

Prilog istraživanju nedrenirane čvrstoće i značaj u geotehničkim zahvatima

Serdarević, Edin

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:682376>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

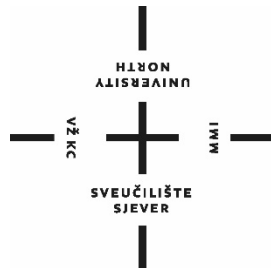


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



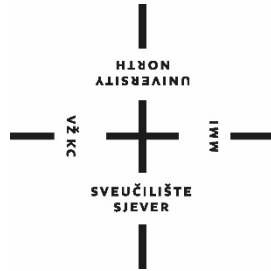
DIPLOMSKI RAD br. 82/GRD/2023

**PRILOG ISTRAŽIVANJU NEDRENIRANE
ČVRSTOĆE I ZNAČAJ U GEOTEHNIČKIM
ZAHVATIMA**

Edin Serdarević, 0035132325

Varaždin, srpanj 2023.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Odjel za graditeljstvo



DIPLOMSKI RAD br. 82/GRD/2023

**PRILOG ISTRAŽIVANJU NEDRENIRANE
ČVRSTOĆE I ZNAČAJ U GEOTEHNIČKIM
ZAHVATIMA**

Student:
Edin Serdarević, 0035132325

Mentor:
Prof. dr. sc. Božo Soldo

Varaždin, srpanj 2023.

ZAHVALA:

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr.sc. Boži Soldi, na predloženoj temi, stručnoj pomoći i izdvojenom vremenu tijekom izrade ovog diplomskog rada. Hvala i svim ostalim nastavnicima Odjela za graditeljstvo Sveučilišta Sjever, koji su mi kroz mnoge konzultacije pomogli u savladavanju svog gradiva koje je bilo potrebno kako bih pripremio ovaj diplomski rad. Također se zahvaljujem djelatnicima Instituta IGH koji su mi pružili podršku tokom studija i omogućili da odradim ispitivanja u sklopu ovog diplomskog rada, a najveće hvala mojoj obitelji na razumijevanju i podršci kroz sve godine studiranja.

Edin Serdarević

Sažetak

Naslov rada: Prilog ispitivanju nedrenirane čvrstoće i značaj u geotehničkim zahvatima

Autor rada: Edin Serdarević

Mentor rada: Prof. dr. sc. Božo Soldo

Nedreniranu čvrstoću koherentnih materijala moguće je odrediti na više načina. Najpouzdaniji rezultati dobivaju se provođenjem nekonsolidiranog nedreniranog pokusa (UU-test) u troosnom uređaju, ali su dostupne i druge laboratorijske metode poput jednoosne tlačne čvrstoće, laboratorijske krilne sonde, padajućeg stošca i džepnog penetrometra. U diplomskom radu je prikazano na koji se način vrijednosti nedrenirane čvrstoće na homogenoj glini razlikuju ovisno o vrstama laboratorijskih pokusa kod različitih stupnjeva prekonsolidacije i različitih naponskih stanja. Odabrana je homogena glina koja je pripremana u troosnoj ćeliji konsolidacijom za postizanje željenih stupnjeva prekonsolidacije. Rezultati su pokazali vrlo slične vrijednosti nedrenirane čvrstoće kod jednoosnog i troosnog pokusa pri različitim stupnjevima prekonsolidacije, te u konačnici mogućnost korelacije napona prekonsolidacije dobivenog iz edometarskog pokusa sa nedreniranom čvrstoćom.

Ključne riječi: nedrenirana čvrstoća, jednoosna tlačna čvrstoća, laboratorijska krilna sonda, stupanj prekonsolidacije, OCR, troosni uređaj, homogena glina

Summary

Title: Enclosure to the examination of undrained strength and its importance in geotechnical projects

Author: Edin Serdarević

Menthor: Ph.D. Božo Soldo, editor. prof.

The undrained strength of coherent materials can be determined in several ways. The most reliable results are obtained by conducting an unconsolidated undrained test (UU-test) in a triaxial device, but other laboratory methods such as uniaxial compressive strength, laboratory vane test, fall cone test and pocket penetrometer are also available. In this graduate thesis, it is shown how the values of undrained strength on homogeneous clay sample differ depending on the types of laboratory experiments with different degrees of overconsolidation ratio and different stress states. Homogeneous clay was selected, which was prepared in a triaxial cell by consolidation to achieve the desired degree of overconsolidation. The results showed very similar values of undrained strength in uniaxial and triaxial tests at different degrees of overconsolidation, and ultimately the possibility of correlating the overconsolidation stress obtained from the oedometer test with undrained strength.

Keywords: undrained strength, uniaxial compressive strength, laboratory vane probe, degree of overconsolidation, OCR, triaxial device, homogeneous clay

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za graditeljstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo

PRISTUPNIK Edin Sardarević

MATIČNI BROJ 0035132325

DATUM 3. VII. 2023.

KOLEGIJ Geotehničko inženjerstvo

NASLOV RADA Prilog istraživanju nedrenirane čvrstoće i značaj u geotehničkim zahvatima

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Enclosure to the Examination of Undrained Strength and its Importance
in Geotechnical Projects

MENTOR dr. sc. Božo Soldo

ZVANJE red. prof.

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc. dr. sc. Aleksej Aniskin
2. prof. dr. sc. Božo Soldo
3. doc. dr. sc. Bojan Đurin
4. doc. dr. sc. Matija Orešković
- 5.

Zadatak diplomskog rada

BROJ 82/GRD/2023

OPIS

Pod temom Diplomskog rada:

"PRILOG ISTRAŽIVANJU NEDRENIRANE ČVRSTOĆE I ZNAČAJ U GEOTEHNIČKIM ZAHVATIMA" u radu je potrebno prikazati na koji se način vrijednosti nedrenirane čvrstoće na homogenoj glini razlikuju ovisno o vrstama laboratorijskih pokusa kod različitih stupnjeva prekonsolidacije i različitih naponskih stanja. Načelni sadržaj rada sastojao bi se od poglavlja:

- SADRŽAJ
- UVOD
- OPĆENITO O PREDMETNOJ TEMI - NEDRENIRANA ČVRSTOĆA
- PRIMJENA NEDRENIRANE ČVRSTOĆE U GEOTEHNIČKIM ZAHVATIMA
- ISPITIVANJE NEDRENIRANE ČVRSTOĆE I KORELACIJE
- OVISNOST NEDRENIRANE ČVRSTOĆE O OCR-U
- PRIMJERI GEOTEHNIČKIH ZAHVATA S PRIMJENOM NEDRENIRANE ČVRSTOĆE
- ZAKLJUČAK
- LITERATURA

ZADATAK URUČEN

06.07.2023.



[Handwritten signature]

Sadržaj

1.	Uvod	8
2.	Općenito o predmetnoj temi – nedrenirana čvrstoća	
2.1.	Općenito o čvrstoći tla, drenirana i nedrenirana čvrstoća, razlika u ispitivanju	9
2.2.	Uređaji za laboratorijsko ispitivanje čvrstoće	12
2.3.	Nedrenirana čvrstoća i OCR	17
3.	Primjena nedrenirane čvrstoće u geotehničkim zahvatima	18
3.1.	Plitki temelj – prikaz Terzghi formule za nosivost	21
3.2.	Temeljenje na pilotima – otpor na plaštu i otpor na vrhu	22
3.3.	Nasuti objekti – brane i nasipi	25
4.	Ispitivanje nedrenirane čvrstoće i korelacije	27
4.1.	In situ (terenska krilna sonda, CPT, DMT, SPT)	28
4.2.	Laboratorijska ispitivanja – laboratorijska krilna sonda, jednoosna čvrstoća, UU pokus	36
4.3.	Korelacije in-situ i laboratorijskih ispitivanja	50
5.	Ovisnost nedrenirane čvrstoće o OCR-u	53
5.1.	Teorijski prikaz određivanja nedrenirane čvrstoće	53
5.2.	Program ispitivanja i postupak ugradnje uzoraka	55
5.3.	Rezultati ispitivanja	62
5.4.	Usporedba rezultata ispitivanja	77
5.5.	Rezultati posebnih slučajeva troosnog posmika sa povratnom konsolidacijom	81
6.	Primjeri geotehničkih zahvata s primjenom nedrenirane čvrstoće	84
7.	Zaključak	87
8.	Literatura	88

1. UVOD

Kod projektiranja i izvođenja geotehničkih zahvata suočeni smo s činjenicom da se geotehnički zahvat vrši u prirodnim materijalima, odnosno u tlu i stijenskim masama čiji je sastav uglavnom nehomogen, diskontinuiranog su karaktera, a svojstva su im anizotropna.

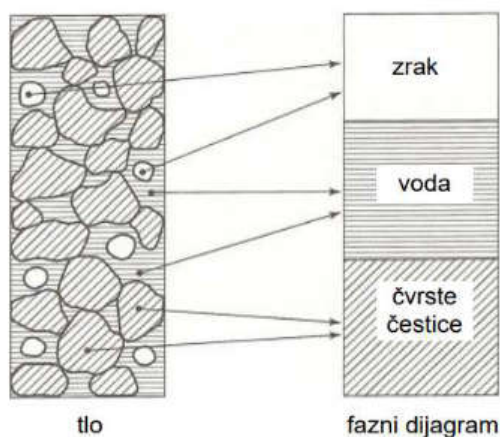
Nedrenirana čvrstoća tla definirana je kao najveće posmično naprezanje u trenutku sloma tla, u uvjetima relativno brze promjene opterećenja, kod kojeg nije došlo do promjene vlažnosti tla. Takvi uvjeti se često pojavljuju kod izvedbe standardnih geotehničkih zahvata u sitnozrnim tlima male propusnosti, kod kojih ne može doći do značajne promjene količine vode u porama tla. Nedrenirana čvrstoća se određuje raznim laboratorijskim i terenskim ispitivanjima [1].

U diplomskom radu je prikazano na koji se način vrijednosti nedrenirane čvrstoće na homogenoj glini razlikuju ovisno o vrstama laboratorijskih pokusa kod različitih stupnjeva prekonsolidacije i različitih naponskih stanja. Odabrana je homogena glina koja je pripravljena u troosnoj ćeliji konsolidacijom za postizanje željenih stupnjeva prekonsolidacije, te su nakon postupka konsolidacije odrađena ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće, ispitivanja u troosnom posmiku te ispitivanja laboratorijskom krilnom sondom. Cilj ovog rada je pokazati koliki utjecaj na laboratorijska ispitivanja ima promjena naponskog stanja uzroka od onoga u tlu (rasterećenje) nakon vađenja na terenu, te njegovo dovođenje na geološko opterećenje.

2. OPĆENITO O PREDMETNOJ TEMI – NEDRENIRANA ČVRSTOĆA

2.1. Općenito o čvrstoći tla, drenirana i nedrenirana čvrstoća, razlika u ispitivanju

Tlo je proizvod prirodnih procesa (raspadanja stijena, transporta i taloženja raspadnutih čestica), te je zbog toga vrlo raznoliko i često nejednoliko. Budući da tlo predstavlja trokomponentni sustav kojeg čine čestice tla, voda i plin (najčešće zrak) u porama tla, svako ispitivanje tla mora voditi računa o takvoj građi tla [2]. Na slici 1 prikazan je model tla.



Slika 1. Model tla [3]

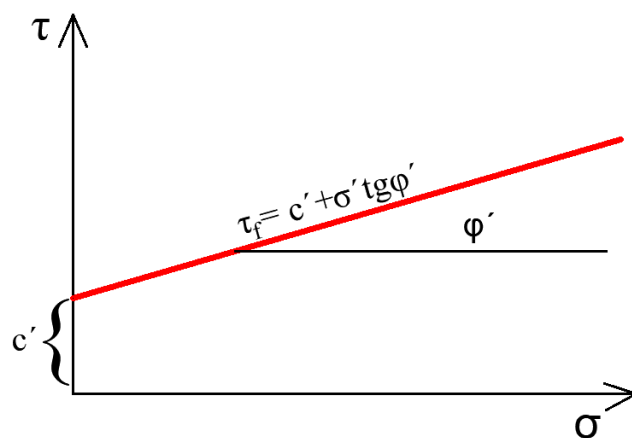
Ponašanje tla ovisi o efektivnim naprezanjima među česticama tla, a to znači da se vanjska (totalna) naprezanja na tlo dijele na naprezanja u vodi u porama tla i na naprezanja među česticama tla ($\sigma = \sigma' + u$).

Posmična čvrstoća tla je najvažnije mehaničko svojstvo tla, te se ono povezuje sa slomom tla. Slom tla je stanje nestabilnosti popraćeno velikim posmičnim deformacijama i s njima povezanim velikim pomacima, te ga u principu možemo poistovjetiti sa popuštanjem tla. Obično se očituje kao klizanje jedne mase tla po drugoj preko jasno izražene klizne plohe ili manje izražene klizne zone. Na kliznoj plohi ili u kliznoj zoni posmično naprezanje je doseglo posmičnu čvrstoću tla, a daljnji rast posmičnih deformacija više nije popraćen povećanjem otpora u vidu povećanja posmičnih naprezanja kao prije sloma [3].

