidacije.



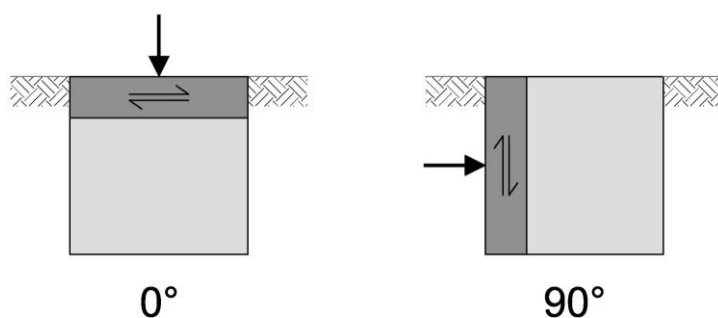
Slika 4.12. Prikaz uređaja sa glavnim dijelovima - (izvor [18])

Tablica 4.7. Popis glavnih dijelova uređaja - (izvor [18])

Oznaka	Opis
1	Elektromehanički - servo upravljački sustav
2	Mjerni instrument (pretvornik) vertikalnih sila
3	Čelija za izravni posmik
4	Kadica za ćeliju
5	Zaslon osjetljiv na dodir
6	Mjerni instrument (pretvornik) vertikalnih pomaka
7	Mjerni instrument (pretvornik) horizontalnih sila
8	Mjerni instrument (pretvornik) horizontalnih pomaka

#### 4.2.2. Priprema ispitnih tijela i tijek ispitivanja

S obzirom da je cilj ovog rada ispitati anizotropiju posmične čvrstoće gline, provedena su po dva pokusa izravnog posmika za dva različita smjera u odnosu na horizontalu ( $0^\circ$  i  $90^\circ$ ). Pošto se svaki od pokusa sastoji od tri ispitna tijela sa tri različita normalna naprezanja, ukupno je ispitano 12 ispitnih tijela gline. Na terenu su uzeta dva jednaka neporemećena uzorka pri čemu se posebno pazilo na prirodnu orijentaciju uzoraka u prostoru te se kod pripreme ispitnih tijela za izravan posmik izrazito pazilo na smjer smicanja u odnosu na horizontalu.



*Slika 4.13. Smjer uzimanja uzoraka i smicanja*



*Slika 4.14. Proces izdvajanja dijela ispitnog uzorka za pripremu ispitnih tijela*

Iz neporemećenog uzorka kojeg smo uzeli na terenu posebnim kalupom izrezuju se i oblikuju ispitna tijela koja odgovaraju ćeliji za pokus izravnog posmika pritom pazeći da se uzorci ne poremete. Svaki uzorak mora biti tlocrtnih dimenzija  $60 \times 60$  mm, te visine 20 mm.



*Slika 4.15. Proces oblikovanja ispitnog tijela za smjer smicanja  $0^\circ$*



*Slika 4.16. Proces oblikovanja ispitnog tijela za smjer smicanja  $90^\circ$*



*Slika 4.17. Proces oblikovanja ispitnog tijela u kalupu dimenzija  $60 \times 60 \times 20$  mm*

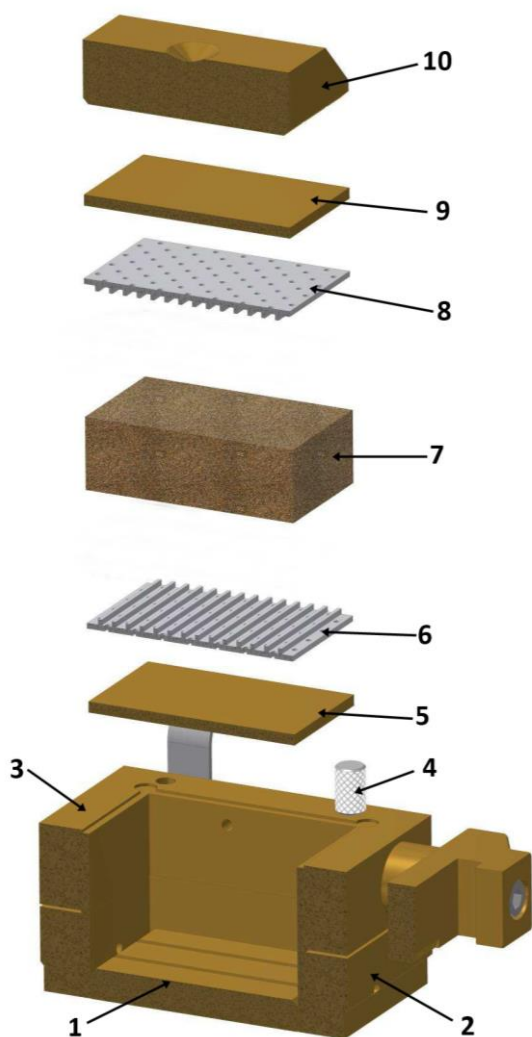


*Slika 4.18. Ispitno tijelo izrezano kalupom i poravnatim kontaktnim ploham*



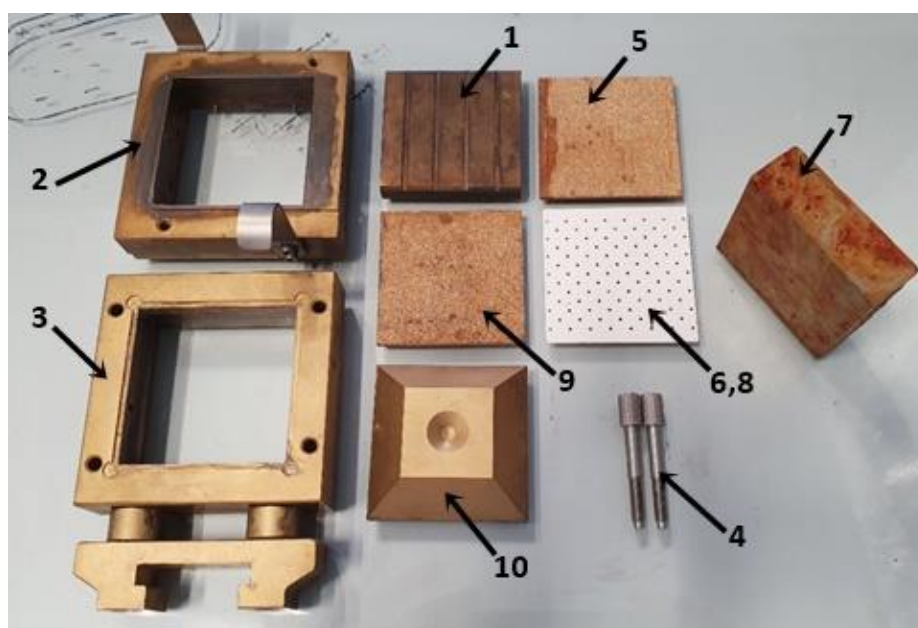
*Slika 4.19. Potpuno oblikovano ispitno tijelo istisnuto iz kalupa*

Kada je ispitno tijelo pripremljeno ugrađuje se u ćeliju uređaja za izravni posmik kao što je prikazano na slici 4.20.



- 1- Pomično dno ćelije
- 2- Donji okvir ćelije
- 3- Gornji okvir ćelije
- 4- Sigurnosni vijak
- 5- Donja porozna pločica
- 6- Donja perforirana pločica s rebrima
- 7- Ispitno tijelo tla
- 8- Gornja perforirana pločica s rebrima
- 9- Gornja porozna pločica
- 10- Pokrovna kapa ćelije

Slika 4.20. Prikaz dijelova ćelije i ugradnje ispitnog tijela u ćeliju (izvor [18])



Slika 4.21. Rastavljena ćelija uređaja za izravni posmik (legenda na prethodnoj slici)