Razlikujemo čvrstoću u uvjetima koji omogućuju dreniranje porne vode (drenirana čvrstoća) i čvrstoću u uvjetima kada je dreniranje vode onemogućeno ili jako sporo pa se ne očekuje brzo smanjenje narislog pornog tlaka (nedrenirana čvrstoća).

U mehanici tla najčešće se koristi Mohr-Coulombov zakon sloma, prikazan na slici 2, kod kojeg je pravac čvrstoće određen s dva parametra čvrstoće, a nazivamo ih: kohezija i kut unutarnjeg trenja [4].

Mohr-Coulombov pravac čvrstoće sloma $\rightarrow \tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$



Slika 2. Pravac čvrstoće i parametri čvrstoće c' i φ'

c' - kohezija. Ovaj se parametar javlja samo kod sitnozrnatih materijala, gdje su u ponašanju materijala dominantne molekularne sile među česticama, pa se ti materijali nazivaju i koherentnima. Kohezija ovisi o karakteristikama materijala i povijesti opterećenja.

φ' - kut unutarnjeg trenja je nagib pravca čvrstoće. Kut unutarnjeg trenja je parametar koji je karakterističan za sve materijale tla, a manji je za sitnozrnate (približno od 20° do 28°) i veći za krupnozrnate (približno, od 32° do 45°).

Označavanjem s crticom simbola c i φ naglašava se da je čvrstoća određena za efektivna naprezanja, tj. veže se uz naprezanja na čvrstim česticama, a ne u vodi [4].

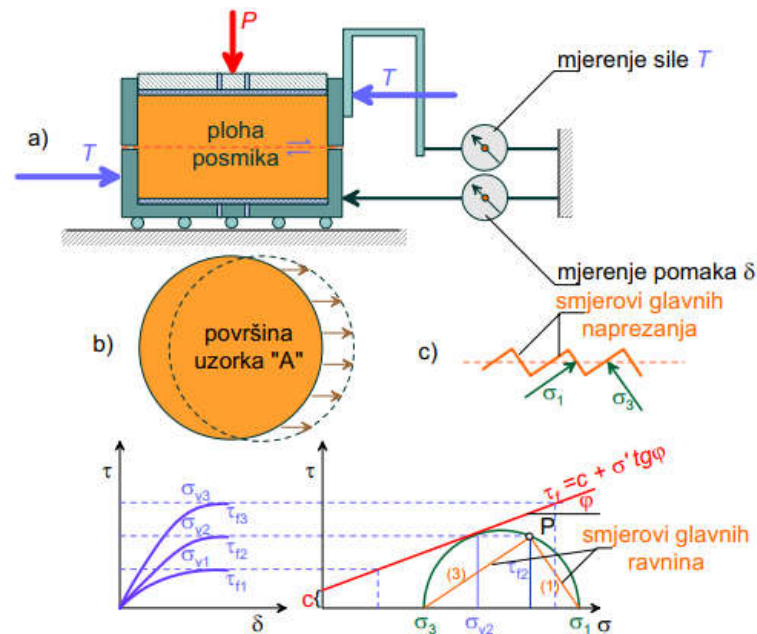
Parametri čvrstoće nisu konstante materijala, pa ih treba odrediti za svaki sloj tla. Oni se mogu odrediti, bilo izravnim mjerenjima na uzorcima u laboratoriju, bilo iz korelacija s in-situ ispitivanjima. Budući da je komplicirano vaditi uzorke iz krupnozrnatih materijala, parametar čvrstoće, što je uglavnom samo kut unutarnjeg trenja φ , određuje se iz korelacija, nastalih na temelju in-situ ispitivanja. Iz koherentnih slojeva se vade uzorci (pomoću tankostjenog cilindra) i ispituju u uređajima u laboratoriju [4].

Postoje različiti laboratorijski uređaji za ispitivanje čvrstoće tla kojima se izaziva izravni posmik, troosni posmik ili torzijski posmik. Kod ispitivanja parametara čvrstoće treba voditi računa o dreniranom i nedreniranom. Također, očekuje se različito ponašanje normalno konsolidiranih i prekonsolidiranih tala [4].

2.2. Uređaji za laboratorijsko ispitivanje čvrstoće tla

Uređaj za izravni posmik

Ispitivanje u uređaju svodi se na izazivanje sloma tla po unaprijed definiranoj/kontroliranoj horizontalnoj plohi sloma, putem smicanja jedne polovine uzorka u odnosu na drugu, s pomoću dvije razdvojene metalne kutije od kojih je jedna nepokretna, a druga se pomiče u odnosu na prvu pod djelovanjem sile klipa koji se pomiče kontroliranom brzinom pomaka. Ispitivanje se provodi u dvije faze na tri do četiri ispitna uzorka pripremljena iz jednog uzorka tla, koji su konsolidirani na različitim vertikalnim naprezanjima, a zatim smicani [2]. Na slici 3 prikaza je shema uređaja za izravni posmik sa prikazom rezultata ispitivanja.



Slika 3. Presjek uređaja za izravni posmik i prikaz rezultata ispitivanja [4]

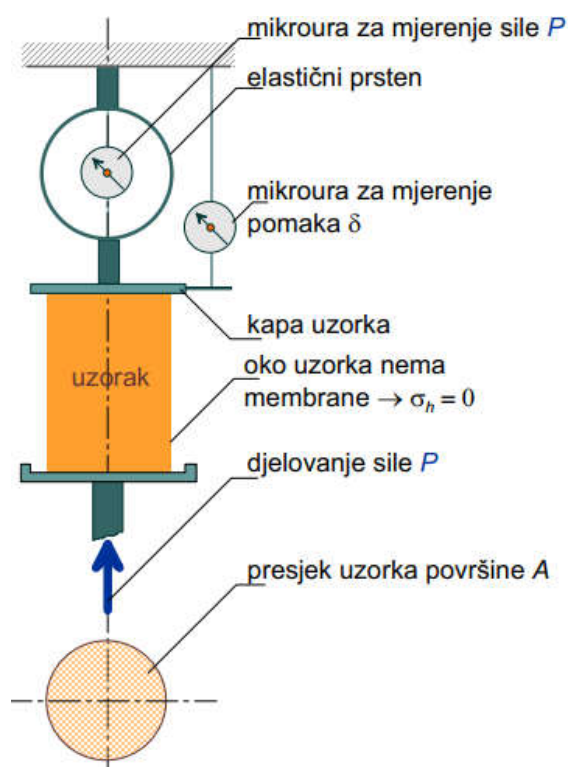
Odrezak pravca na osi posmičnog naprezanja predstavlja koheziju (c), a nagib pravca kut unutarnjeg trenja (φ), što je ujedno i rezultat ispitivanja.

Uređaji za određivanje nedrenirane čvrstoće tla

Uređaj za jednoosnu tlačnu čvrstoću (JT)

Služi za određivanje nedrenirane čvrstoće tla, te se ispitivanje može koristiti za tla koja su dovoljno nepropusna, kako se u kratkom vremenu smicanja ne bi dogodila konsolidacija, odnosno disipacija porenih tlakova uzorkovanih

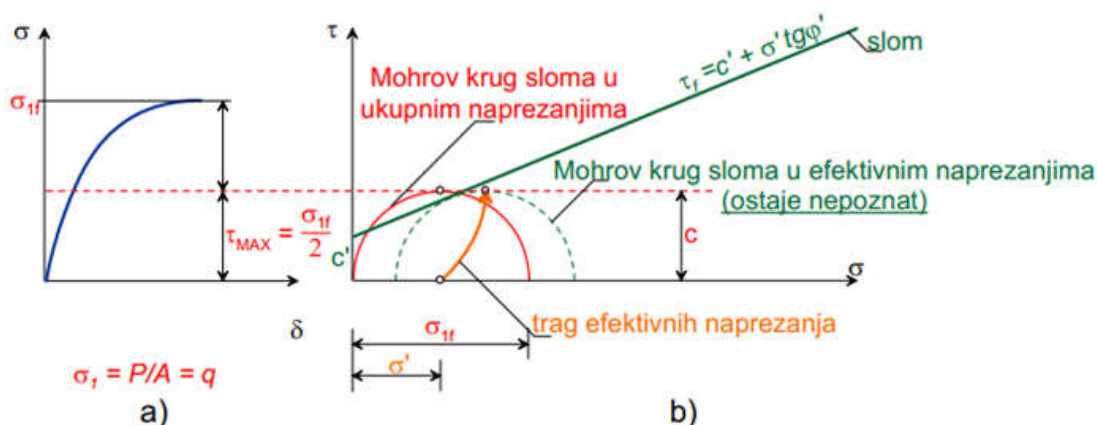
brzim pokusom. Pokus se svodi na ispitivanje cilindričnog uzorka tla pri tlačnom naprezanju, bez bočnog pridržanja. Sila se proizvodi kretanjem klipa koji preko pločice-kape pritišće uzorak određenom brzinom, tako da slom nastane u vremenu od oko 10 minuta. Uzorak bi trebao biti promjera od najmanje 35 mm, a visina mu treba biti 2-2,5 puta veća od promjera radi izbjegavanja utjecaja trenja na krajevima uzorka [2]. Na donjoj slici je prikazana shema uređaja za jednoosni posmik.



Slika 4. Shema uređaja za jednoosni posmik [4]

Na slici 5 prikazana je Mohrova kružnica ukupnih naprezanja pri slomu uzorka. Budući da se ne mjeri porni tlak, ostaje nam nepoznata kružnica efektivnih naprezanja.

Ako je bočno naprezanje u totalnim napreznjima, $\sigma_{3f} = 0$, odgovarajuća kružnica totalnih naprezanja prolazi kroz ishodište koordinatnog sustava [4].



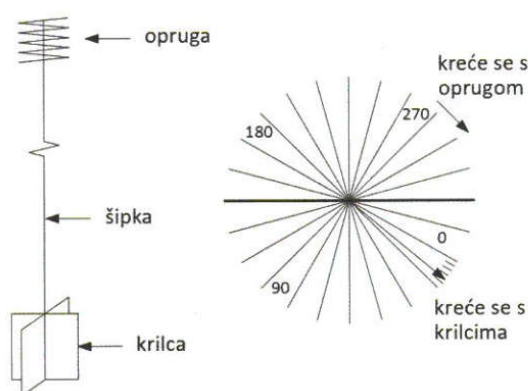
Slika 5. a) dijagram promjene napreznaja s deformacijom u jednoosnom posmiku
 b) trag napreznaja u jednoosnom posmiku i veza jednoosne čvrstoće s nedreniranom čvrstoćom [4]

Veličina jednoosne čvrstoće, σ_{1f} , jednaka je osnom napreznanju, tj. promjeru kružnice. Tu veličinu označavamo s q_u . Nedrenirana kohezija je jednaka radijusu kružnice tj. polovici nedrenirane čvrstoće. Vrijedi, dakle: $c_u = \frac{q_u}{2}$

Rezultat ispitivanja je podatak o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći uzorka, deformacija pri slomu, te početne vrijednosti ispitnog uzorka (vlažnost, gustoća, dimenzije).

Laboratorijska krilna sonda (KS)

Postupak ispitivanja svodi se na mjerenje torzijskog momenta koji izaziva slom tla oko metalnih krilaca pričvršćenih na osovinu koju zakreće motor. Na donjoj slici je prikazan princip rada laboratorijskom krilnom sondom.

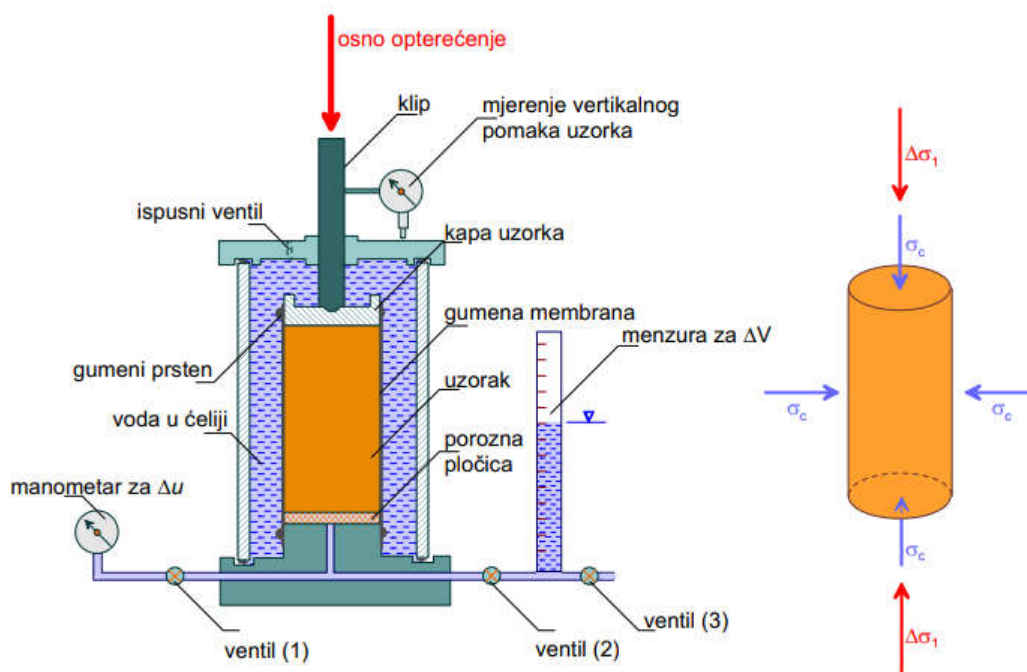


Slika 6. Princip ispitivanja laboratorijskom krilnom sondom [2]

Krilca po svome obodu (po izvodnici i po bazama) lome tlo pri brzom okretanju. Čvrstoća tla određena pri prvom okretanju zove se vršna nedrenirana čvrstoća. Nakon što pređe vršnu nedreniranu čvrstoću, krilca se zarotiraju za desetak punih okretaja. Nakon toga se opet provodi smicanje kao i prvi put, i tako određena čvrstoća zove se rezidualna nedrenirana čvrstoća. Omjer vršne i rezidualne nedrenirane čvrstoće je koristan pokazatelj i naziva se stupanj osjetljivosti.