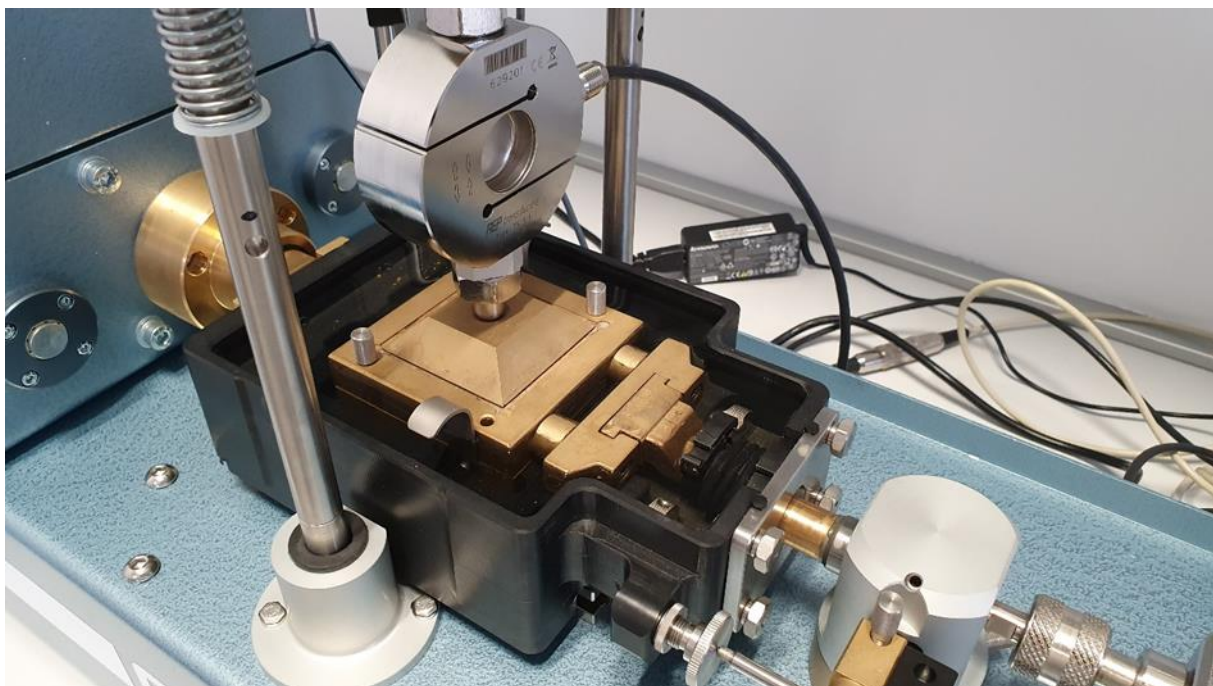


*Slika 4.22. Ispitno tijelo ugrađeno u donji okvir ćelije*



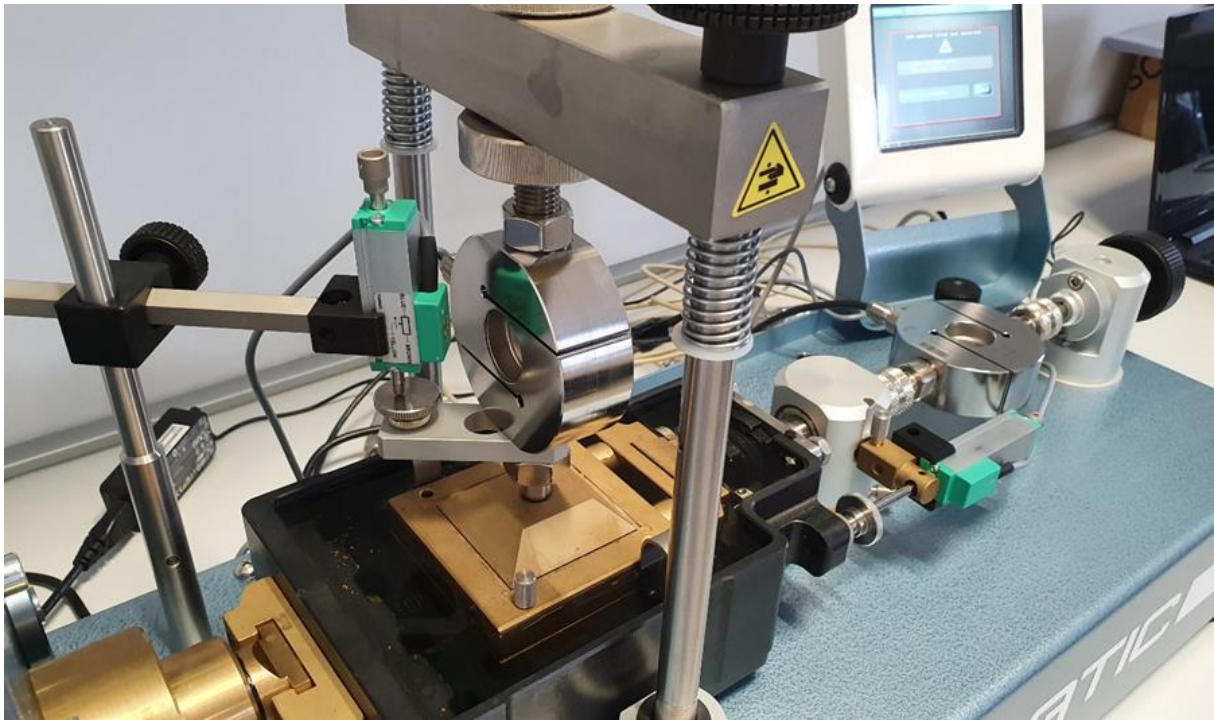
*Slika 4.23. Potpuno sastavljena ćelija s ugrađenim ispitnim tijelom*

Tako sastavljena ćelija ugrađuje se u vanjsku kutiju uređaja za izravan posmik. Nakon ugradnje, svi mehanički i mjerni sklopovi dovode se u kontakt sa ćelijom i precizno podešavaju.

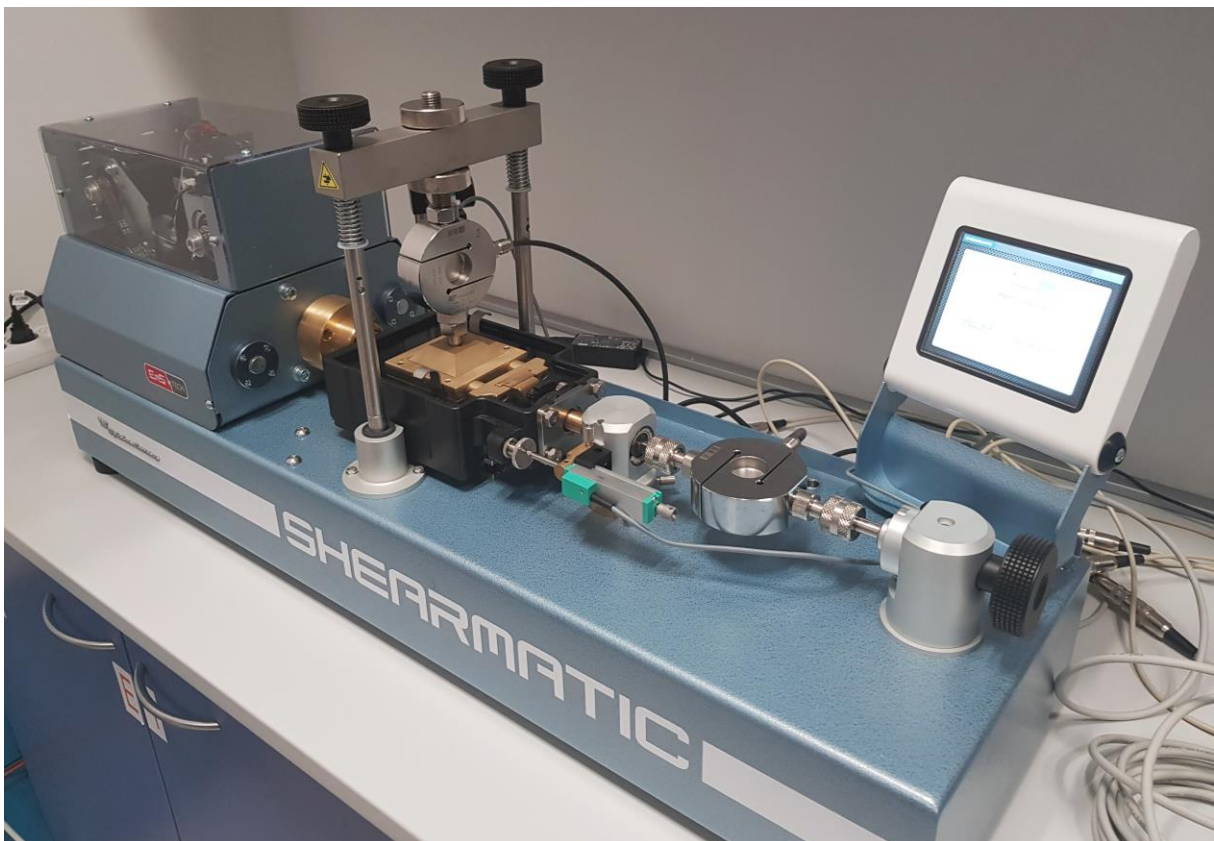


*Slika 4.24. Ćelija s ispitnim tijelom ugrađena u vanjsku kutiju za posmik, postavljenu u mehaničke i mjerne sklopove uređaja za ispitivanje*





*Slika 4.25. Pogled na mjerne sustave uređaja za izravni posmik*



*Slika 4.26. Konfiguracija uređaja za izravni posmik s ugrađenim ispitnim tijelom za ispitivanje posmične čvrstoće neposredno prije pokretanja pokusa (vrlo je bitno , ukoliko želimo da uređaj automatski započne smicanje nakon konsolidacije, ukloniti sigurnosne vijke)*

Svi pokusi izravnog posmika provedeni su u skladu s normom BS 1377-7:1990, točka 4. Prije samog pokusa direktnog posmika ispitna tijela su konsolidirana 24 sata. U svakoj seriji prvo ispitno tijelo je opterećeno normalnim naprežanjem 50,0 kPa, drugo 100,0 kPa, a treće 200,0 kPa.

Nakon konsolidacije uređaj automatski započinje smicanje te mu je prije pokretanja potrebno zadati sve parametre za pokus izravnog posmika. Da bi izbjegli utjecaj purnog tlaka u zoni smicanja odnosno da bi normalno naprežanje mogli smatrati efektivnim važno je odrediti maksimalnu brzinu smicanja. Maksimalna brzina smicanja ovisi o koeficijentu vodopropusnosti odnosno o konsolidacijskim svojstvima tla te se određuje iz konsolidacijske krivulje prema sljedećoj formuli:

$$v_{max} = \frac{\delta_f}{12,7 \times t_{100}} \text{ [mm/min]} \quad (4.5.)$$

$v_{max}$  – maksimalna brzina smicanja

$\delta_f$  – horizontalni pomak kod kojeg se postiže vršno posmično naprežanje

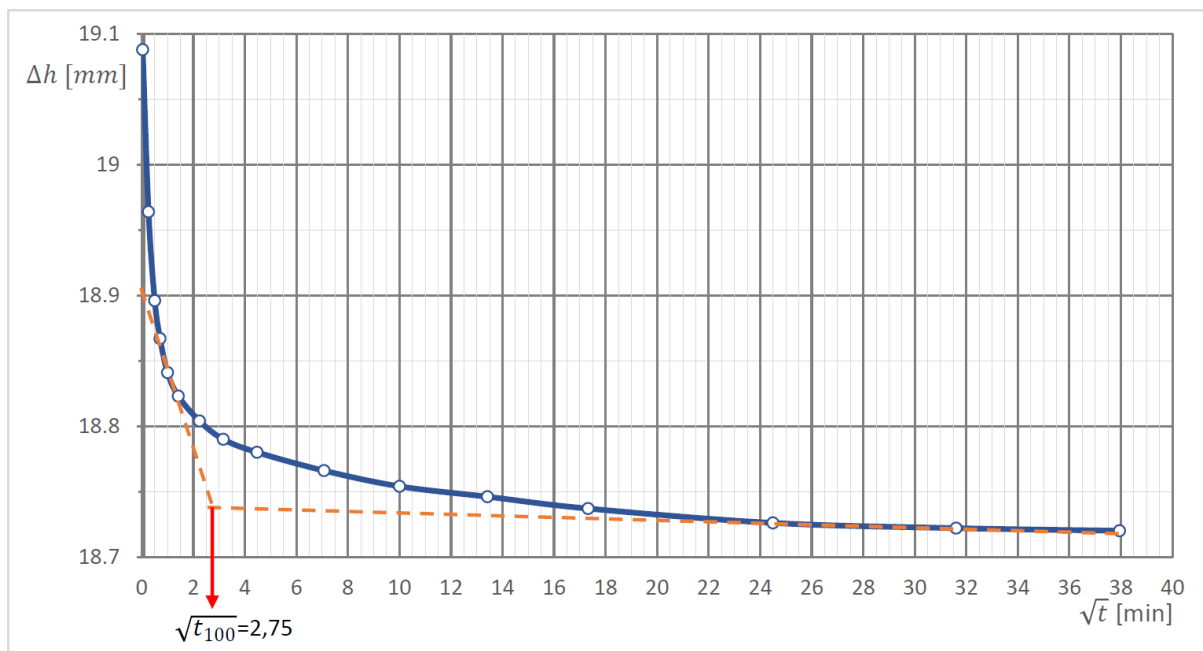
$t_{100}$  – vrijeme 100% primarne konsolidacije

Horizontalni pomak kod kojeg se postiže vršno posmično naprežanje iz laboratorijske prakse iznosi 3 - 5% duljine ispitnog tijela što iznosi 1,8 – 3,0 mm. Vrijeme  $t_{100}$  očitava se na sjecištu tangenti na krivulju primarne i sekundarne konsolidacije u koordinatnom sustavu Taylorove konsolidacijske krivulje s ordinatom  $\Delta h$  u milimetrima te apscisom kvadratnog korijena vremena  $t$  (slika 4.27.).

Na temelju iskustvenih vrijednosti laboratorijske prakse za  $\delta_f$  je usvojena najmanja vrijednost od 1,8 mm. Iz Taylorovog grafikona konsolidacije očitano je  $\sqrt{t_{100}} = 2,75$  min iz čega je  $t_{100} = 7,56$  min. Uvrštavanjem vrijednosti u formulu dobijemo vrijednost maksimalne brzine smicanja.

$$v_{max} = \frac{\delta_f}{12,7 \times t_{100}} = \frac{1,8}{12,7 \times 7,56} = 0,019 \text{ mm/min}$$

Da bi utjecaj pornog tlaka sveli na zanemarivo malu vrijednost odnosno na tehničku nulu brzina smicanja je usvojena kao  $v = 0,01 \text{ mm/min}$ .



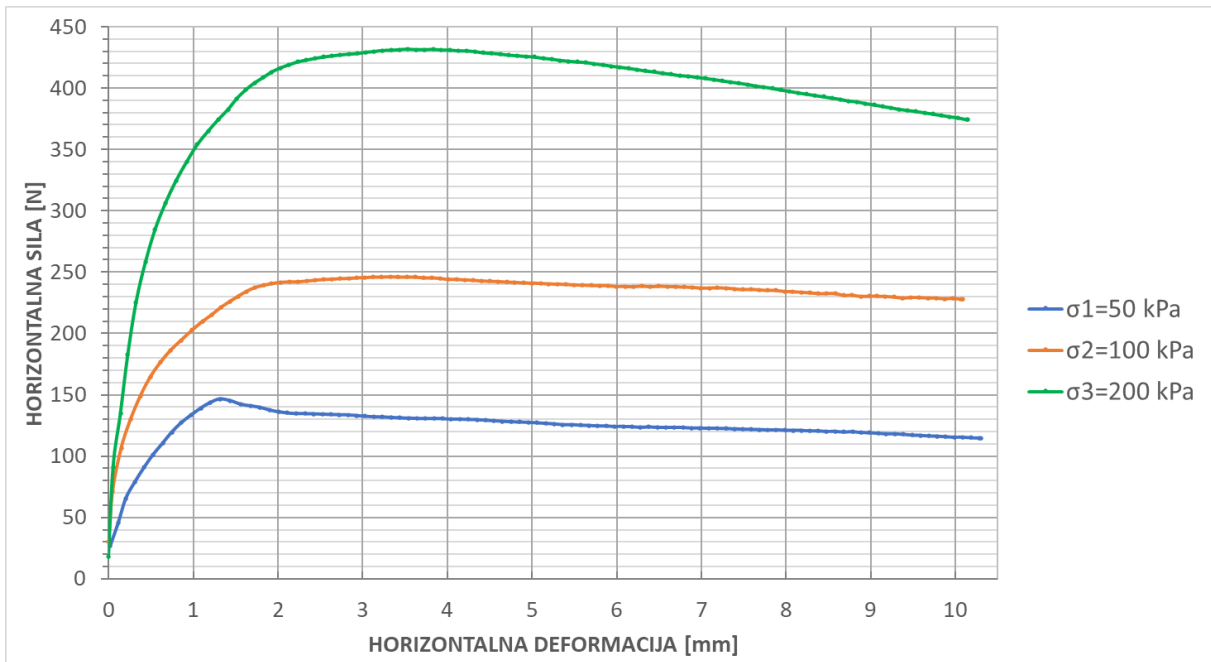
Slika 4.27. Taylorova konsolidacijska krivulja za određivanje vremena  $t_{100}$

### 4.2.3. Rezultati ispitivanja i obrada podataka

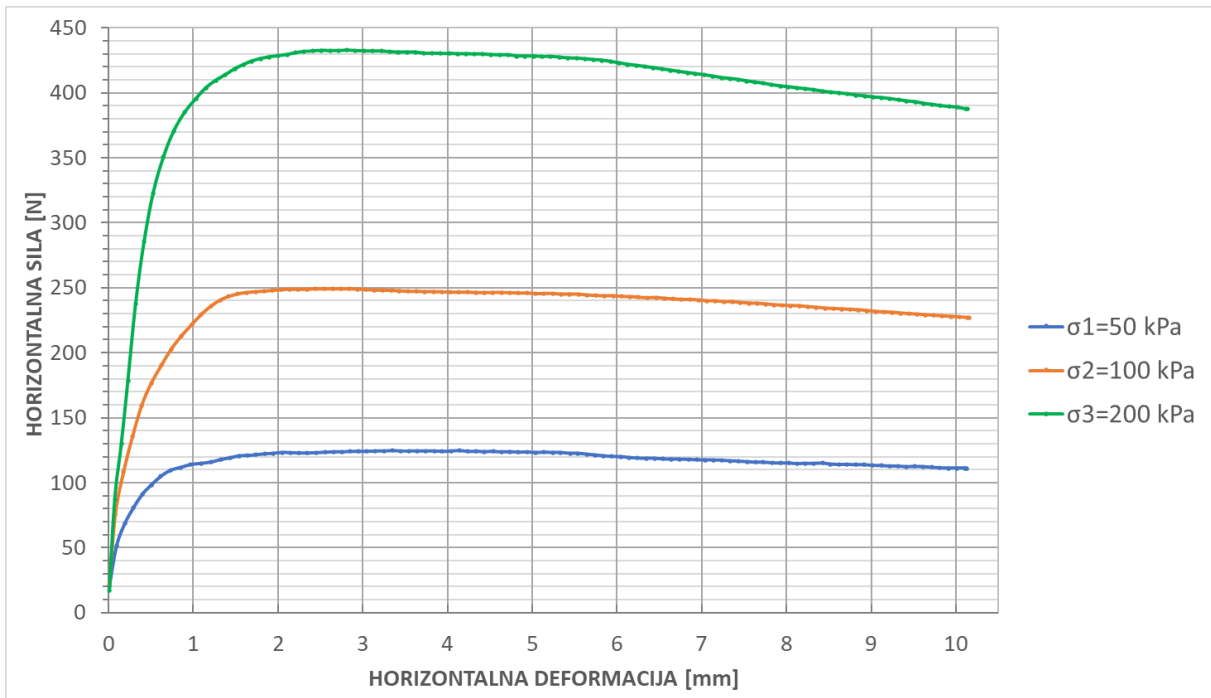
Nakon provedenih ispitivanja, za svako ispitno tijelo, dobiveni su podaci u TXT formatu. Podaci su zatim uneseni u računalni program MS Excel gdje su detaljno obrađeni i interpretirani grafički i tablično. Iz podataka su formirani dijagrami tijeka smicanja kod kojih je na horizontalnoj osi apscisa horizontalna deformacija, a na vertikalnoj osi ordinata horizontalna sila. Nakon toga očitane su maksimalne horizontalne sile i podijeljene sa površinom klizne plohe te su tako dobivena maksimalna odnosno vršna posmična naprezanja.

Nakon što su na isti način određena vršna posmična naprezanja za svako normalno vertikalno naprezanje, formirani su dijagrami posmične čvrstoće kod kojih je na horizontalnoj osi apscisa normalno vertikalno naprezanje ( $\sigma$ ), a na vertikalnoj osi ordinata vršno posmično naprezanje ( $\tau$ ). Povlačeći pravac kroz tako dobivene 3 točke od 3 različita normalna vertikalna naprezanja dobije se Mohr - Coulombov kriterij čvrstoće iz kojeg je jednostavno odrediti koheziju ( $c$ ) i kut unutarnjeg trenja( $\varphi$ ).

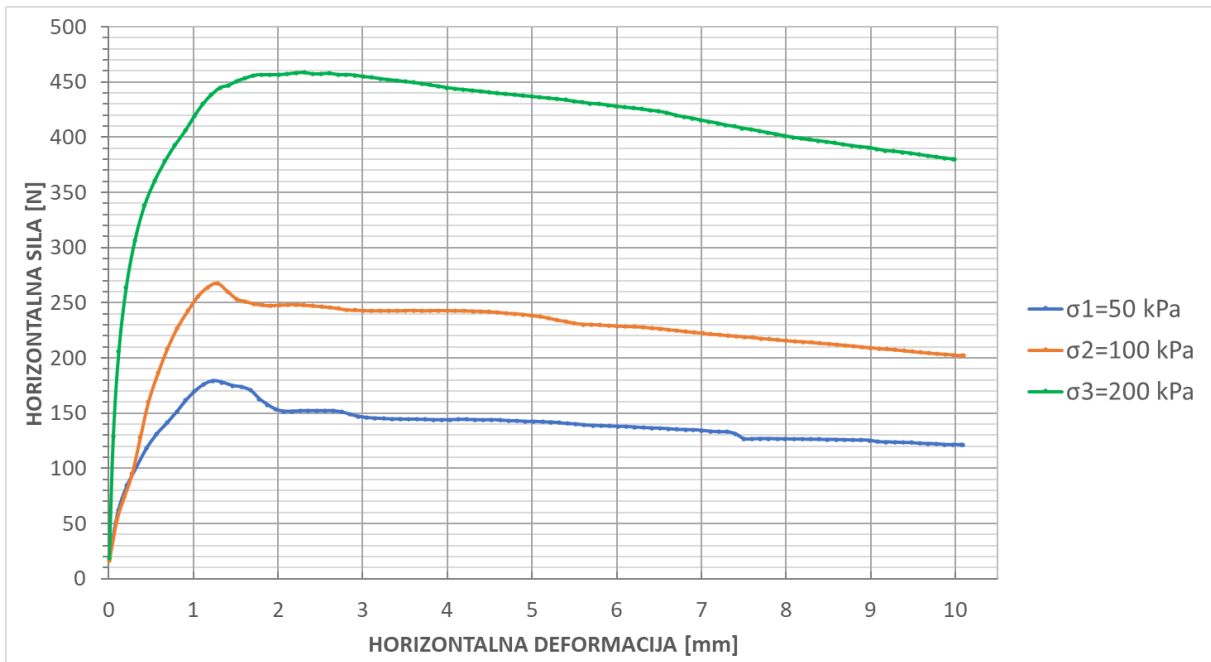
Uz tako obrađene podatke mjerenih vrijednosti, isti su također statistički obrađeni linearnom regresijom. S obzirom da su provedena po dva pokusa izravnog posmika za dva različita smjera u odnosu na horizontalu ( $0^\circ$  i  $90^\circ$ ), izračunata je srednja vrijednost za svaki od smjerova te uspoređene dobivene vrijednosti.



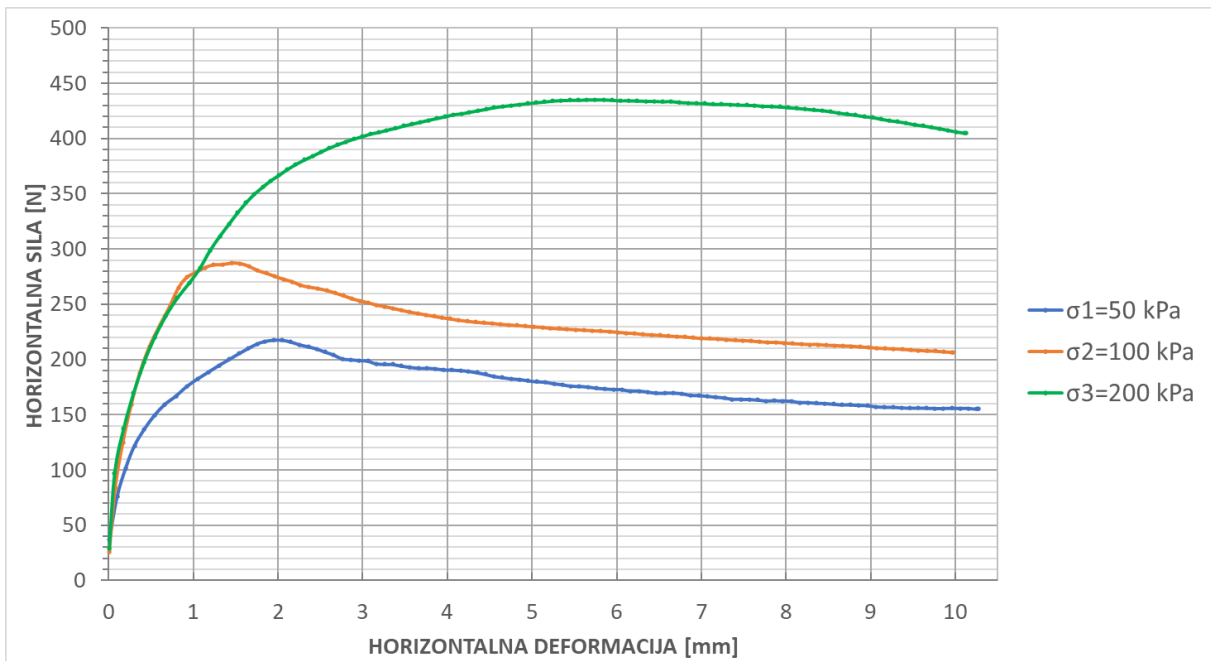
Slika 4.28. Dijagram tijeka posmika za ispitivanje serije 1 pod  $0^\circ$  (3 ispitna tijela)