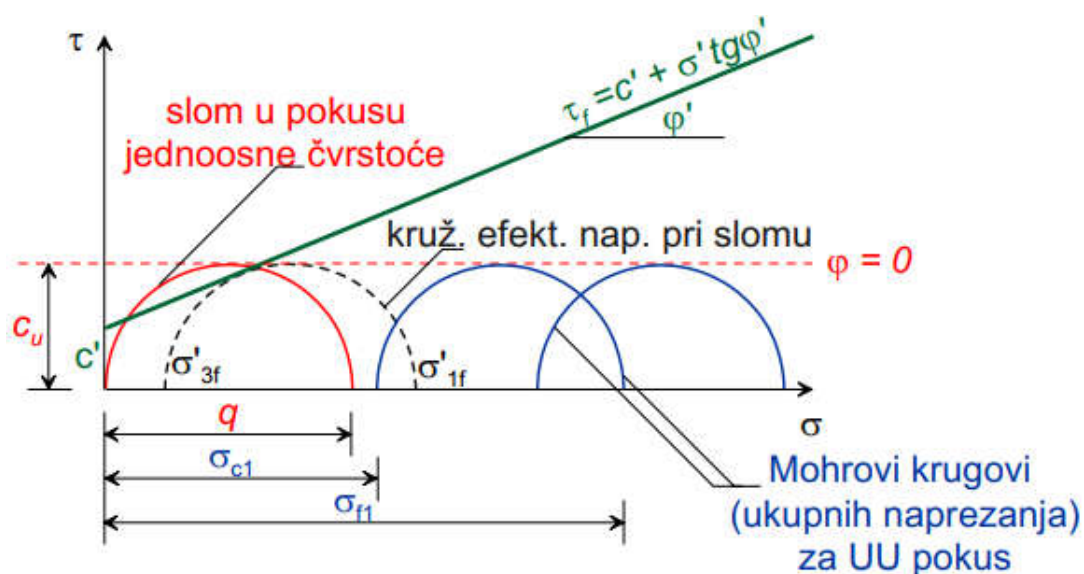
Uređaj za troosni posmik (UU)

Služi za određivanje nedrenirane čvrstoće uzorka koherentnog tla koji je izložen konstantnom bočnom (svestranom) tlaku i osnom opterećenju s kontroliranom deformacijom, bez promjene ukupne vlažnosti. Pokus se obično obavlja na nizu ispitnih uzoraka oblikovanih iz istog, ali većeg uzorka tla, izloženih različitim bočnim tlakovima. Pokus se provodi na cilindričnim uzorcima kojima je visina približno jednaka dvostrukom promjeru, a promjer uzorka kreće se od 38 mm do oko 110 mm. Na slici 7 je prikazana shema troosnog uređaja, dok je na slici 8 prikazano stanje početnih efektivnih i ukupnih naprezanja pri slomu u UU pokusu.



Slika 7. Shema troosnog uređaja [4]

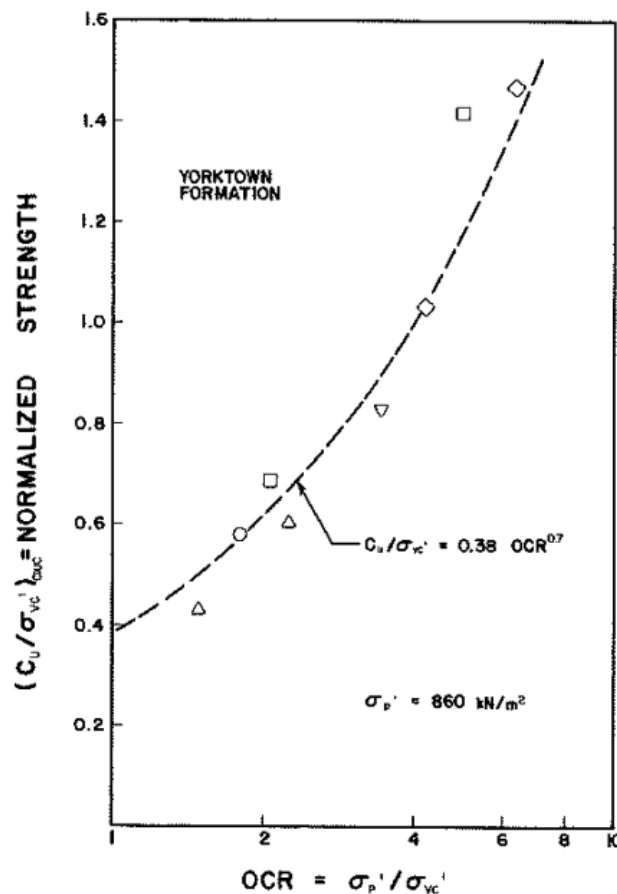
Tijekom pokusa uzorak se nalazi u nepropusnoj membrani između nepropusnih pločica u troosnoj ćeliji u kojoj se tlači vodom. Osnovno opterećenje se nanosi putem deformacije s konstantnim prirastom sve dok ne dođe do sloma uzorka, obično nakon 5 do 15 minuta. Kako bi rezultati UU pokusa bili upotrebljivi, važno je da se uzorak ispituje u vrlo kratkom roku nakon vađenja iz tla (nekoliko sati). Sam se pokus izvodi tako da se uzorak, kao i za ostale tipove pokusa, ugradi u troosnu ćeliju u kojoj se primijeni neko početno naprezanje σ_c . Ćelijski tlak djeluje preko membrane samo na povećanje porednog tlaka, a efektivno naprezanje se ne mijenja. Nakon ugradnje uzorak se u pravilu ne konsolidira, već se odmah prelazi na posmik, za vrijeme kojeg se ne mjeri poredni tlak [4]. Rezultat ispitivanja je podatak o nedreniranoj čvrstoći uzorka, deformacija pri slomu, te početne vrijednosti ispitnog uzorka (vlažnost, gustoća, dimenzije).



Slika 8. Stanje početnih efektivnih naprezanja, te stanje efektivnih i ukupnih naprezanja pri slomu u UU pokusu (u σ', τ dijagramu). Označena je kružnica efektivnih naprezanja (σ'_{1f} , σ'_{3f}) koja odgovara svim kružnicama ukupnih naprezanja [4]

2.3. Nedrenirana čvrstoća tla i OCR

Glinoviti materijali mogu biti normalno konsolidirani ili prekonsolidirani, što ovisi o prirodnom stanju nastalim procesom konsolidacije i rekonsolidacije. Stupanj prekonsolidacije (OCR) definiran je kao odnos maksimalnog efektivnog naprežanja u povijesti tla, σ_p' i trenutnog vertikalnog efektivnog naprežanja na tlo, σ_v' . Ukoliko je maksimalno prekonsolidacijsko naprežanje jednako trenutnom vertikalnom efektivnom naprežanju takav materijal je normalno konsolidiran, a stupanj prekonsolidacije je jednak 1. Ukoliko je maksimalno prekonsolidacijsko naprežanje, σ_p' veće od trenutnog vertikalnog naprežanja na tlo σ_v' tada se radi o prekonsolidiranom tlu, a OCR je veći od 1. Nedrenirana čvrstoća gline nije jedinstvena karakteristika tla, već je ponašanje. Stoga se za različita naprežanja i različite metode određivanja dobivaju različite vrijednosti nedrenirane čvrstoće. Na slici 9 prikazano je kako vrijednosti nedrenirane čvrstoće ovise o stupnju prekonsolidacije (OCR) za osjetljive gline sa primjesama pijeska.



Slika 9. Nedrenirana čvrstoća za osjetljive gline sa primjesama pijeska, u ovisnosti o stupnju prekonsolidacije OCR [5]

3. PRIMJENA NEDRENIRANE ČVRSTOĆE U GEOTEHNIČKIM ZAHVATIMA

Koherentna tla u kojima se izvodi temeljenje objekata (mostovi, zgrade, nasipi) provjeravaju se po nosivosti i slijeganju kako bi se ocijenila sigurnost konstrukcije / objekta od sloma u tlu i od prevelikih deformacija. Nosivost temeljnog tla računa se prema EC-7 za drenirane i nedrenirane uvjete, na temelju izraza (1) i (2) za nosivost kojim se uzima u obzir i geometrija temelja, i nagib temeljne plohe i utjecaj horizontalnog opterećenja. Ti izrazi razvijeni su na temelju istog modela sloma tla kakav se koristio za nosivost po Terzaghi-u ili Brinch-Hansenu [6]. Terzaghijevo približno rješenje za prosječno efektivno normalno kontaktno naprežanje na vodoravnoj temeljnoj plohi centrično opterećenog trakastog temelja koji izaziva slom tla, i koji se ponekad naziva nosivost tla, može se napisati u slijedećem obliku za drenirane uvjete u tlu:

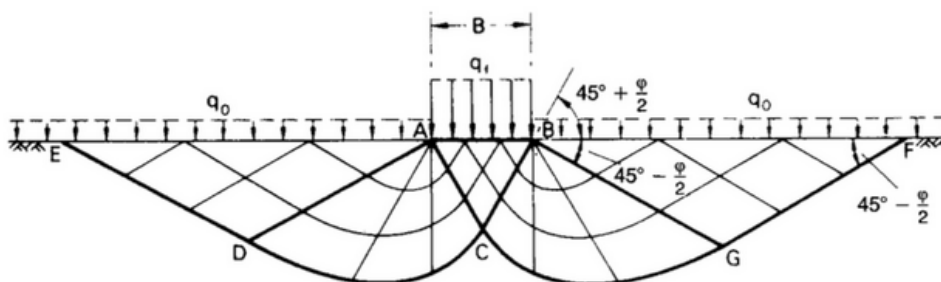
$$q_f = c' \cdot N_c + \frac{1}{2} \cdot b \cdot \gamma' \cdot N_\gamma + q' \cdot N_q$$

U gornjem izrazu su N_c , N_γ i N_q faktori nosivosti koji ovise o efektivnom parametru čvrstoće φ' (efektivni kut trenja) Mohr-Coulombovog zakona čvrstoće za tlo, c' je također parametar čvrstoće (efektivna kohezija) istog zakona, b je širina trakastog temelja, γ' je efektivna jedinična težina tla, a q' je efektivno vertikalno naprežanje u tlu na dubini temeljne plohe [6].

Za nedrenirane uvjete izraz za nosivost tla poprima jednostavniji oblik:

$$q_f = c_u \cdot (2 + \pi) + q$$

Model sloma tla je klizna ploha u obliku logaritamske spirale, a prikazana je na slici 10.



Slika 10. Model sloma ispod temeljne trake [5]

Razlikujemo provjeru nosivosti u dreniranom stanju kada je obavljena konsolidacija te u nedreniranom stanju kada nije došlo do konsolidacije temeljnog tla, jer je brzina nanošenja opterećenja veća od mogućnosti dreniranja koherentnog temeljnog tla. Razlika u odnosu na izraz po Terzaghi-u je u vrijednostima faktora nosivosti, kao posljedica geometrije klizne plohe po kojoj je kod Terzaghi-a kut ABC u klinu φ , a kod ostalih rješenja taj kut je $45 + \varphi/2$. Na to se dodaju još dijelovi izraza za geometriju temelja (pravokutni, traka, kružni), za nagnutost temeljne plohe i prisutnost horizontalne sile [6].