Slika 4.29. Dijagram tijeka posmika za ispitivanje serije 2 pod  $0^\circ$  (3 ispitna tijela)



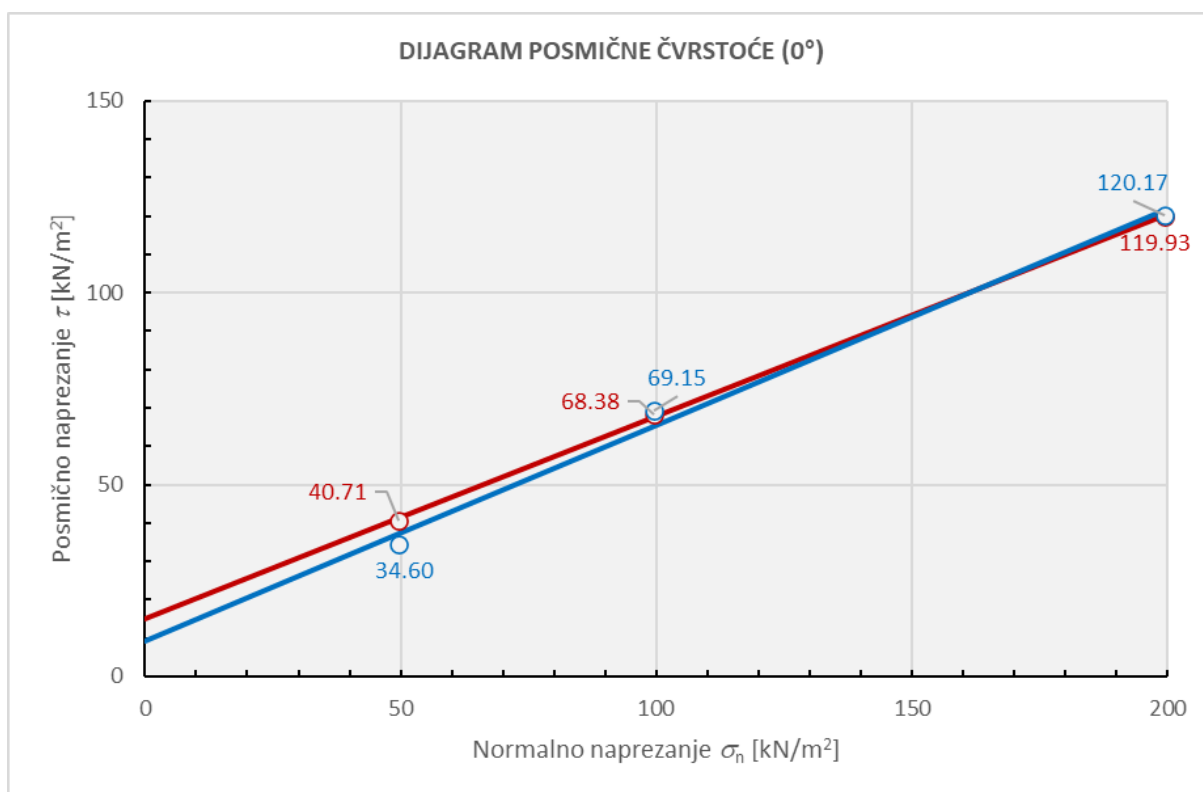
*Slika 4.30. Dijagram tijeka posmika za ispitivanje serije 1 pod 90° (3 ispitna tijela)*



*Slika 4.31. Dijagram tijeka posmika za ispitivanje serije 2 pod 90° (3 ispitna tijela)*

Tablica 4.8. Vrijednosti dobivenih rezultata ispitivanja pod kutom od 0° u odnosu na horizontalu

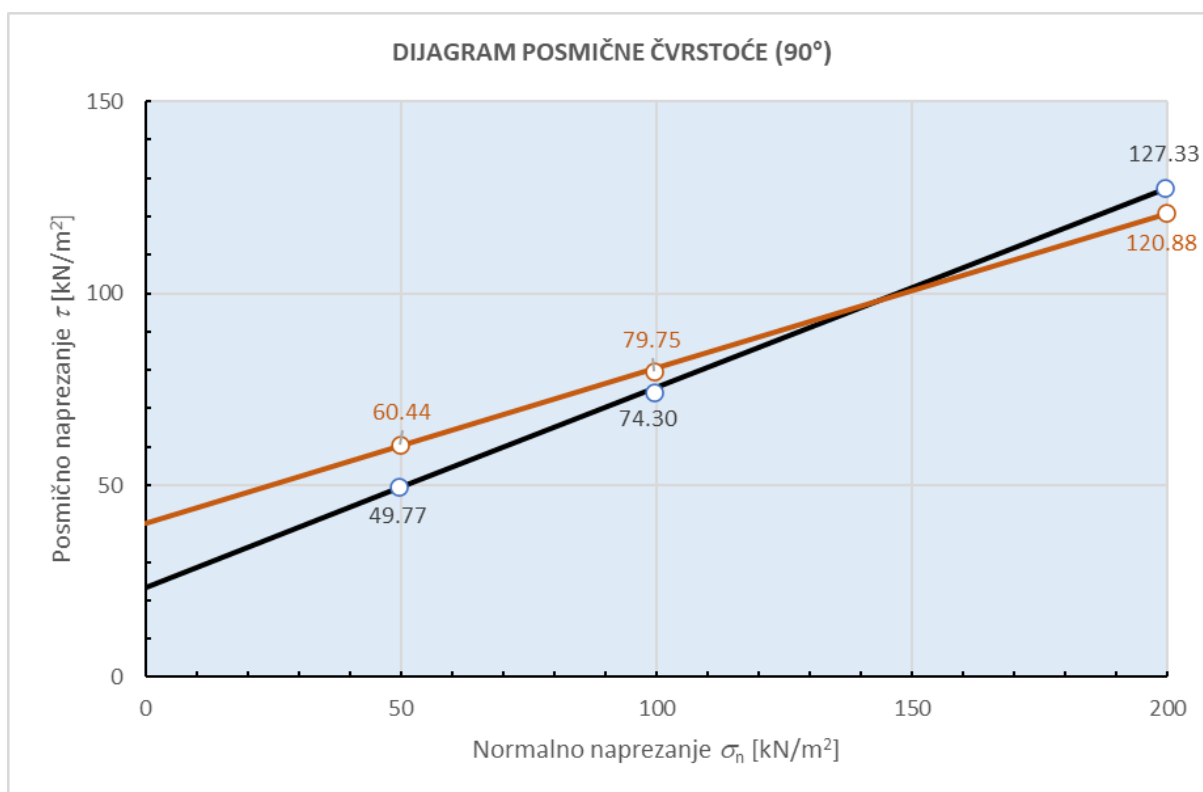
UZORAK 0°							
	Mjereno		Linearna regresija				
	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Regres. $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	tg $\varphi$ [1]	$\varphi$ [°]	koef.korel. [1]
uzorak 1	0.00	0.00	15.17	15.17	0.5264	27.8	0.9998
	49.58	40.71	41.26				
	99.50	68.38	67.55				
	199.54	119.93	120.21				
uzorak 2	0.00	0.00	9.35	9.35	0.5619	29.3	0.9968
	49.58	34.60	37.20				
	99.50	69.15	65.25				
	199.54	120.17	121.46				



Slika 4.32. Dijagram posmične čvrstoće smjer ispitivanja pod 0°

Tablica 4.9. Vrijednosti dobivenih rezultata ispitivanja pod kutom od 90° u odnosu na horizontalu

UZORAK 90°							
	Mjereno		Linearna regresija				
	$\sigma$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Regres. $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	tg $\varphi$ [1]	$\varphi$ [°]	koef.korel. [1]
uzorak 1	0.00	0.00	23.44	23.44	0.5193	27.4	0.9998
	49.63	49.77	49.21				
	99.56	74.30	75.14				
	199.54	127.33	127.06				
uzorak 2	0.00	0.00	39.98	39.98	0.4044	22.0	0.9999
	49.75	60.44	60.11				
	99.56	79.75	80.25				
	199.60	120.88	120.71				



Slika 4.33. Dijagram posmične čvrstoće smjer ispitivanja pod 90°

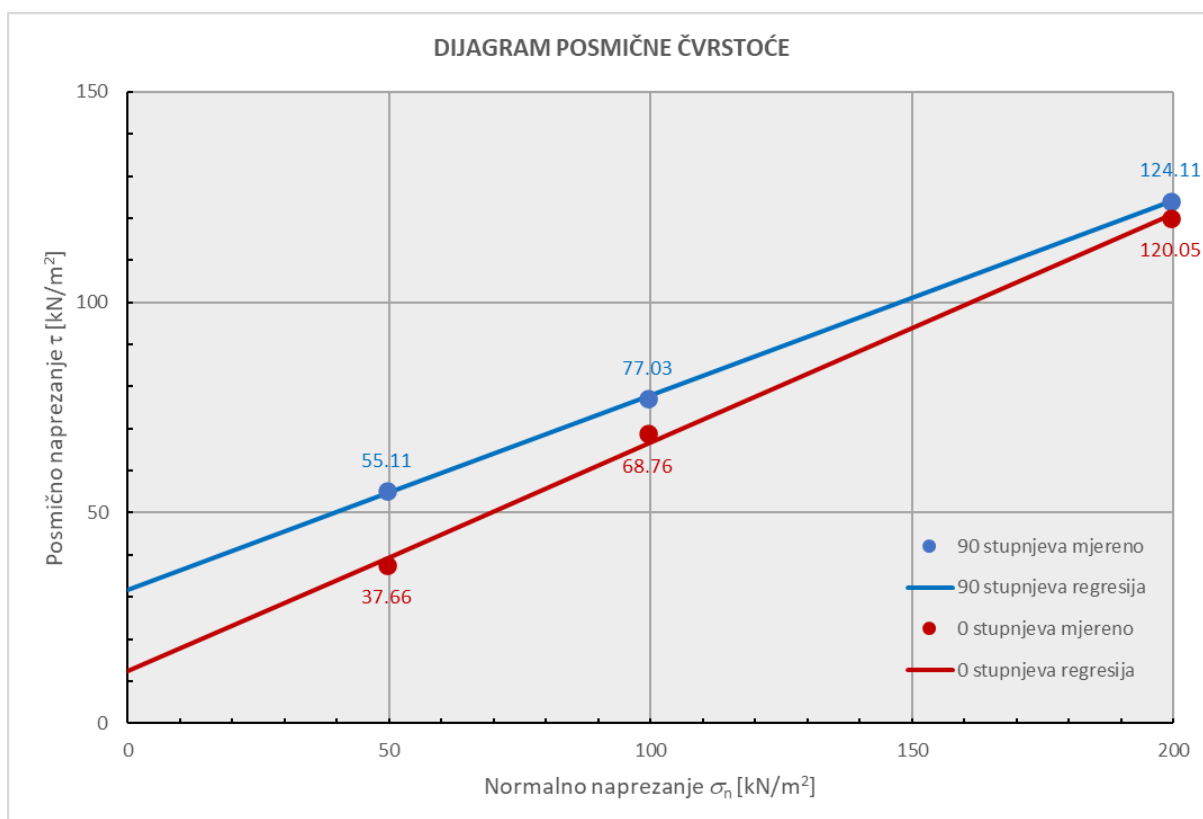


Tablica 4.10. Srednje vrijednosti dobivenih rezultata ispitivanja pod kutom od 0° u odnosu na horizontalu