Za nosivost u dreniranim uvjetima koristi se slijedeći izraz:

$$\frac{R_d}{A'} = c' \cdot N_c + q' \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N \quad (1)$$

gdje je R_d vertikalna proračunska sila otpora tla ($R_d / A' = q_{dop}$), A' = efektivna površina temelja, q' = efektivni tlak tla na temeljnoj plohi, a faktori su:

$$\text{za nosivost} \rightarrow N_q = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi'}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \varphi'$$

$$N = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \varphi' \rightarrow \text{kada je } \delta \geq \frac{\varphi'}{2} \text{ (hrapava baza temelja)}$$

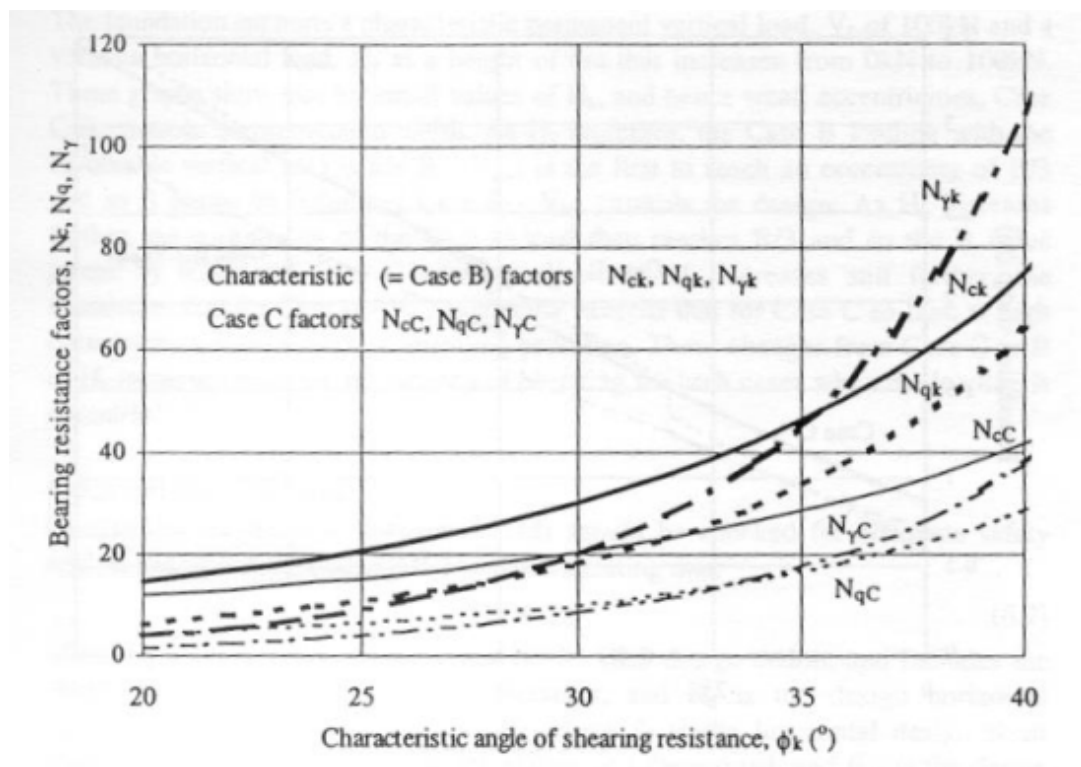
Za nosivost u nedreniranim uvjetima koristi se slijedeći izraz:

$$\frac{R}{A'} = (\pi + 2) \cdot c_u \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q \quad (2)$$

gdje je faktor b_c faktor nagiba temeljne plohe, s_c faktor oblika temelja i i_c faktor nagiba opterećenja sile, a q je opterećenje nadsloja tla iznad temeljne plohe.

U navedenim izrazima (1) i (2) parametri tla c' , c_u i φ' su projektni parametri određeni iz karakterističnih vrijednosti uz smanjenje za parcijalne faktore sigurnosti. Oni su jednaki 1.25 za koheziju i za $\tan \varphi'$, za modele proračuna gdje se iskazuje nepouzdanost podatak o svojstvima tla. Posebno se uvode faktori za opterećenja (veći od 1) [6].

Treba naglasiti da se u EC7 koristi izraz otpornost na nosivost (*eng. bearing resistance*), a ne klasično nosivost (kapacitet nosivosti), što je u duhu Eurocode-a. Faktori nosivosti određuju se prema zadanim formulama, odnosno prema dijagramu na slici 11 [6].



Slika 11. Vrijednosti faktora nosivosti prema EC-7 [8]

3.1. Plitki temelj

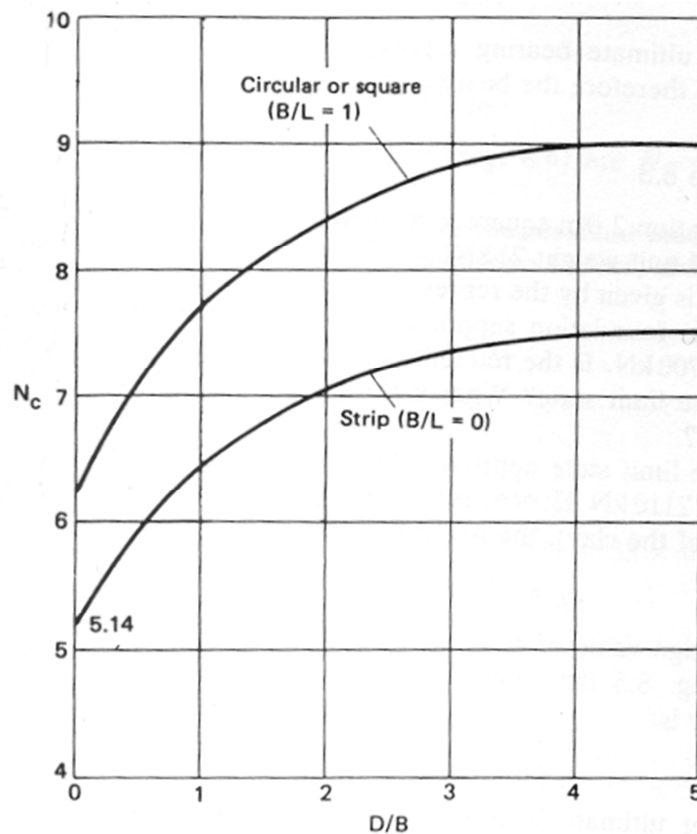
Za nedrenirane uvjete koristi se izraz prema Skemptonu:

$$q_f = c_u \cdot N_c + \gamma D$$

U gornjem izrazu N_c je faktor nosivosti koji ovisi o efektivnom parametru čvrstoće φ' (efektivni kut trenja) Mohr-Coulombovog zakona čvrstoće za tlo, c_u je nedrenirana čvrstoća, γ je jedinična težina tla, a D je dubina temeljne plohe.

Za pravokutni temelj N_c se računa tako da se vrijednost za kvadratni temelj množi sa $0.84 + 0.16 B / L$. Klasično rješenje za nedreniranu nosivost temelja na površini terena daje izraz u nastavku na koji se još može dodati i teret nadsloja [6]:

$$q_f = (2 + \pi) c_u = 5,14 c_u$$



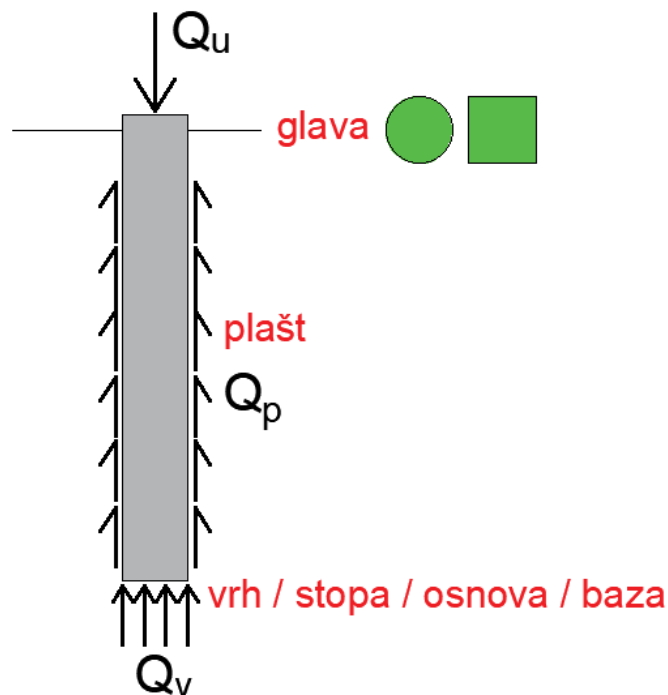
Slika 12. Vrijednosti N_c za rješenje po Skemptonu, za nedrenirane uvjete [9]

Vidljivo je po Skemptonu na slici 12 da već za $D / B = 1$ je faktor nosivosti $N_c = 6,4$ (traka) i $N_c=7,7$ (kružni temelj), što je više nego $5,14$, a svako dalje spuštanje temelja u dubinu povećana vrijednost N_c , do $N_c=9$, što odgovara i za duboki temelj (pilot). Porast nosivosti sa dubinom je značajan.

3.2. Temeljenje na pilotima – otpor na plaštu i otpor na vrhu

Piloti prenose silu u tlo trenjem preko plašta i preko vrha pilota. U tlu piloti nose na plašt (Q_p) i vrh (Q_v). Na slici 13 prikazan je shematski prikaz opterećenja pilota. U glini najveći dio nosivosti odlazi na plašt, a u pijesku na plašt i na vrh. Ako se osloni na tvrdo tlo tada je nosivi dio vrh pilota. Ukupna nosivost pilota je zbroj nosivosti na plašt i na vrh:

$$Q_u = Q_p + Q_v$$



Slika 13. Shematski prikaz opterećenja pilota

Nosivost na plašt, Q_p

Nosivost na plašt je rezultat djelovanja trenja između tla i pilota, koje se može ostvariti jedino ako postoji relativni pomak pilota i tla. Otpor koji nastaje između plašta pilota i tla redovito je manji od čvrstoće tla na smicanje. On ovisi o utjecaju pregriječivanja tla na kontaktu s plaštem kad se pilot zabija ili izrađuje, i o stupnju konsolidacije koherentnog tla [10].

Na dubini z ispod površine terena vlada vertikalno naprezanje

$$\sigma_v' = \gamma' \cdot z \quad (3),$$

koje izaziva i horizontalno naprezanje,

$$\sigma_h' = K_o \cdot \sigma_v' = K_o \cdot \gamma' \cdot z \quad (4).$$

To horizontalno naprezanje izaziva trenje sa pilotom, koje se općenito može zapisati kao:

$$\tau_f = \alpha \cdot c' + K_s \cdot \sigma_h' \cdot \text{tg } \delta \quad (5).$$

Uvrštavanjem izraza (3) i (4) u jednadžbu (5) dobije se izraz (6):

$$\tau_f = \alpha \cdot c' + K_s \cdot K_o \cdot \sigma_v' \cdot \text{tg } \delta = \alpha \cdot c' + K_s \cdot K_o \cdot \gamma' \cdot z \cdot \text{tg } \delta \quad (6),$$

gdje je:

α = koeficijent prionjivosti, ima vrijednost 0,5 - 1,0;

K_s = koeficijent prijenosa opterećenja, oko 0,7

$K_o = 1 - \sin\varphi$; $K_o = (1 - \sin\varphi) \text{OCR}^{0.5}$

δ = koeficijent trenja tlo - pilot, uzima se kao $2/3\varphi$.

Za nedrenirane uvjete kod mekih glina vrijedi da je $c' = c_u$, $\varphi = 0$. Ukupna sila trenja na plaštu ovisi o promjeru i duljini plašta, te o naprežanjima na plašt, pa je:

$$Q_p = \int_0^D \tau_f \cdot O \cdot d \cdot z$$

gdje je:

τ_f (kPa) = jedinična otpornost po plaštu pilota;

O (m) = opseg poprečnog presjeka pilota;

d (m) = duljina pilota ispod površine terena;

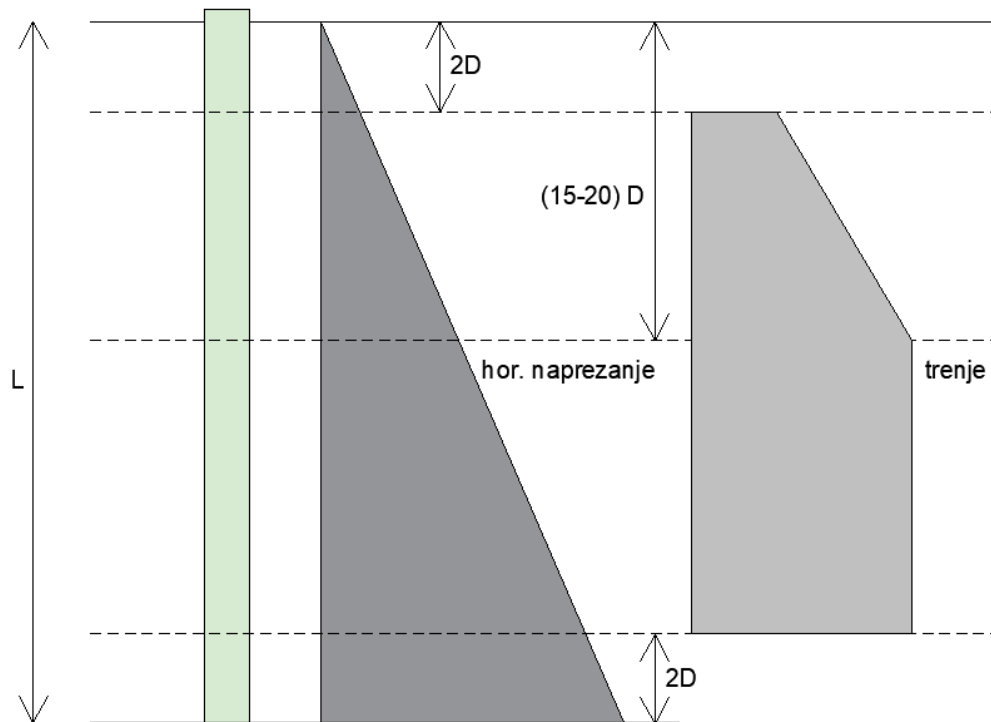
z (m) = dubina ispod površine terena.

Pri proračunu treba uzeti u obzir promjenu materijala po dubini.

Neki istraživači smatraju da treba uzeti u obzir slijedeće kod računanja trenja na plaštu, a prikazano je shematski na slici 14:

- Prvih 1 – 2 m promjera pilota (D) u dubini treba izostaviti jer se radi o zoni prosušivanja i skupljanja (gline) ili o rahlijoj zoni u pijesku
- Trenje raste do maksimalne vrijednosti do dubine (15 – 20) D, a nakon toga ostaje konstantno

- Posljednjih 2D pri vrhu pilota ne treba uzeti u obzir, jer se radi o slomu tla u toj zoni



Slika 14. Shematski prikaz opterećenja pilota

Očito je da će koeficijenti α i K_s ovisiti i o načinu izvedbe – kod zabijenih pilota veće je trenje nego kod bušenih pilota.

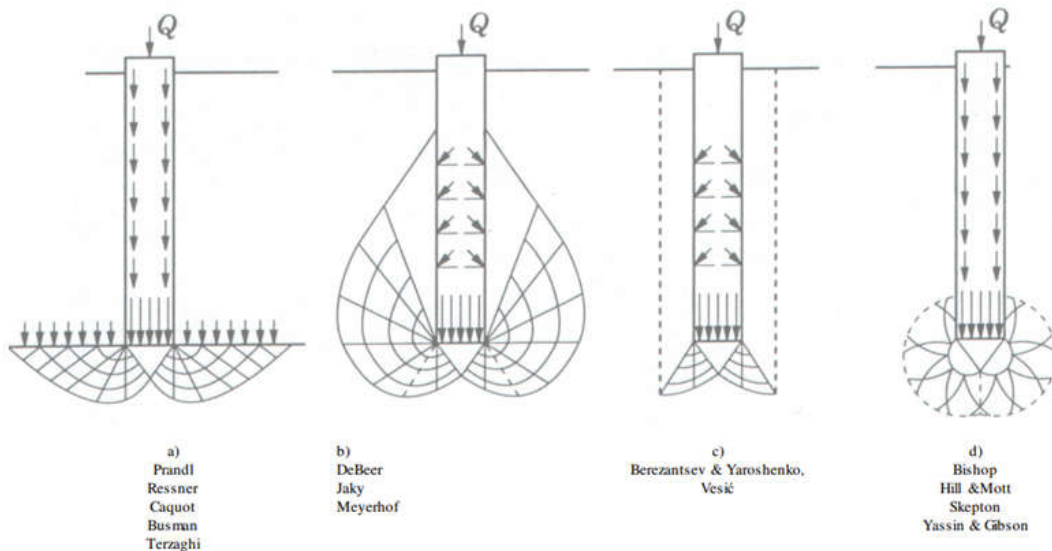
Nosivost pilota na vrhu, Q_v

Tlo na vrhu pilota nosi slično kao plitki temelj, što je vidljivo na slici 15, samo što je slomna ploha u tlu drugačija i što je temelj na velikoj dubini. Zato se koristi sličan izraz za nosivost pilota na vrh onom za nosivost plitkog temelja (npr. Terzaghi):

$$Q_v = c N_c + \frac{1}{2} B N_\gamma + \gamma L N_q$$

U pijesku se često računa samo sa nosivosti od tereta nadsloja ($\gamma \cdot L \cdot N_q$), a u glinama od nedrenirane čvrstoće (vidi sl.11.):

$$Q_v = c_u \cdot N_c, \quad N_c = 9 \text{ (za duboki temelj)}$$



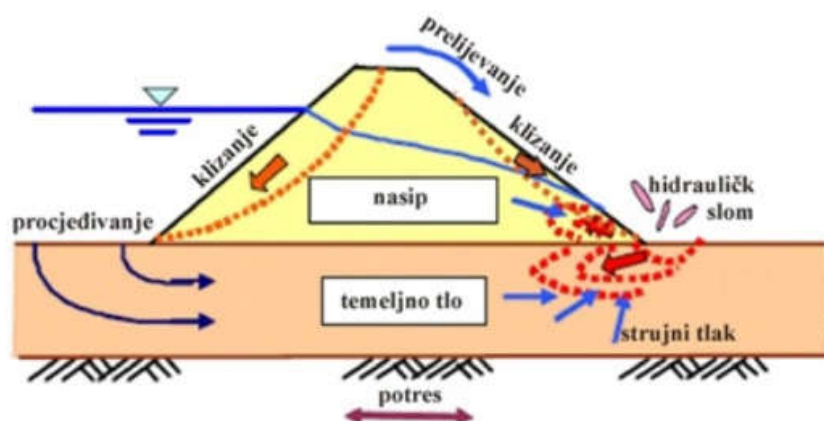
Slika 15. Shematski prikaz modela sloma tla na vrhu pilota prema različitim autorima [10]

3.3. Nasuti objekti – brane i nasipi

Provjera sigurnosti protiv klizanja kod naglog sniženja vodostaja kod nasutih objekata obavlja se uzimajući u obzir nedreniranu čvrstoću na “vodnoj” strani objekta. Također se u fazi gradnje provjerava faktor sigurnosti protiv klizanja na nasipu i temeljnoj podlozi.

Nasute građevine na mekom tlu

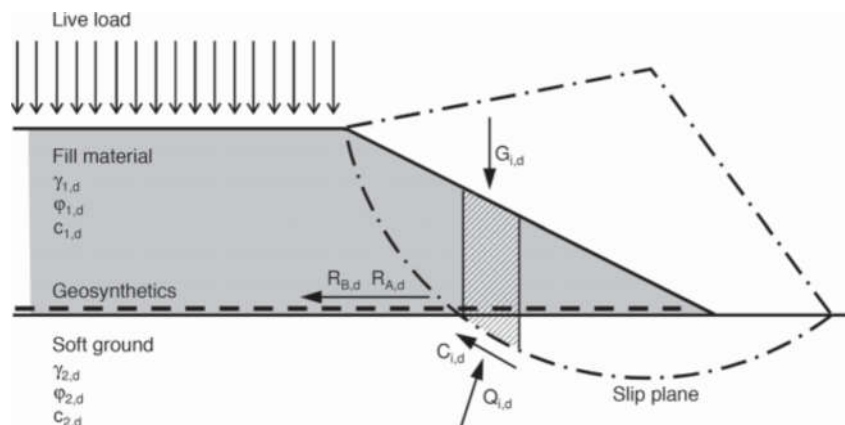
Kontrolira se sigurnost protiv sloma u temeljnom tlu, posebno za meko tlo kada se koristi nedrenirana analiza za nosivost temeljnog tla, te stabilnost uzvodnog pokosa kod akumulacija za slučaj naglog sniženja vode u akumulaciji. U ovom posljednjem slučaju koristi se nedrenirana čvrstoća određena na zbijenom tlu (Proktor pokus) u zasićenim uvjetima. Na slici 16 prikazan je shematski prikaz kliznih ploha nasutih brana na mekom tlu.



Slika 16. Shematski prikaz kliznih ploha nasutih brana na mekom tlu [11]

Nasipi na mekom tlu sa armaturom od geotekstila

Armatura na kontaktu nasipa i temeljnog tla pomaže smanjenju ukupnih deformacija nasipa, diferencijalnih deformacija nasipa, povećava nosivost nasipa i sprječava slom nasipa u zoni pokosa i nožice nasipa, što je vidljivo na slici 17. Klizne plohe mogu biti kružne ili kombinirane - kružna s poligonalnim, ovisno o vrsti sloma.



Slika 17. Armatura u zoni pokosa nasipa povećava stabilnost nasipa - kružna klizna ploha [6]

Za nasip u zoni pokosa postoji mogućnost da doživi slom klizanjem kroz nasip, pri čemu se to klizanje može ostvariti sljedećim mehanizmom:

- slom kroz nasip i klizanje po vrhu armature
- slom kroz nasip, slom armature i klizanje ispod armature
- slom kroz nasip i izvlačenje armature (pullout)
- slom kroz nasip, slom armature i klizanje kroz temeljno tlo.

4. ISPITIVANJE NEDRENIRANE ČVRSTOĆE I KORELACIJE

Nedrenirana čvrstoća (ili nedrenirana kohezija) tla c_u je najveće posmično naprezanje u tlu pri nedreniranim uvjetima brzog smicanja odnosno relativno brze promjene opterećenja pri kojem nije došlo do promjene vlažnosti. Pri opterećivanju bez promjene volumena postoji jedinstvena veza između efektivnih naprezanja i deformacije uzorka, jer su, s promjenom jedne komponente deformacije, preostale dvije komponente definirane [12]. Nedrenirana čvrstoća je bitan parametar kod situacija kod kojih ne dolazi do nagle promjene razine vode. Takvi uvjeti se redovno pojavljuju kod izvedbe standardnih geotehničkih zahvata u sitnozrnim tlima male propusnosti, kod kojih za vrijeme trajanja izvedbe radova ne može doći do značajnije promjene količine vode u porama tla, dok se u krupnozrnim tlima takvi uvjeti rijetko javljaju zbog njihove velike propusnosti. Ipak moguća je pojava takvih uvjeta prilikom potresa ili uslijed dinamičkog djelovanja temelja teških strojeva. Vrijednost nedrenirane čvrstoće uobičajeno raste s porastom dubine jer s porastom dubine rastu i početna efektivna naprezanja od vlastite težine nadsloja, iako je i moguće da se ispod slojeva tla veće nedrenirane čvrstoće nalaze i slojevi tla nižih vrijednosti nedrenirane čvrstoće, jer ista nije funkcija samo stanja naprezanja [12].

Važnu ulogu nedrenirana čvrstoća ima i za stabilnost kosina u uvjetima brzog opterećenja, kao što je primjerice potresno opterećenje. Kada mobilizirana posmična naprezanja prekorače vrijednost posmične nedrenirane čvrstoće tla, dolazi do formiranja klizišta kao što je primjerice klizište u blizini Aratozawa brane u Japanu, prikazane na slici 18, nastalo kao rezultat potresa Iwate-Miyagi, magnitude 6.9, iz 2008. godine.

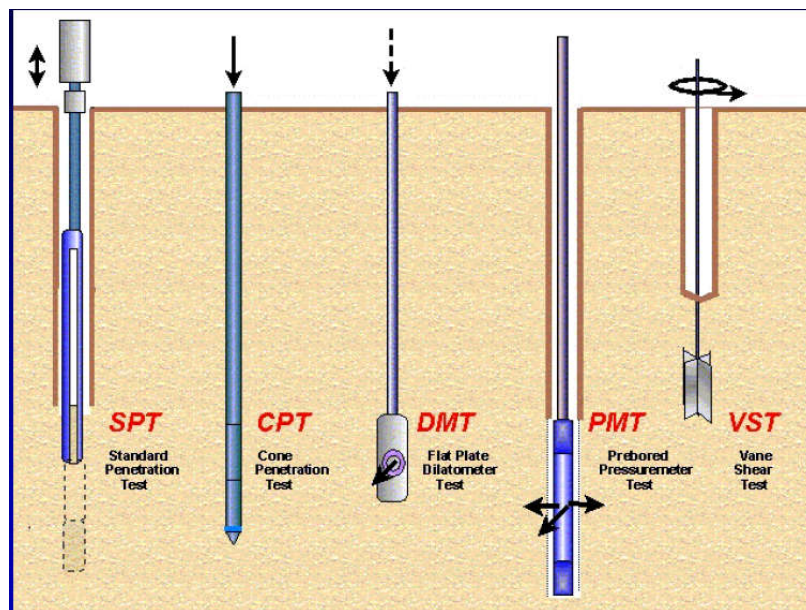


Slika 18.: Klizište u blizini Aratozawa brane u Japanu nastalo kao rezultat potresa Iwate-Miyagi, magnitude 6.9, iz 2008. godine [13]

Vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće uvelike ovisi i o postupku ispitivanja, gdje je moguće koristiti i terenske i laboratorijske pokuse. Nedrenirana čvrstoća se na terenu određuje pokusom krilne sonde, statičkim penetracijskim pokusom (CPT ili CPTU), plosnatim dilatometrom, dok se u laboratoriju određuje pokusom padajućeg šiljka, pokusom jednoosne tlačne čvrstoće, te nekonsolidiranim nedreniranim troosnim pokusom (UU pokus) [12].

4.1. In situ ispitivanja

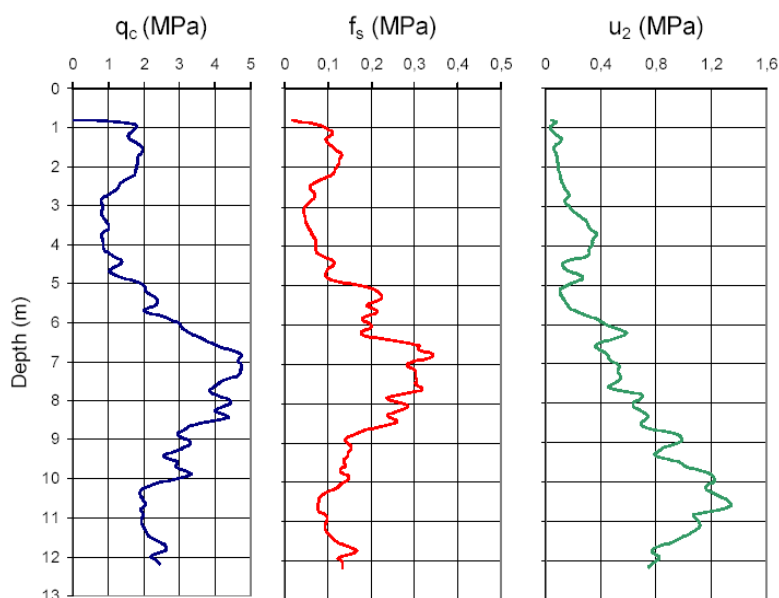
In situ ispitivanja podrazumijevaju primjenu postupaka kojima se na terenu dobivaju podaci dovoljni za procjenu parametara tla – fizikalnih i mehaničkih svojstava tla. Ti pokusi izvode se ili u bušotini, nakon što se dostigne neka dubina bušenjem, ili neovisno o bušotinama – zasebnom penetracijom instrumenta u tlo pod silom utiskivanja stroja – odatle naziv penetracijska ispitivanja. U nastavku se opisuju najčešća i najpoznatija ispitivanja tla in situ, shematski prikazana na slici 19.