UZORAK 0° - srednje vrijednosti						
Mjereno srednje vrijednosti		Linearna regresija				
$\sigma_{\text{srednje}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\tau_{\text{srednje}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Regres. $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	tg $\varphi$ [1]	$\varphi$ [°]	koef.korel. [1]
0.00	0.00	12.26				
49.58	37.66	39.23	<b>12.26</b>	0.5441	<b>28.6</b>	0.9987
99.50	68.76	66.40				
199.54	120.05	120.83				

Tablica 4.11. Srednje vrijednosti dobivenih rezultata ispitivanja pod kutom od 90° u odnosu na horizontalu

UZORAK 90° - srednje vrijednosti						
Mjereno srednje vrijednosti		Linearna regresija				
$\sigma_{\text{srednje}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\tau_{\text{srednje}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Regres. $\tau$ [kN/m <sup>2</sup> ]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	tg $\varphi$ [1]	$\varphi$ [°]	koef.korel. [1]
0.00	0.00	31.71				
49.69	55.11	54.66	<b>31.71</b>	0.4619	<b>24.8</b>	0.9999
99.56	77.03	77.69				
199.57	124.11	123.88				



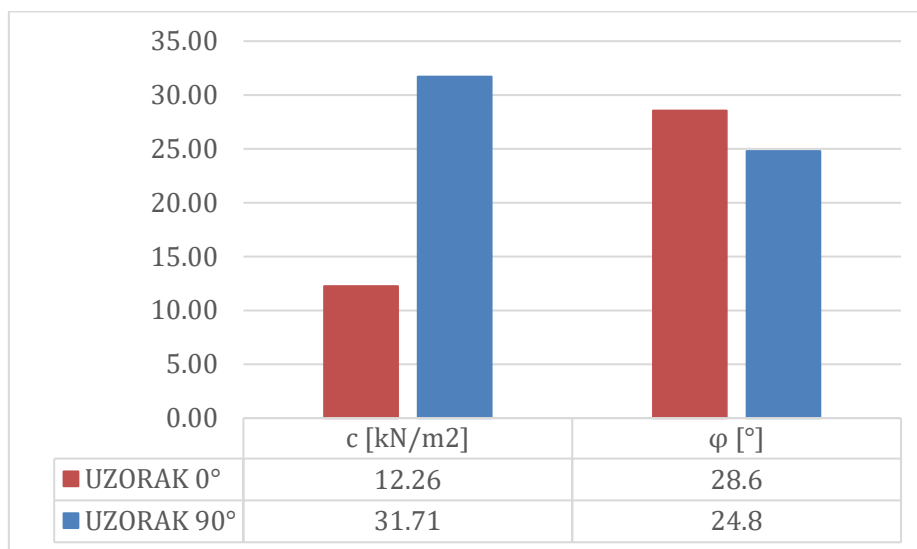
Slika 4.34. Dijagram posmične čvrstoće srednjih vrijednosti za oba smjera ispitivanja

#### 4.2.4. Analiza rezultata posmika

Analizom dobivenih rezultata pokusa izravnog posmika (*tablica 4.12.*) te grafičkom interpretacijom istih (*slika 4.35.*) možemo uočiti značajne razlike u vrijednostima parametara posmične čvrstoće s obzirom na smjer ispitivanja. Kut unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ) veći je za  $3,8^\circ$  odnosno približno 15% u slučaju ispitivanja pod kutom od  $0^\circ$ . Međutim, mnogo izraženija razlika vidljiva je kod kohezije ( $c$ ) koja je više nego dvostruko veća kod ispitivanja pod kutom od  $90^\circ$  odnosno za  $19,45 \text{ kN/m}^2$ .

*Tablica 4.12. Prikaz razlika u rezultatima pokusa izravnog posmika*

	UZORAK $0^\circ$	UZORAK $90^\circ$	RAZLIKA	
			[1]	[%]
$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	12.26	31.71	19.45	<b>159</b>
$\varphi$ [°]	28.6	24.8	3.8	<b>15</b>



*Slika 4.35. Graf prikaza razlika u rezultatima pokusa izravnog posmika*

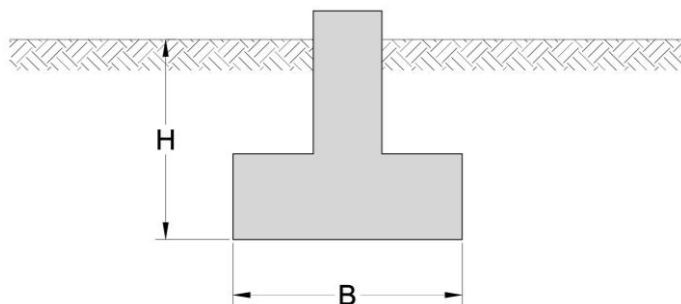
## 5. Primjer proračuna nosivosti tla prema Eurocodu 7

### 5.1. Proračun nosivosti tla ispod temelja za granično stanje sloma (GEO)

Da bi uvidjeli koliki doprinos ima razlika u dobivenim rezultatima parametara posmične čvrstoće na proračun realnih konstrukcija proveden je proračun nosivosti tla ispod temelja sukladno Eurocodu 7 za parametre tla dobivene ispitivanjem pod  $0^\circ$  i pod  $90^\circ$ . Za ovaj primjer uzet je temelj širine  $B = 1,0$  m, temeljen na dubini od  $H = 1,0$  m (slika 5.1.).

Tablica 5.1. Parametri tla dobiveni ispitivanjem za  $0^\circ$  i  $90^\circ$

SMJER ISPITIVANJA	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
$0^\circ$	28,6	12,26	18,8
$90^\circ$	24,8	31,71	18,8



Slika 5.1. Grafički prikaz temelja za proračun nosivosti tla

S obzirom da je u Hrvatskoj za granično stanje sloma tla (GEO) generalno prihvaćen proračunski pristup 3, parametri tla se dijele parcijalnim faktorima M2 prikazanim u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Parcijalni faktori parametara tla ([19])

PARAMETRI TLA	SIMBOL	M1	M2
Kut unutarnjeg trenja	$\gamma_\varphi$	1,00	1,25
Efektivna kohezija	$\gamma_c$	1,00	1,25
Nedrenirana čvrstoća	$\gamma_{cu}$	1,00	1,40
Jednoosna čvrstoća	$\gamma_{qu}$	1,00	1,40
Jedinična težina tla	$\gamma_\gamma$	1,00	1,00

Nosivost tla izračunata je sukladno Eurocodu 7 prema formuli (5.1.).

$$q_f = c \times N_c + q_0 \times N_q + \frac{1}{2} \times \gamma \times B \times N_\gamma \quad (5.1.)$$

$q_f$  – nosivost tla [ $kN/m^2$ ]

$c$  – efektivna kohezija [ $kN/m^2$ ]

$N_c, N_q, N_\gamma$  – faktori nosivosti ovisni o kutu unutarnjeg trenja  $\varphi$

$q_0$  – normalno opterećenje od tla na razini dna temelja [ $kN/m^2$ ]

$\gamma$  – jedinična težina tla [ $kN/m^3$ ]

$B$  – širina temelja [m]

### Parametri tla dobiveni ispitivanjem pod $0^\circ$ (faktorizirani s parcijalnim faktorima M2)

$$\frac{\varphi}{\gamma_\varphi} = \tan^{-1} \frac{\tan 28,6^\circ}{1,25} = 23,57^\circ$$

$$\frac{\gamma_{tlo}}{\gamma_\gamma} = \frac{18,8}{1,00} = 18,8 \text{ kN/m}^3$$

$$\frac{c}{\gamma_c} = \frac{12,26}{1,25} = 9,81 \text{ kN/m}^2$$

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) = e^{\pi \tan 23,57^\circ} \tan^2 \left( 45 + \frac{23,57^\circ}{2} \right) = 9,18$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi = 2(9,18 - 1) \tan 23,57^\circ = 7,14$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi = (9,18 - 1) \cot 23,57^\circ = 18,75$$

$$q_0 = \gamma \times H = 18,8 \times 1,00 = 18,8 \text{ kN/m}^2$$

$$q_f = c \times N_c + q_0 \times N_q + \frac{1}{2} \times \gamma \times B \times N_\gamma$$

$$q_f = 9,81 \times 18,75 + 18,8 \times 9,18 + \frac{1}{2} \times 18,8 \times 1,0 \times 7,14 = \mathbf{423,64 \text{ kN/m}^2}$$

## Parametri tla dobiveni ispitivanjem pod 90° (faktorizirani s parcijalnim faktorima M2)

$$\frac{\varphi}{\gamma_{\varphi}} = \tan^{-1} \frac{\tan 24,8^{\circ}}{1,25} = 20,29^{\circ}$$

$$\frac{\gamma_{tlo}}{\gamma_{\gamma}} = \frac{18,8}{1,00} = 18,8 \text{ kN/m}^3$$

$$\frac{c}{\gamma_c} = \frac{31,71}{1,25} = 25,37 \text{ kN/m}^2$$

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) = e^{\pi \tan 20,29^{\circ}} \tan^2 \left( 45 + \frac{20,29^{\circ}}{2} \right) = 6,59$$

$$N_{\gamma} = 2(N_q - 1) \tan \varphi = 2(6,59 - 1) \tan 20,29^{\circ} = 4,13$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi = (6,59 - 1) \cot 20,29^{\circ} = 15,12$$

$$q_0 = \gamma \times H = 18,8 \times 1,00 = 18,8 \text{ kN/m}^2$$

$$q_f = c \times N_c + q_0 \times N_q + \frac{1}{2} \times \gamma \times B \times N_{\gamma}$$

$$q_f = 25,37 \times 15,12 + 18,8 \times 6,59 + \frac{1}{2} \times 18,8 \times 1,0 \times 4,13 = \mathbf{546,31 \text{ kN/m}^2}$$

Provedenim proračunom dobili smo da je nosivost tla izračunata sa parametrima dobivenim ispitivanjem pod 90°  $q_f = 546,31 \text{ kN/m}^2$ , a sa parametrima dobivenim ispitivanjem pod 0°  $q_f = 423,64 \text{ kN/m}^2$ . Navedeni rezultati ukazuju da parametri dobiveni ispitivanjem pod 90° daju 29% veće rezultate proračuna nosivosti tla.

### 5.1.1. Analiza utjecaja različitih parametara posmične čvrstoće s obzirom na promjenu širine temelja i dubine temeljenja

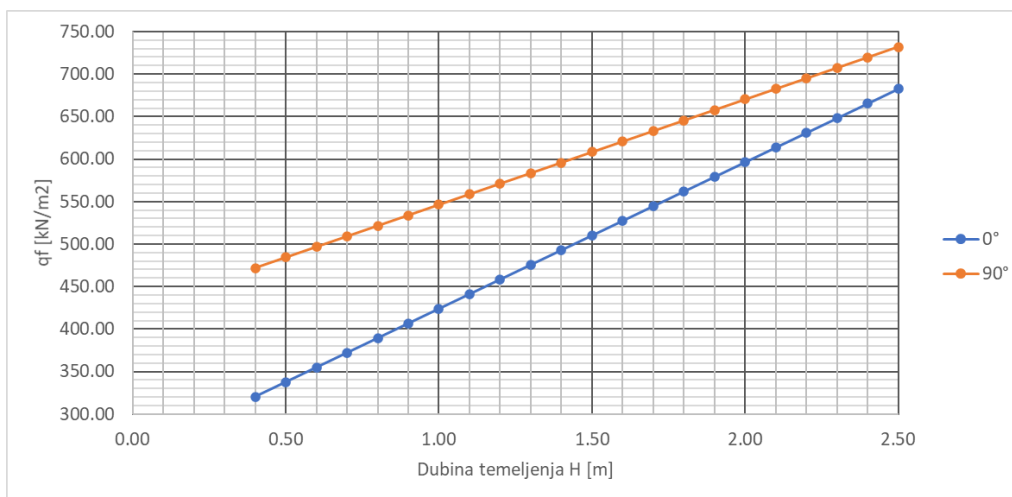
Sukladno Eurocodu 7 proveden je niz proračuna nosivosti tla ispod temelja različitih širina od 0,4 m do 3,0 m sa istom dubinom temeljenja  $H = 1,0$  m radi utvrđivanja utjecaja različitih parametara posmične čvrstoće dobivenih s različitim smjerovima ispitivanja ( $0^\circ$  i  $90^\circ$ ) s obzirom na promjenu širine temelja (*tablica 5.4.*). Također je ponovljen niz proračuna nosivosti tla ispod temelja širine  $B = 1,0$  m sa različitim dubinama temeljenja od 0,4 m do 2,5 m (*tablica 5.3.*). Rezultati proračuna prikazani su tablično i grafički u grafovima.