Slika 19.: Vrste i princip ispitivanja tla in situ pokusima, preuzeto iz [14]

CPTU ispitivanja

Pokus se označava kraticom na dva načina: CPT (cone penetration test) – kada se ne mjeri porni tlak i CPTU – CPT sa mjerenjem pornog tlaka. Na slici 20 prikazan je uobičajeni izvještaj o obavljenom ispitivanju.



Slika 20.: Uobičajeni prikaz mjerenih veličina u pokusu CPTU, primjećuje se područje veće čvrstoće od 6 do 10 m dubine, primjer iz Slavonije, 2015. (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Ovim pokusom mogu se procijeniti slijedeća svojstva tla:

- raspored slojeva tla po dubini (prema tipu ponašanja – glina, prah, pijesak, njihove mješavine, ne može se izvoditi u šljunku)
- kut unutarnjeg trenja nekoherentnog tla
- nedrenirana čvrstoća koherentnog tla
- modul stišljivosti tla
- karakteristike konsolidacije tla
- naprezanje prekonsolidacije

Pri interpretaciji ovih veličina potrebno je korigirati mjerene otpore trenja i šiljka za djelovanje pornog tlaka.

Na temelju teoretskih razmatranja i empirijskih podataka razvijeni su izrazi kojima se procjenjuje nedrenirana čvrstoća tla, kut trenja, modul elastičnosti, stišljivosti i konsolidacijska svojstva tla.

Izraz za procjenu nedrenirane čvrstoće:

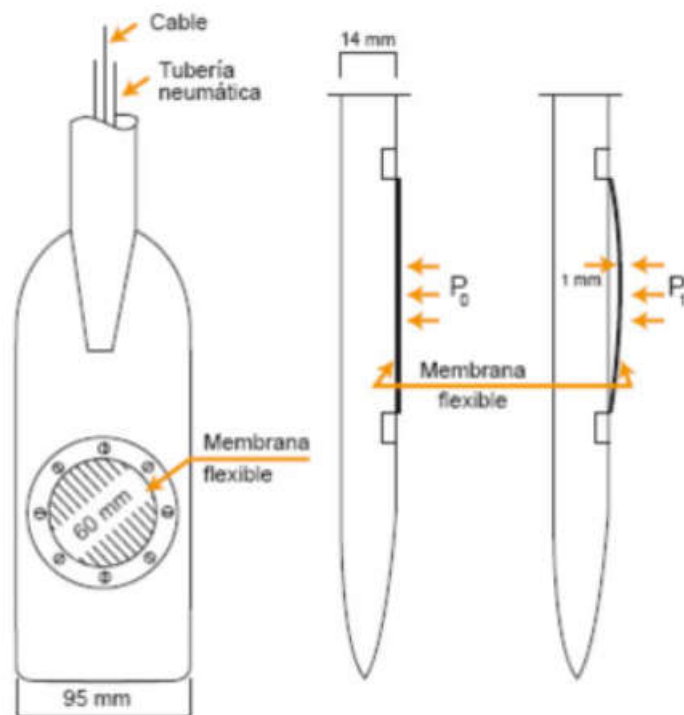
$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v.0}}{N_{k,t}}$$

gdje se vrijednost N_k ili $N_{k,t}$ određuje na temelju lokalnih iskustava, q_t je korigirani q_c za porni tlak. Vrijednosti $N_k=12-22$, ovisno o tlu i konzistentnom stanju.

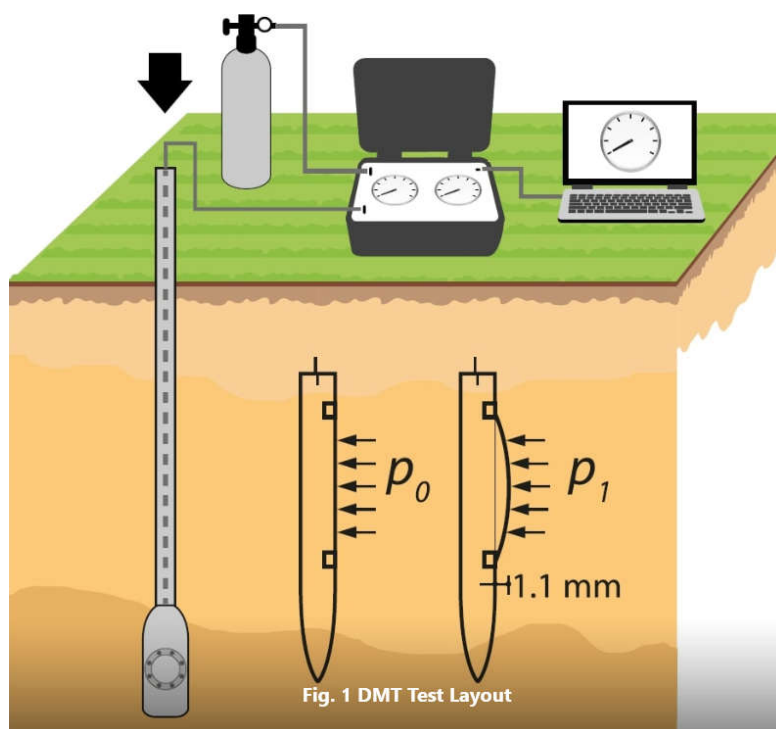
Ispitivanje dilatometrom MARCHETTI

Ovo ispitivanje provodi se u bušotini ili van bušotine (instrument sam biva guran u tlo ili udaran, neovisna je brzina utiskivanja o mjerenjima).

Svakih 20 ili više centimetara zaustavlja se utiskivanje i tada se mjere tlakovi potrebni da se membrana na instrumentu vrati do površine (pritisnuta tlom ona je udubljena) i nakon toga još 1,1 mm istisne iz te ravnine u tlo. Time se mjere tlakovi p_0 i p_1 kojima se interpretiraju svojstva tla. Na slikama 21 i 22 prikazan je princip i shema rada dilatometra Marchetti.



Slika 21.: Dilatometar Marchetti: princip rada, tlakom iz posebnog uređaja tjera se membrana prema van (u tlo), dok se ne poravna sa površinom papučice (tlak p_0) i zatim još 1,1 mm (tlak p_1) [15]



Slika 22.: Shema rada dilatometra Marchetti [16]

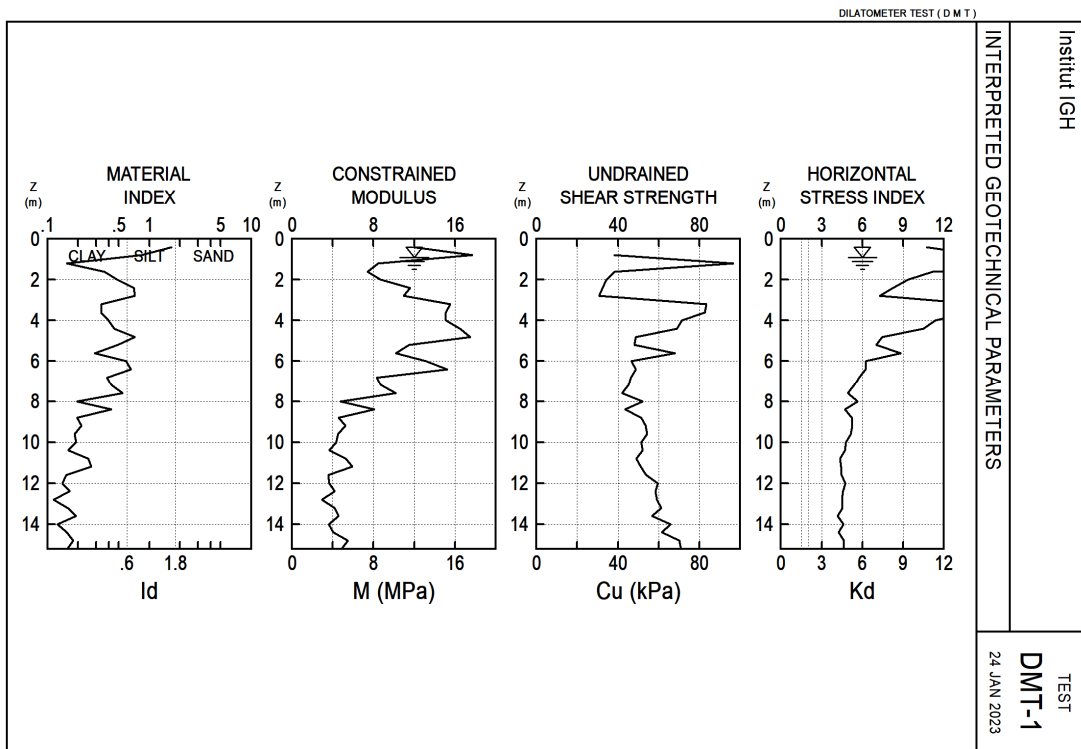
Iz mjerenih tlakova računaju se sljedeći parametri:

- $I_{DMT} = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$, Indeks materijala (za identifikaciju tipa tla po ponašanju – C,M,S)
- $K_{DMT} = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$, Indeks krutosti
- $E_{DMT} = 34,7 (p_1 - p_0)$, Modul dilatometarski iz kojeg se računa edometarski modul

Nedrenirana čvrstoća se računa prema sljedećem izrazu:

$$c_u = 0,22 \cdot \sigma'_{v0} \cdot (0,5 \cdot K_{DMT})^{1,25}$$

Na slici 23 prikazan je uobičajeni izvještaj o obavljenom ispitivanju iz kojeg se može isčitati indeks materijala, dilatometarski modul, nedrenirana čvrstoća i indeks krutosti.



Slika 23.: Uobičajeni prikaz mjerenih veličina u pokusu DMT, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Ispitivanje terenskom krilnom sondom

Pokus se izvodi na terenu u koherentnom tlu, za određivanje nedrenirane čvrstoće tla. U bušotinu se na dno spusti šipka sa krilcima na kraju, utisne u tlo 50-60 cm i zatim rotira do sloma tla, koji se treba dogoditi u 10-ak minuta. Time se odredi vršna čvrstoća. Rezidualna čvrstoća određuje se nakon sloma tla kada se brzo krilca zarotiraju desetak puta i zatim lagano ponovo ispituje slom, kao da je prvi put utisnuto krilce u tlo.

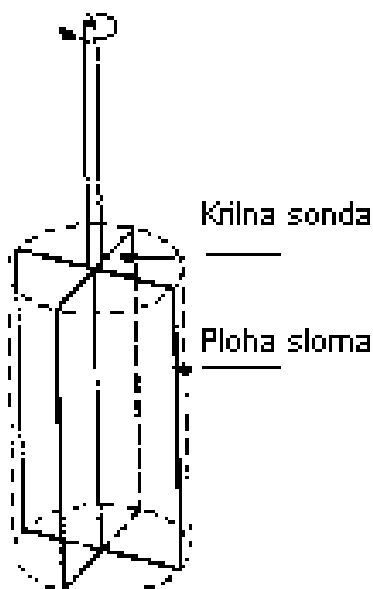
Pokus je posebno dobar u mekim glinama, za određivanje nedrenirane čvrstoće, ali ne i u tvrdim glinama (veće čvrstoće od 100 kPa).

Pokus se izvodi ili u bušotini, ili (u vrlo mekim tlima) utiskivanjem sa površine bez prethodnog bušenja. Slika 24 prikazuje pretpostavljenu površinu sloma za standardne krilne sonde.

Za standardne krilne sonde kod kojih je $d : h = 1 : 2$ te kod kojih je površina sloma u skladu sa donjom slikom, nedrenirana čvrstoća tla treba se odrediti pomoću slijedeće formule:

$$C_{fv} = 0,273 \frac{T_{\max;u}}{D^3}$$

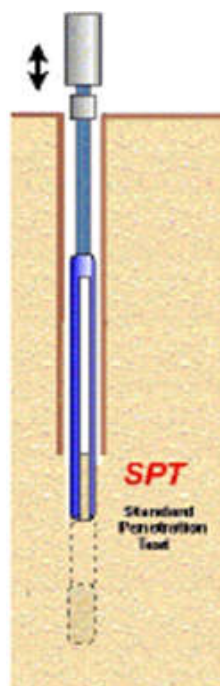
$T_{\max;u}$ je maksimalni okretni moment na krilnoj sondi, a D je širina krilca.



Slika 24.: Pretpostavljena površina sloma za standardne krilne sonde [6]

Standardni penetracijski pokus (SPT ili SPP)

Izvodi se isključivo bušotini, na nekoj dubini dosegnutoj bušenjem, nakon što je tlo na dnu bušotine očišćeno od ostataka bušenja. Donja slika prikazuje shematski prikaz SPT pokusa u bušotini.

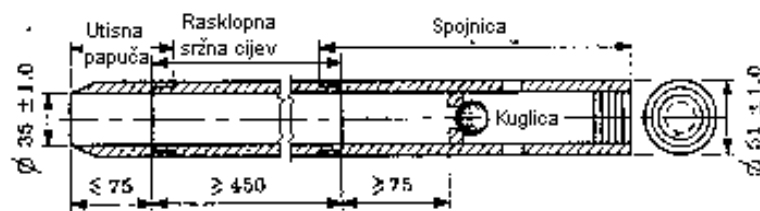


Slika 25.: Shematski prikaz SPT pokusa u bušotini[6]

Provodi se tako što se udarcima malja (mase 63,5 kg koji pada sa visine 70 cm) po šipkama u tlo utiskuje propisani cilindar (za koherentno tlo) ili šiljak (za nekoherentno tlo). Broji se potreban broj udaraca za utiskivanje od tri puta po petnaest centimetara (N1 0-15 cm, N2 15-30 cm, N3 30-45 cm). Zbroj udaraca N2 + N3 daje rezultat pokusa:

$$N_{SPT} = N2 + N3$$

Ovo je najstariji i najčešći in situ pokus u praksi, zbog jednostavnosti i iskustva u korištenju pri projektiranju. Bolje je iskoristiv u nekoherentnom tlu (ocjena zbijenosti, kuta trenja, stišljivosti – preko iskustvenih korelacija) nego u koherentnom tlu (nedrenirana čvrstoća, stišljivost – korelacije).



Slika 26.: Izvedba pokusa SPT – standardne penetracije;
izgled cilindra za SPT pokus [6]

Rezultat pokusa se korigira za:

- stvarnu energiju utiskivanja, na tzv. N_{60} koji odgovara energiji 60% od teoretske (ustanovljeno je da se prosječno taj dio energije udarca prenosi u tlo pri vertikalnom naprezanju od 100 kPa, ili na cca 10 m dubine)
- utjecaj dubine (od nadsloja tla)
- utjecaj sitnih čestica u prašinstim pijescima

Broj udaraca N koristi se izravno u računanju nosivosti nekoherentnog tla kod plitkih i dubokih temelja, na temelju iskustvenih izraza i ispitivanja modela, ali za nekoherentna tla. Pokus se izvodi svakih 1,5 – 2,0 m dubine u bušotini, pa može poslužiti i kao mjera promjene krutosti po dubini tla.

4.2. Laboratorijska ispitivanja

Ispitivanje laboratorijskom krilnom sondom

Ispitivanje se provodi prema ASTM D4648 [20]. Pokus je pogodan za normalnokonsolidirana i slabokonsolidirana tla. Kod jako prekonsolidiranog tla nastaju pukotine i okalni lomovi izvan krilaca i u takvim uvjetima interpretacija nedrenirane čvrstoće nije sasvim pouzdana. Na slici 27 prikazana je laboratorijska krilna sonda u geotehničkom laboratoriju Instituta IGH.

Oprema za ispitivanje

1. Laboratorijska krilna sonda
2. Krilca različitih dimenzija za različite tipove tla



*Slika 27.: Laboratorijska krilna sonda,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*

Pripremni radovi

Visina uzorka mora biti takva da prilikom utiskivanja krilca, iznad njega ostane najmanje 50 mm uzorka.

Provedba ispitivanja

Postaviti uzorak na postolje, te ga obložiti sa metalnim djelom s jedne strane i drvenim djelom s druge strane. Krilce se utiskuje u uzorak tako da je iznad njega najmanje 50mm uzorka, a brzina okretanja je oko 6°/min do 12°/min, što kontrolira motor koji okreće krilca. Pokus se provodi u nekoliko točaka po tlocrtu uzorka, s time da treba pripaziti da se kod uzoraka manjeg promjera jednim ispitivanjem ne zadire u zonu drugog ispitivanja. Računa se srednja vrijednost svih mjerenja. Donja slika prikazuje mjerač kuta na laboratorijskoj krilnoj sondi.



Slika 28.: Laboratorijska krilna sonda-mjerač kuta, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Izračunavanje

Nedrenirana čvrstoća se iz pokusa krilnom sondom izračunava pomoću sljedećeg izraza:

$$\tau_v = \frac{1000 T_r}{\pi D^2 \left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6} \right)}$$

gdje je:

τ_v (kPa) = nedrenirana čvrstoća određena krilnom sondom

T_r (Nmm) = moment torzije

H (mm) = visina krilca

D (mm) = širina krilca

Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće

Ispitivanje se provodi prema normi BS 1377:1990, dio 7, točka 7.2. [21]. U jednoosnom tlačnom pokusu ispituje se cilindrični uzorak koherentnog tla stalnim rastućim osnim pritiskom do sloma. Jednoosna tlačna čvrstoća tla je maksimalna vrijednost tlačne sile po jediničnoj površini koju uzorak može primiti. Ispitivanjem se dobiva trenutna približna vrijednost tlačne čvrstoće tla u neporemećenom ili poremećenom stanju. Izvodi se unutar dovoljno kratkog vremena tako da nije moguće dreniranje ili upijanje vode iz uzorka ili u uzorak. Na slici 29 prikazana je preša za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće.



Slika 29: Preša za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Oprema za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće

1. Preša, s mogućnošću kontrole brzine prirasta deformacije
2. Mjerilo pomaka, razlučivosti 0,01 mm

3. Mjerilo sile, tlačni prsten, različitih kapaciteta
4. Dvije ravne, glatke, krute ploče, debljine oko 20 mm
5. Štoperica
6. Vaga razlučivosti 0,1 g
7. Trimer uzoraka
8. Kalup za rezanje uzorka na potrebnu dužinu
9. Pribor za obradu uzorka, nož, pila sa žicom, pila
10. Mjerilo dimenzija uzorka, npr. pomično mjerilo

Pripremni radovi

Pod pripremnim radovima podrazumijeva se priprema uzorka za ispitivanje. Visina uzorka mora biti dva puta veća od promjera, a krajnje plohe okomite na os uzorka. Dimenzija najveće čestice tla ne smije biti veća od jedne petine promjera uzorka. Uzorak može biti neporemećeni iz jezgre, neporemećeni iz bloka ili poremećeni uzorak pripremljen uz određene uvjete (npr. standardni Proktor). Tip uzorka i način pripreme za poremećeni uzorak treba zabilježiti. Na slici 30 prikazana je priprema i obrada uzorka pripremljenog iz bloka.



Slika 30.: Priprema i obrada uzorka za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće iz bloka, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Iz metalnog ili plastičnog cilindra istisne se neporemećeni uzorak ili se uzme pripremljeni poremećeni uzorak. Odrezati dio 1 do 2 cm duži od predviđene dužine uzorka. Nožem se grubo obradi uzorak na traženi promjer, na trimeru se pomoću noža ili žice fino obradi do zadanog promjera kao što je prikazano na slici 31.



*Slika 31.: Obrada uzorka u trimeru,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*

Obradeni uzorak se postavi u metalni razdvojni kalup, te se poravnava, što je vidljivo na slici 32.



*Slika 32.: Poravnanje ploha uzorka pomoću kalupa i žice,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*

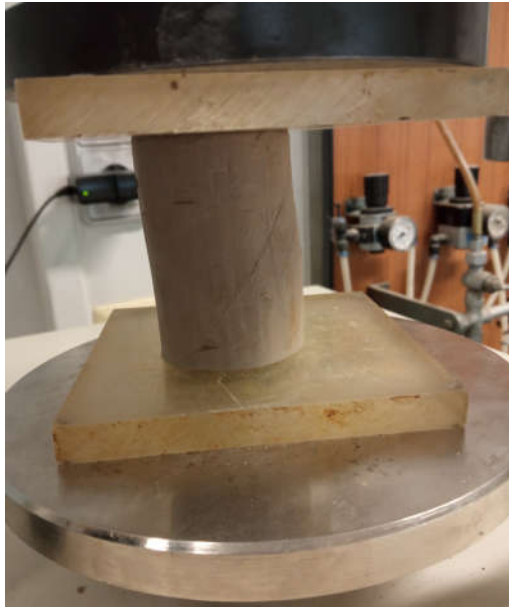
Izmjeri se promjer (d) i dužinu (l_0) uzorka pomoću pomičnog mjerila, te se izvaži masa uzorka (M_W) i upiše u obrazac za ispitivanja.

Provedba ispitivanja

Postaviti uzorak centralno na postolje preše između gornje i donje ploče. Namjestiti prešu tako da se ostvari tek lagani kontakt između uzorka, gornje ploče i mjerila sile. Zabilježiti početna očitavanja sile i vertikalne deformacije. Brzina prirasta vertikalne deformacije je za mekša tla najviše 2 %/min, a za čvrsta tla se kreće u granicama 0,5 %/min do 2 %/min. Očitava se promjena visine uzorka i promjena sile, tako da se do sloma prikupi približno 15 čitanja, a poslije sloma svakih novih 0,5 – 1 % deformacije. Kod vrlo plastičnih tala kod kojih osno naprezanje ne dosiže lako maksimalnu vrijednost, osna deformacija od 20 % smatra se kriterijem sloma. Na slikama 33 i 34 prikazano je ispitivanje uzorka, te prikaz klizne plohe uzorka nakon ispitivanja.



*Slika 33.: Ispitivanje uzorka u preši,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*



Slika 34.: Uzorak nakon ispitivanja sa vidljivom kliznom plohom, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Dva su kriterija kraja ispitivanja:

- postizanje maksimalne vrijednosti sile
- vertikalna deformacija je dostigla 20%.

Skicirati uzorak nakon ispitivanja, te ga osušiti u sušari na 110 °C. Izmjeriti masu suhog uzorka (M_D) i unijeti u obrazac za ispitivanja.

Izračunavanje

S ispitnog grafikona utvrditi točku koja predstavlja kriterij sloma kao onu pri kojoj je uzorak izložen maksimalnom tlačnom naprezanju, ili kao točku s 20%-om relativnom deformacijom ako se pojavljuje prva. Izračunati tlačno naprezanje u uzorku pri slomu, poznato kao jednoosna tlačna čvrstoća, q_u (kPa). Odrediti osnu deformaciju uzorka pri slomu i izračunati pripadnu relativnu deformaciju, vlažnost, volumnu i suhu gustoću uzorka.

Za svako mjerenje računa se:

- vertikalna deformacija uzorka:

$$\varepsilon_V = \frac{H}{H_i} 100\%$$

- vertikalno naprezanje:

$$\sigma_v = \frac{P}{100 \frac{A}{(100 \varepsilon_v)}} 100\%$$

gdje je:

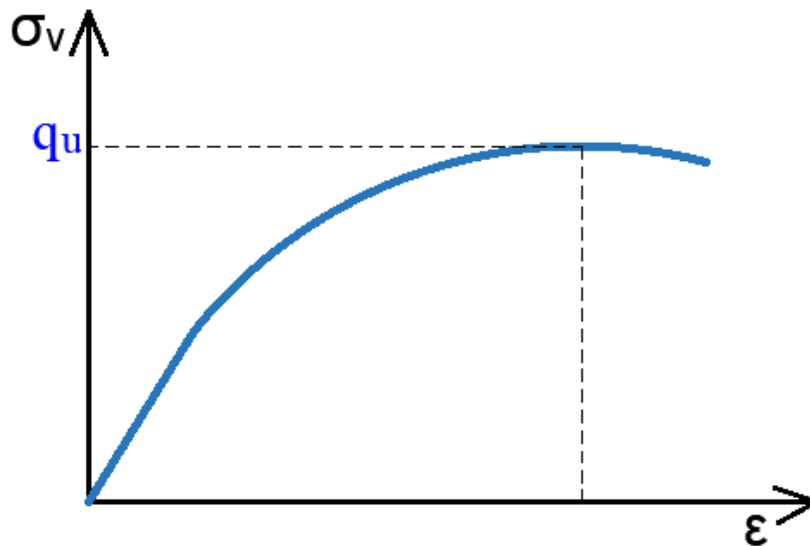
ε_v = vertikalna deformacija uzorka

H (mm) = $H_i - H$, promjena visine uzorka od početka do nekog mjerenja

d (mm) = promjer uzorka

A (mm²) = početna površina uzorka

Iz dijagrama $\sigma_v : \varepsilon$ na slici 35 se odredi najveće naprezanje – jednoosna tlačna čvrst. (q_u).



Slika 35.: Dijagram $\sigma_v : \varepsilon$

Ispitivanje nedrenirane čvrstoće u troosnom posmiku

bez mjerenja pornog tlaka

Određivanje nedrenirane posmične čvrstoće tla kod troosnog pokusa bez mjerenja pornog tlaka – UU metoda se provodi prema normi BS 1377:1990, dio 7, točka 8 [22]. Ispitivanje se provodi u troosnom uređaju na cilindričnim uzorcima. Na donjoj slici prikazan je sustav za troosna ispitivanja tla.