**Tablica 5.3.** Rezultati proračuna nosivosti tla ispod temelja sa različitim dubinama temeljenja

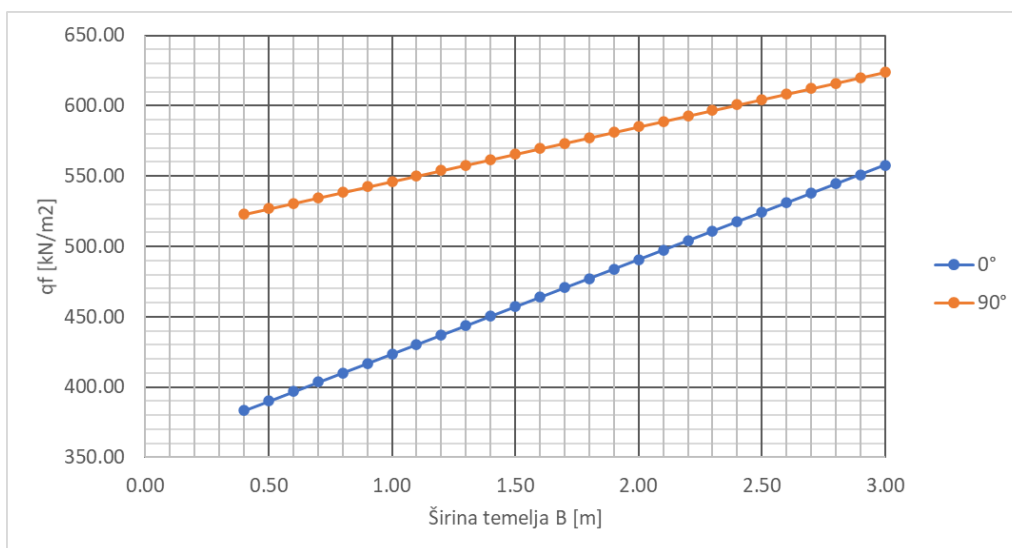
ŠIRINA TEMELJA $B = 1.0\text{m}$				
DUBINA TEMELJENJA	$0^\circ$	$90^\circ$	RAZLIKA	
H [m]	$q_f$ [ $\text{kN/m}^2$ ]	$q_f$ [ $\text{kN/m}^2$ ]	[1]	[%]
0.40	320.09	471.97	151.89	47.5
0.50	337.35	484.36	147.02	43.6
0.60	354.60	496.75	142.15	40.1
0.70	371.86	509.14	137.28	36.9
0.80	389.12	521.53	132.41	34.0
0.90	406.38	533.92	127.54	31.4
1.00	423.64	546.31	122.67	29.0
1.10	440.90	558.70	117.80	26.7
1.20	458.15	571.09	112.93	24.6
1.30	475.41	583.48	108.06	22.7
1.40	492.67	595.87	103.19	20.9
1.50	509.93	608.25	98.32	19.3
1.60	527.19	620.64	93.46	17.7
1.70	544.45	633.03	88.59	16.3
1.80	561.70	645.42	83.72	14.9
1.90	578.96	657.81	78.85	13.6
2.00	596.22	670.20	73.98	12.4
2.10	613.48	682.59	69.11	11.3
2.20	630.74	694.98	64.24	10.2
2.30	648.00	707.37	59.37	9.2
2.40	665.26	719.76	54.50	8.2
2.50	682.51	732.15	49.63	7.3

**Tablica 5.4.** Rezultati proračuna nosivosti tla ispod temelja različitih širina

DUBINA TEMELJENJA H = 1.0m				
ŠIRINA TEMELJA	0°	90°	RAZLIKA	
B [m]	q <sub>f</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	q <sub>f</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	[1]	[%]
0.40	383.37	523.02	139.65	36.4
0.50	390.08	526.90	136.82	35.1
0.60	396.79	530.78	133.99	33.8
0.70	403.50	534.66	131.16	32.5
0.80	410.21	538.54	128.33	31.3
0.90	416.93	542.43	125.50	30.1
1.00	423.64	546.31	122.67	29.0
1.10	430.35	550.19	119.84	27.8
1.20	437.06	554.07	117.01	26.8
1.30	443.77	557.96	114.18	25.7
1.40	450.48	561.84	111.35	24.7
1.50	457.20	565.72	108.52	23.7
1.60	463.91	569.60	105.69	22.8
1.70	470.62	573.48	102.87	21.9
1.80	477.33	577.37	100.04	21.0
1.90	484.04	581.25	97.21	20.1
2.00	490.75	585.13	94.38	19.2
2.10	497.47	589.01	91.55	18.4
2.20	504.18	592.89	88.72	17.6
2.30	510.89	596.78	85.89	16.8
2.40	517.60	600.66	83.06	16.0
2.50	524.31	604.54	80.23	15.3
2.60	531.02	608.42	77.40	14.6
2.70	537.73	612.31	74.57	13.9
2.80	544.45	616.19	71.74	13.2
2.90	551.16	620.07	68.91	12.5
3.00	557.87	623.95	66.08	11.8



*Slika 5.2. Graf promjene nosivosti tla u odnosu na dubinu temeljenja*



*Slika 5.3. Graf promjene nosivosti tla u odnosu na širinu temelja*

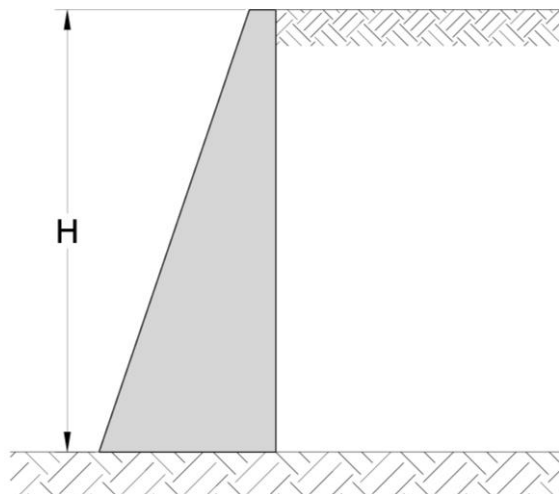
Razlika u nosivosti tla ispod temelja temeljenih na dubini  $H = 1,0$  m, širine  $0,4$  m je  $36,4$  % te se postepeno smanjuje i kod temelja širine  $3,0$  m iznosi  $11,8$  %. Kod temelja fiksne širine  $B = 1,0$  m, temeljenih na  $0,4$  m dubine razlika je  $47,5$  % te se s dubinom smanjuje i na dubini temeljenja  $2,5$  m iznosi  $7,3$  %.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je kako je razlika u nosivosti tla s obzirom na razliku u parametrima posmične čvrstoće najizraženija kod uskih i plitkih temelja dok se s povećanjem širine temelja i dubine temeljenja razlika smanjuje no ne do razine da bi se mogla zanemariti.



## 5.2. Proračun aktivnog tlaka tla na potporni zid za granično stanje ravnoteže (EQU)

Proveden je proračun aktivnog tlaka tla na potporni zid za granično stanje ravnoteže sukladno Eurocodu 7 za parametre tla dobivene ispitivanjem pod  $0^\circ$  i pod  $90^\circ$ . Za ovaj primjer uzet je potporni zid visine  $H = 6,0$  m. (slika 5.4.).



Slika 5.4. Grafički prikaz zida za proračun aktivnog tlaka

Tablica 5.5. Parametri tla dobiveni ispitivanjem za  $0^\circ$  i  $90^\circ$

SMJER ISPITIVANJA	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
$0^\circ$	28,6	12,26	18,8
$90^\circ$	24,8	31,71	18,8

S obzirom da je za granično stanje ravnoteže (EQU) prihvaćen jedinstven proračunski pristup, parcijalni faktori parametara tla te djelovanja na konstrukciju prikazanim su u tablici 5.6. i tablici 5.7.

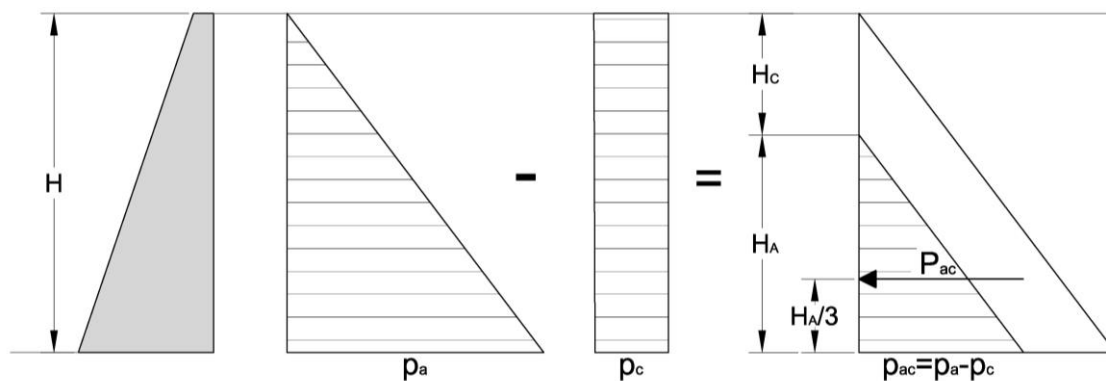
Tablica 5.6. Parcijalni faktori djelovanja ([19])

DJELOVANJA		SIMBOL	EQU
Stalna	nepovoljna	$\gamma_{G,dst}$	1,10
	povoljna	$\gamma_{G,stb}$	0,90
Promjenjiva	nepovoljna	$\gamma_{Q,dst}$	1,50
	povoljna	$\gamma_{Q,stb}$	0

Tablica 5.7. Parcijalni faktori parametara tla ([19])

PARAMETRI TLA	SIMBOL	EQU
Kut unutarnjeg trenja	$\gamma_\varphi$	1,25
Efektivna kohezija	$\gamma_c$	1,25
Nedrenirana čvrstoća	$\gamma_{cu}$	1,40
Jednoosna čvrstoća	$\gamma_{qu}$	1,40
Jedinična težina tla	$\gamma_\gamma$	1,00

## PRORAČUN AKTIVNOG TLAKA ZA PARAMETRE TLA DOBIVENE POD 0°



Slika 5.5. Statička shema proračuna

Tablica 5.8. Parametri tla dobiveni ispitivanjem za 0°

SMJER ISPITIVANJA	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]
0°	28,6	12,26	18,8	6,0

Faktorizirani parametri tla:

$$\frac{\varphi}{\gamma_{\varphi}} = \tan^{-1} \frac{\tan 28,6^{\circ}}{1,25} = 23,57^{\circ}$$

$$\frac{\gamma_{tlo}}{\gamma_{\gamma}} = \frac{18,8}{1,00} = 18,8 \text{ kN/m}^3$$

$$\frac{c}{\gamma_c} = \frac{12,26}{1,25} = 9,81 \text{ kN/m}^2$$

Koeficijent aktivnog tlaka:

$$K_{A,0^{\circ}} = \tan^2 \left( 45^{\circ} - \frac{\varphi}{2} \right) = \tan^2 \left( 45^{\circ} - \frac{23,57^{\circ}}{2} \right) = 0,429$$

Aktivni tlak na dnu zida:

$$p_{a,0^{\circ}} = \gamma \times H \times K_{A,0^{\circ}} = 18,8 \times 6,0 \times 0,429 = 48,39 \text{ kN/m}^2$$

Doprinos kohezije:

$$p_{c,0^{\circ}} = 2 \times c \times \sqrt{K_{A,0^{\circ}}} = 2 \times 9,81 \times \sqrt{0,429} = 12,85 \text{ kN/m}^2$$

Ukupni aktivni tlak na dnu zida:

$$p_{ac,0^\circ} = h_{a,0^\circ} - h_{c,0^\circ} = 48,39 - 12,85 = 35,54 \text{ kN/m}^2$$

Dubina do koje nema aktivnog tlaka:

$$H_{c,0^\circ} = \frac{2 \times c}{\gamma \times \sqrt{K_{A,0^\circ}}} = \frac{2 \times 9,81}{18,8 \times \sqrt{0,429}} = 1,59 \text{ m}$$

Umanjena visina:

$$H_{A0^\circ} = H - H_{c,0^\circ} = 6,0 - 1,59 = 4,41 \text{ m}$$

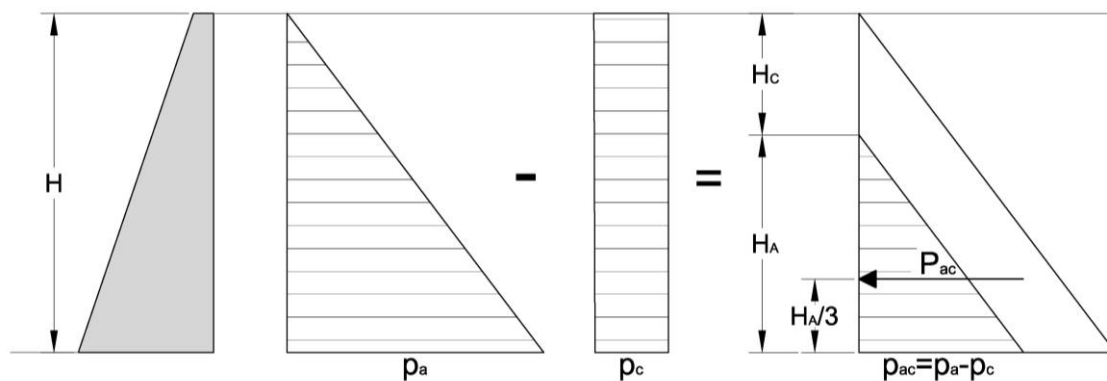
Ukupna sila aktivnog tlaka:

$$P_{ac,0^\circ} = \frac{p_{ac,0^\circ} \times H_{0^\circ}}{2} = \frac{35,54 \times 4,41}{2} = 78,37 \text{ kN/m}$$

Ukupna faktorizirana sila aktivnog tlaka:

$$P_{ac,0^\circ} \times \gamma_{G,dst} = 72,86 \times 1,10 = \mathbf{86, 21 \text{ kN/m}}$$

## PRORAČUN AKTIVNOG TLAKA ZA PARAMETRE TLA DOBIVENE POD 90°



Slika 5.6. Statička shema proračuna

Tablica 5.9. Parametri tla dobiveni ispitivanjem za 90°

SMJER ISPITIVANJA	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	H [m]
90°	24,8	31,71	18,8	6,0

Faktorizirani parametri tla:

$$\frac{\varphi}{\gamma_{\varphi}} = \tan^{-1} \frac{\tan 24,8^{\circ}}{1,25} = 20,29^{\circ}$$

$$\frac{\gamma_{tlo}}{\gamma_{\gamma}} = \frac{18,8}{1,00} = 18,8 \text{ kN/m}^3$$

$$\frac{c}{\gamma_c} = \frac{31,71}{1,25} = 25,37 \text{ kN/m}^2$$

Koeficijent aktivnog tlaka:

$$K_{A,90^{\circ}} = \tan^2 \left( 45^{\circ} - \frac{\varphi}{2} \right) = \tan^2 \left( 45^{\circ} - \frac{20,29^{\circ}}{2} \right) = 0,485$$

Aktivni tlak na dnu zida:

$$p_{a,90^{\circ}} = \gamma \times H \times K_{A,90^{\circ}} = 18,8 \times 6,0 \times 0,485 = 54,71 \text{ kN/m}^2$$

Doprinos kohezije:

$$p_{c,90^{\circ}} = 2 \times c \times \sqrt{K_{A,90^{\circ}}} = 2 \times 25,37 \times \sqrt{0,485} = 35,34 \text{ kN/m}^2$$

Ukupni aktivni tlak na dnu zida:

$$p_{ac,90^\circ} = h_{a,90^\circ} - h_{c,90^\circ} = 54,71 - 35,34 = 19,37 \text{ kN/m}^2$$

Dubina do koje nema aktivnog tlaka:

$$H_{c,90^\circ} = \frac{2 \times c}{\gamma \times \sqrt{K_{A,90^\circ}}} = \frac{2 \times 25,37}{18,8 \times \sqrt{0,485}} = 3,88 \text{ m}$$

Umanjena visina:

$$H_{A90^\circ} = H - H_{c,90^\circ} = 6,0 - 3,88 = 2,12 \text{ m}$$

Ukupna sila aktivnog tlaka:

$$P_{ac,90^\circ} = \frac{p_{ac,90^\circ} \times H_{90^\circ}}{2} = \frac{19,37 \times 2,12}{2} = 20,53 \text{ kN/m}^2$$

Ukupna faktorizirana sila aktivnog tlaka:

$$P_{ac,90^\circ} \times \gamma_{G,dst} = 20,53 \times 1,10 = \mathbf{22,58 \text{ kN/m}}$$

## 5.2.1. Analiza rezultata proračuna aktivnog tlaka

Tablica 5.10. Parametri tla dobiveni ispitivanjem za 90°

SMJER ISPITIVANJA	$P_{ac}$ [kN/m]	Visina djelovanja sile [m]
0°	86,21	1,47
90°	22,58	0,71

Proračunom aktivnog tlaka na potporni zid parametrima posmične čvrstoće za oba smjera ispitivanja dobili smo aktivni tlak za smjer ispitivanja 0°  $P_{ac,0°} = 86,21$  kN/m, a za smjer ispitivanja 90°  $P_{ac,90°} = 22,11$  kN/m što čini veliku razliku od gotovo 4 puta.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je kako razlika u parametrima posmične čvrstoće, a posebno koheziji, značajno utječe na rezultate proračuna aktivnog tlaka na potporne konstrukcije.

Analizirajući sam lokalitet uzimanja uzoraka, glinokop u Šenkovcu, moglo bi se doći do zaključka da je proračun sa parametrima posmične čvrstoće dobivenim pod kutom od 90° točniji od proračuna sa parametrima dobivenim pod kutom od 0°.



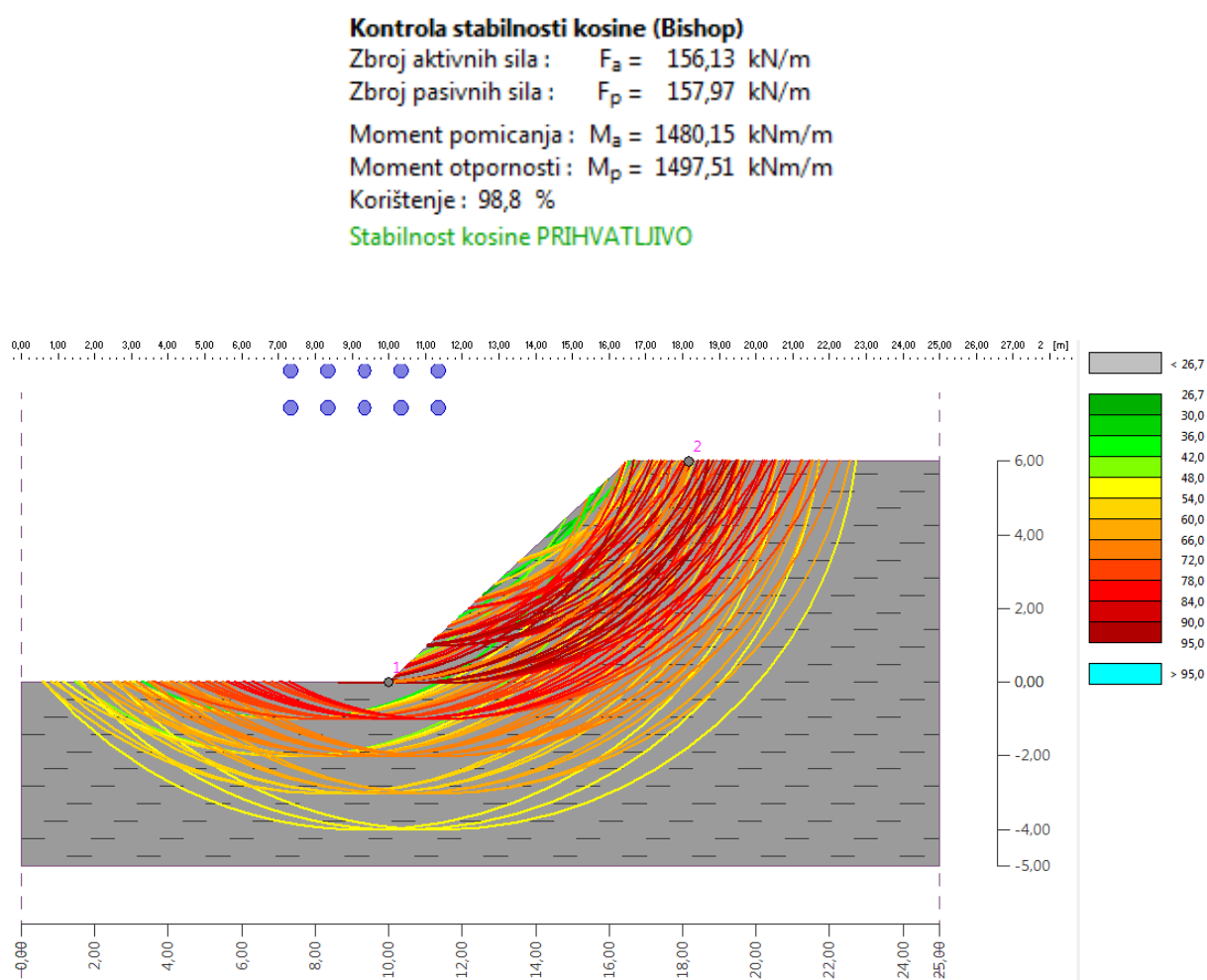
Slika 5.7. Vrlo strmi iskop na lokaciji uzimanja uzoraka u glinokopu

### 5.3. Proračun stabilnosti kosina računalnim programom GEO 5

U računalnom programu GEO 5 napravljen je proračun stabilnosti kosine sa parametrima posmične čvrstoće dobivenim pod 0° i pod 90°.

#### PRORAČUN STABILNOSTI KOSINE ZA PARAMETRE TLA DOBIVENE POD 0°

Provedenim proračunom za zadane parametre faktorizirane sukladno EC7, kosina zadovoljava minimalne uvjete stabilnosti pod kutom od 43° u odnosu na horizontalu.



Slika 5.8. Prikaz kontrole kliznih ploha iz računalnog programa GEO 5

## PRORAČUN STABILNOSTI KOSINE ZA PARAMETRE TLA DOBIVENE POD 90°

Provedenim proračunom za zadane parametre faktorizirane sukladno EC7, kosina zadovoljava minimalne uvjete stabilnosti pod kutom od 74° u odnosu na horizontalu.

### Kontrola stabilnosti kosine (Bishop)

Zbroj aktivnih sila :  $F_a = 154,77$  kN/m

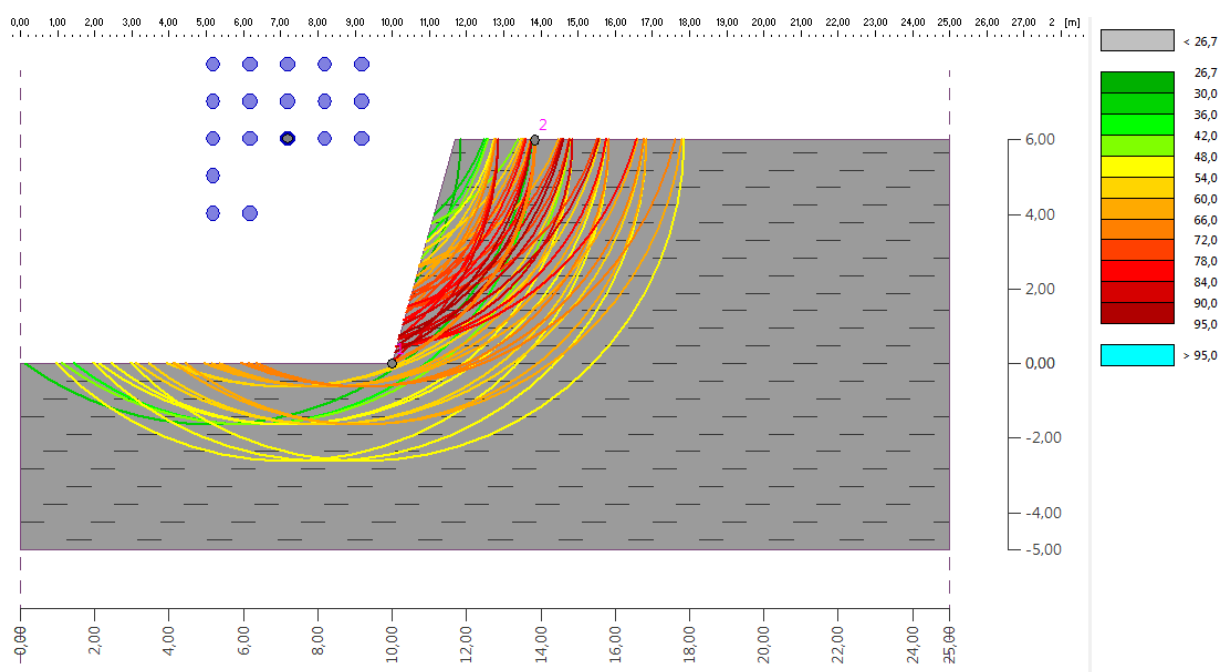
Zbroj pasivnih sila :  $F_p = 155,26$  kN/m

Moment pomicanja :  $M_a = 1030,79$  kNm/m

Moment otpornosti :  $M_p = 1034,06$  kNm/m

Korištenje : 99,7 %

Stabilnost kosine **PRIHVATLJIVO**



Slika 5.9. Prikaz kontrole kliznih ploha iz računalnog programa GEO 5

Proračunom stabilnosti kosine parametrima posmične čvrstoće za oba smjera ispitivanja dobili smo da je kosina sa parametrima dobivenim za smjer ispitivanja 0° stabilna pod kutom od 43° u odnosu na horizontalu, a za smjer ispitivanja 90°, od 74° u odnosu na horizontalu.



## 6. Zaključak

U ovom radu ispitana je anizotropija posmične čvrstoće gline sa lokacije glinokopa u Šenkovcu. Ukupno je proveden pokus izravnog posmika na 12 ispitnih tijela u smjerovima pod kutom od  $0^\circ$  i  $90^\circ$  u odnosu na horizontalu u dvije serije za svaki ispitivani smjer. Uz pokus izravnog posmika proveden je i niz laboratorijskih ispitivanja za utvrđivanje fizikalnih i mehaničkih karakteristika tla radi detaljnijeg opisa tla te provjere homogenosti ispitnih tijela.

Dobivene vrijednosti kuta unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ) veće su za  $3,8^\circ$  odnosno približno 15% u slučaju ispitivanja pod kutom od  $0^\circ$ , dok je mnogo izraženija razlika kod kohezije ( $c$ ) koja je za  $19,45 \text{ kN/m}^2$  veća kod ispitivanja pod kutom od  $90^\circ$  što je više nego dvostruko veća vrijednost.

Provedenim proračunom nosivosti tla prema Eurocodu 7 na konkretnom primjeru dobivena je znatna razlika od 29% veće nosivosti za vrijednosti parametara posmične čvrstoće dobivene ispitivanjem pod kutom od  $90^\circ$ . Također, provedenim nizom proračuna sa različitim širinama temelja i različitim dubinama temeljenja, utvrđeno je da razlike u parametrima najveći utjecaj imaju kod uskih i plitkih temelja dok se povećanjem širine temelja i dubine temeljenja utjecaj smanjuje no nikako do zanemarivih vrijednosti.

Prilikom proračuna aktivnog tlaka na potporne konstrukcije, razlike su znatno izraženije. Upravo u tom području su mnogi autori vršili istraživanja između kojih i Shkola A.V. [1] koji navodi da se sa usmjerenom tehnologijom zasipavanja potpornih, zagatnih i drugih sličnih građevina mogu postići značajna smanjenja aktivnog tlaka na potporne konstrukcije.

Shkola A.V. [1], u svom radu temeljenom na brojnim istraživanjima i teorijskim modelima anizotropnih tla, navodi da je anizotropiju čvrstoće relevantno uzeti u obzir kod proračuna kada je razlika u kutu unutarnjeg trenja veća od 5%, te razlika u koheziji veća od 10%. Shkola A.V. [2], također navodi kako uzimanje u obzir anizotropije posmične čvrstoće kod proračuna dovodi do 30% i više različitih konačnih rezultata u što se uklapaju i rezultati dobiveni u ovom radu.

Analiza parametara posmične čvrstoće dobivenih ispitivanjima pokazuje da je anizotropija posmične čvrstoće znatna te da se istu nikako ne bi smjelo zanemarivati prilikom projektiranja i dimenzioniranja konstrukcija. Također na temelju dobivenih rezultata možemo zaključiti da je i prilikom provođenja istražnih radova na anizotropnim tlima vrlo važno voditi računa o prirodnoj orijentaciji uzoraka te na smjer provođenja ispitivanja.

## 7. Literatura

### Knjige :

1. Shkola A.V. Diagnostika portovykh sooruzheniy. Odessa: Astroprint, 2010. 592 s. (Школа А.В. Диагностика портовых сооружений. Одесса: Астропринт, 2010. 592 с.)
2. Shkola A.V. Bokovoye davleniye anizotropnykh gruntov na sooruzheniya. Odessa: MAG VT, 2012. 219 s. (Школа А.В. Боковое давление анизотропных грунтов на сооружения. Одесса: МАГ ВТ, 2012. 219 с.)
3. Aniskin, A., Orešković, M., Soldo, B.: Shear strength anisotropy of clays from Bedekovčina region in Croatia, 9th Mid-European Clay Conference, Zagreb, Croatia, 17-21 September, 2018., p.
4. Shkola A.V., Kheydar A. Anizotropiya prochnostnykh svoystv lessovykh gruntov i raschet nesushchey sposobnosti osnovaniy s yeye uchetom//Lessovyye prosadochnyye grunty kak osnovaniya zdaniy i sooruzheniy: tez. Vsesoyuzn. nauch. pr. konf. Kn. 2, ch. 2. Barnaul, 1990. S. 212 – 217.
5. Aniskin A., Shkola A.V., Premur V. Experimental study of shear strength anisotropy of granula medium considering technology factors//Збірник наукових праць, Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Випуск 3(45)'. Полтава: ПолтНТУ, 2015. С. 144 – 151.
6. Bazant Z. P., Ozaydin I. K., Krizek R. J. Micromechanics Model For Creep of Anisotropic Clay//Journal of Engineering Mechanics Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers. 1975. Vol. 101. № EM 1. February. P. 57 - 78.
7. Casagrande A., Carillo N. Shear failure of anisotropic soils//Contributions to soil mechanics. 1941-1953. P. 122-135.
8. Duncan I.M., Seed H.B. Strength variation along failure surface in clay//J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE. 1966. V. 92. № SM 6. P. 81-104.
9. Ewertowska-Madej Z. Anizotropia wytrzymałości kaolinu siedleckiego w aparacie bezpośrednio scinania//IBW, Polskiej AN. Gdansk rozprawy hydrotechniczne. Zesz. 30. 1972. S. 121-124.
10. Krizek R.I. Fabric effects on strength and deformation on kaolin clay//Proc. of the IXth ICSMFE. Tokyo. 1977. Vol. 1. P. 169-176.

11. Lo K.Y., Milligan V. Shear strength properties of two stratified clays//J. of Soil Mech. and Found. Div. proc. 93. 1967. № SM1. P. 1-15.
12. Lo K.Y., Morin J.P. Strength anisotropy and time effects of two sensitive clays//Canadian Geotechnical journal. 1972. № 9. P. 261-277.
13. Loh A.K., Holt R.T. Directional Variation in Undrained Shear Strength and Fabric of Winnipeg Upper Brown clay//Canadian geotechnical J. 1974. Vol. 9. № 3. P. 430-437.
14. Nishimura S. Laboratory study of anisotropy of natural London Clay, PhD dissertation. Imperial College London. London, 2005. 412 p.
15. Sergeyev E.M., Osipov V.T. Structural aspects of shearing resistance of clays//Proc. of the IXth ICSMFE. Tokyo. 1977. Vol. 1. P. 193 – 198.
16. Yong R.N., Sylvestry V. Anisotropic behavior of sensitive clay//Canad. Geot. J. 1979. Vol. 10. P. 335-350.
17. Shkola A.V., Aniskin A. Vliyanie tekhnologii na svoystva grunta obratnykh zasypok morskikh prichalov//Mat. konf. Sovremennyye geotekhnologii v stroitel'stve i ikh nauchno-tekhnicheskoye soprovozhdeniye. Chast' I. Sankt – Peterburg: SPbGASU, 2014. C. 243 – 248.
18. Shearmatic guide, Controls, Italy, 2019.
19. Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila

**Internet izvori :**

20. <https://www.fsb.unizg.hr/kmb/200/220/kmb222.htm?fbclid=IwAR0GdwuGjhVBo2IL8W66xQpGygU32IBBtDjj7aXFCMavU7BZmjT9GKl68Es>
21. <https://idoc.pub/documents/skripta-inenjerska-mehanika-stijena-d47ey16xvdn2>

IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Dalibor Kramarić (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom Ispitivanje anizotropije posmične čvrstoće gline na lokaciji glinokopa u Šenkovcu te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

Dalibor Kramarić

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Dalibor Kramarić (*ime i prezime*) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Ispitivanje anizotropije posmične čvrstoće gline na lokaciji glinokopa u Šenkovcu čiji sam autor/ica.

Student/ica:

Dalibor Kramarić

(vlastoručni potpis)