*Slika 36.: Sustav za troosno ispitivanje tla,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*

Tijekom pokusa uzorak se nalazi u nepropusnoj membrani između nepropusnih pločica u troosnoj ćeliji u kojoj se tlači vodom. Osno opterećenje se nanosi s konstantnim prirastom deformacije sve dok ne dođe do sloma uzorka, obično nakon 5 do 15 minuta. Ispitivanje se sastoji od 3 pokusa na ispitnim uzorcima oblikovanim iz istog ali većeg uzorka neporemećenog tla, svaki uz različiti ćelijski tlak.

Oprema za ispitivanje nedrenirane čvrstoće

1. Preša, s mogućnošću kontrole brzine prirasta deformacije
2. Troosna ćelija
3. Sustav za nanošenje i održavanje tlaka vode u troosnoj ćeliji (ćelijski tlak)
4. Mjerilo pomaka, razlučivosti 0,01 mm
5. Mjerilo sile, tlačni prsten, različitih kapaciteta



Slika 37.: Preša, troosna ćelija, prsten za mjerenje sile, mjerilo pomaka, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

6. Membrane za uzorak (od latexa), gumeni O - ringovi
7. Kalup za rastezanje i postavljanje membrane i O-ringa
8. Štoperica
9. Vaga razlučivosti 0,1 g
10. Trimer uzoraka
11. Kalup za rezanje uzorka na potrebnu dužinu
12. Pribor za obradu uzorka, nož, pila sa žicom, pila
13. Mjerilo dimenzija uzorka, npr. pomično mjerilo

Pripremni radovi

Pod pripremnim radovima podrazumijeva se priprema uzorka za ispitivanje koje su identične pripremnim radovima za jednoosnu tlačnu čvrstoću, te je postupak potrebno odraditi kao što je opisano u tom poglavlju. Kod troosnog ispitivanja je potrebno pripremiti po tri uzorka s obzirom da se pokus odrađuje na tri različita ćelijska tlaka. Na slici 38 prikazana je priprema i obrada uzorka za ispitivanje iz bloka.

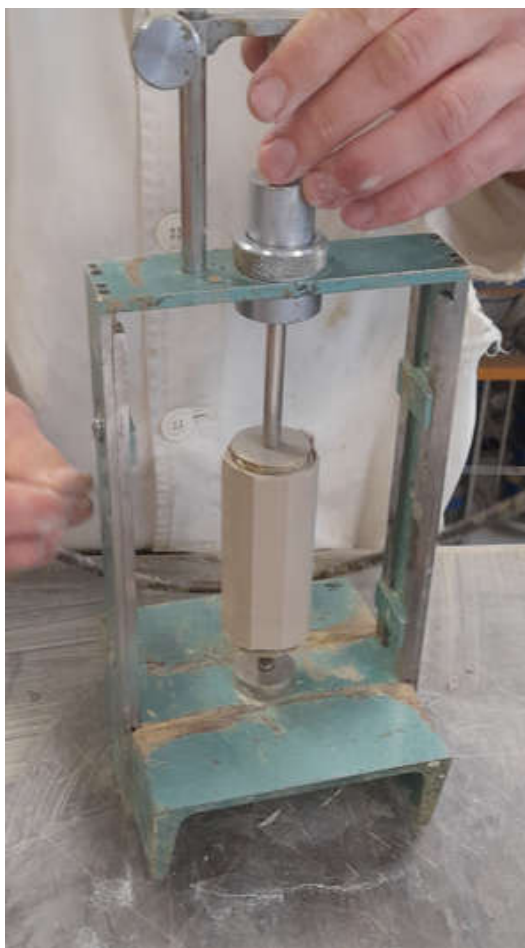


Slika 38.: Priprema i obrada uzorka za ispitivanje u troosnoj ćeliji, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Slike 39 i 40 prikazuju obradu uzorka pomoću žice, te obradu u trimeru pomoću kojeg dobijemo uzorak dimenzija cca 38 mm x 76 mm.



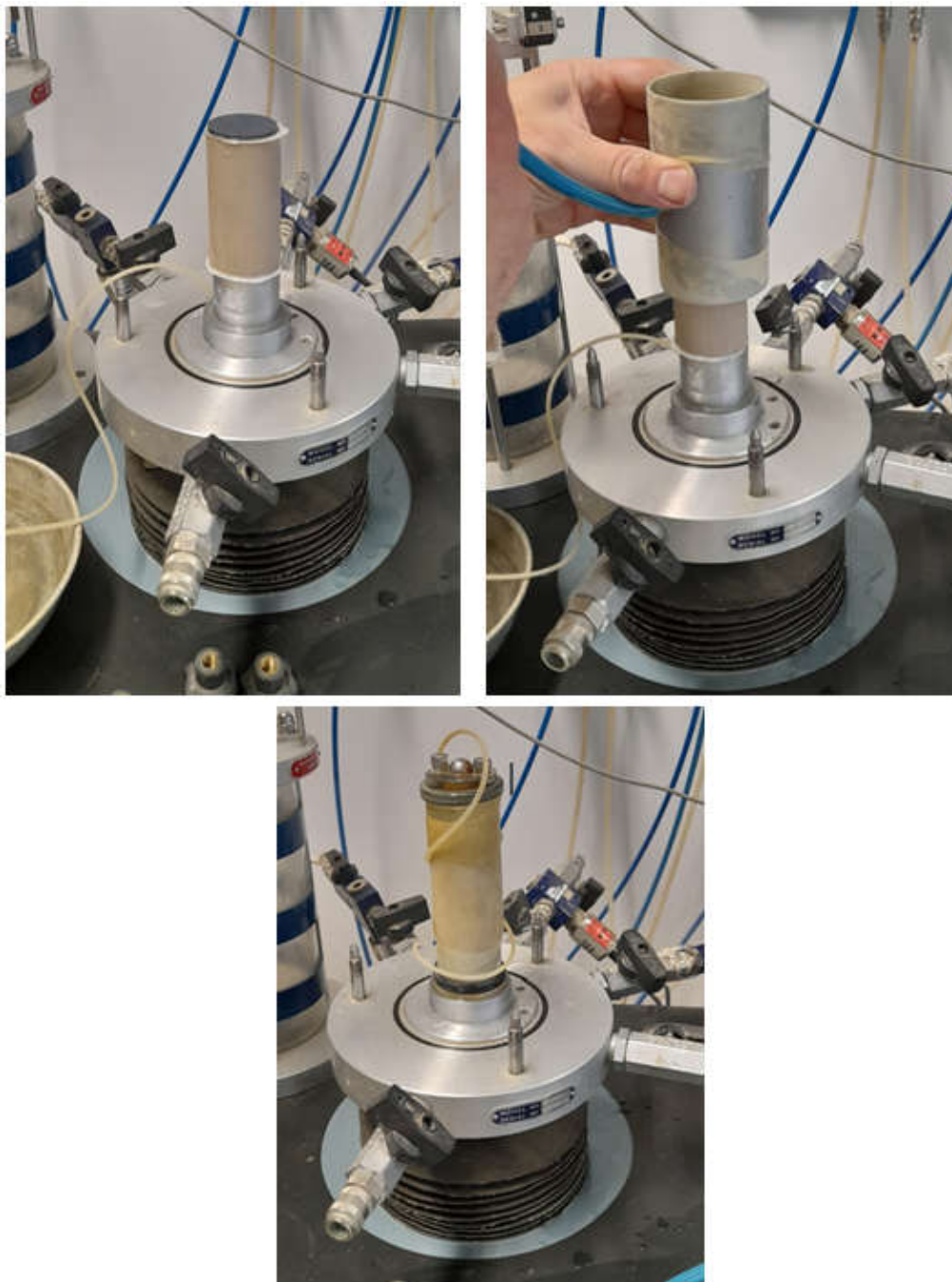
*Slika 39.: Obrada uzorka pomoću tanke žice,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*



*Slika 40.: Obrada uzorka u trimeru,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*

Ugradnja uzorka u troosnu ćeliju

Obrađeni uzorak se nakon mjerenja i vaganja ugrađuje u ćeliju na način da se sa gornje i donje strane uzorka stavi porozna pločica i filter papir, te se uzorak zaštiti sa membranom koja se gumenim prstenima pričvrsti za postolje i kapu na uzorku, a što je vidljivo na slici 41.



*Slika 41.: Postupak ugradnje uzorka u ćeliju,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*

Provedba ispitivanja

Pri ispitivanju treba raditi seriju pokusa na tri ćelijska tlaka, 100 kPa – 200 kPa – 400 kPa. U slučaju vrlo mekih uzoraka serija pokusa se radi na ćelijskim tlakovima 50 kPa – 100 kPa – 200 kPa. Preporuka za brzinu ispitivanja koja će zadovoljiti kriterij da lom nastane između 5 i 15 min je 0,76 mm/min. Kod tvrdih ili uslojenih uzoraka brzina je 0,3 mm/min.

Izračunavanje

Za svako mjerenje izračunava se vertikalna deformacija ε_v iz početne visine H_i i njezine promjene H , korigirana površina uzorka A_{cor} iz početne površine A_i i vertikalne deformacije ε_v i korigirano vertikalno naprezanje, tj. iz njega devijatorsko naprezanje. Izrazi za izračun su sljedeći:

$$\varepsilon_v = \frac{H}{H_i} 100\%$$

$$A_{cor} = \frac{A_i}{1 - \varepsilon_v}$$

Izračunati razliku glavnih naprezanja tj. devijator naprezanja ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kPa), za dovoljan broj nizova očitavanja kako bi se mogla odrediti maksimalna vrijednost, iz jednadžbe:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A_{cor}} 1000$$

Izvršiti korekciju izračunatog maksimalnog devijatora naprezanja zbog ograničavajućeg efekta membrane, ako je potrebno. Korekcija se može odrediti direktno iz dijagrama ili računski sukladno uputama iz norme.

Korekciju zbog membrane potrebno je oduzeti od izračunatog maksimalnog devijatora naprezanja $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ čime se dobije korigirani devijator naprezanja označen s $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$.

Izračunati vrijednost posmične čvrstoće / nedrenirane čvrstoće c_u (kPa) prema izrazu:

$$c_u = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)_f$$

Osim gore navedenog za svaki ispitni uzorak potrebno je navesti i izračunati sljedeće podatke:

- početne dimenzije uzorka;
- poremećeni ili neporemećeni uzorci te metoda pripreme uzoraka;
- početna vlažnost, gustoća i suha gustoća uzorka;
- dubina i orijentacija ispitnog uzorka unutar originalnog uzorka;
- prirast deformacije (% / min) primijenjen tijekom pokusa;
- debljina i vrsta membrane te izvršena korekcija;
- podatke o uzorku pri slomu svrstani tablično: tlak u ćeliji σ_3 ;
- korigirani maksimalni devijator naprezanja $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ pri slomu, zaokružen na najbliži cijeli broj;
- deformacija pri slomu (%);
- način sloma;
- vrijednost c_u zaokružena na najbliži cijeli broj.

4.3. Korelacije in-situ i laboratorijskih ispitivanja

Vrijednosti nedrenirane čvrstoće ovise o nekim bitnim faktorima kao što su postupak ispitivanja, oprema kojima se vrši ispitivanje, početno stanje naprezanja, rubni uvjeti, stupanj poremećenosti uzorka, te o teoretskim modelima koji se koriste za interpretaciju dobivenih rezultata. Stoga nedrenirana čvrstoća za neku lokaciju može biti značajno različita, ovisno o tome je li dobivena in-situ ili laboratorijskim pokusima. Pomoću parametara za koje je predložena korelacija s nedreniranom čvrstoćom, moguće je izvesti vrijednost nedrenirane čvrstoće glina kada se ona direktno ne ispituje [12].

Kao što je već ranije u radu pojašnjeno vrijednost nedrenirane čvrstoće ispitane u jednoosnom posmiku jednaka je upravo pola vrijednosti te čvrstoće:

$$c_u = \frac{q_u}{2}$$

Najčešće se koristi odnos normalizirane nedrenirane čvrstoće dobivene pokusom krilne sonde s_u^{FV} i indeksa plastičnosti I_p koji je predložio Skempton [17]:

$$\frac{s_u^{FV}}{\sigma'_{v0}} = 0,11 + 0,0037 I_p (\pm 20\%)$$

Prema Lunneu empirijska interpretacija nedrenirane čvrstoće iz rezultata CPTU-a može se grupirati u tri glavne kategorije [18]:

- procjena c_u primjenom 'totalnog' otpora šiljka

$$c_u = \frac{q_t \sigma_{v0}}{N_{kt}}$$

- procjena c_u primjenom 'efektivnog' otpora šiljka

$$c_u = \frac{q_t u_2}{N_{ke}}$$

- procjena c_u primjenom 'izlaznog' poreznog tlaka

$$c_u = \frac{u_2 u_0}{N_u}$$

Iz rezultata CPTU-a moguće je također procijeniti odnos OCR-a i nedrenirane čvrstoće tla prema Jamiolkowskom [19]:

$$\frac{c_u}{\sigma'_{v0}} = 0,23 OCR^{0,8}$$

Ispitivanjem pomoću dilatometra nedreniranu čvrstoću moguće je procijeniti prema sljedećem izrazu:

$$c_u = 0,22 \cdot \sigma'_{v0} \cdot (0,5 \cdot K_{DMT})^{1,25}$$

gdje je

σ'_{v0} – vertikalno naprezanje u tlu

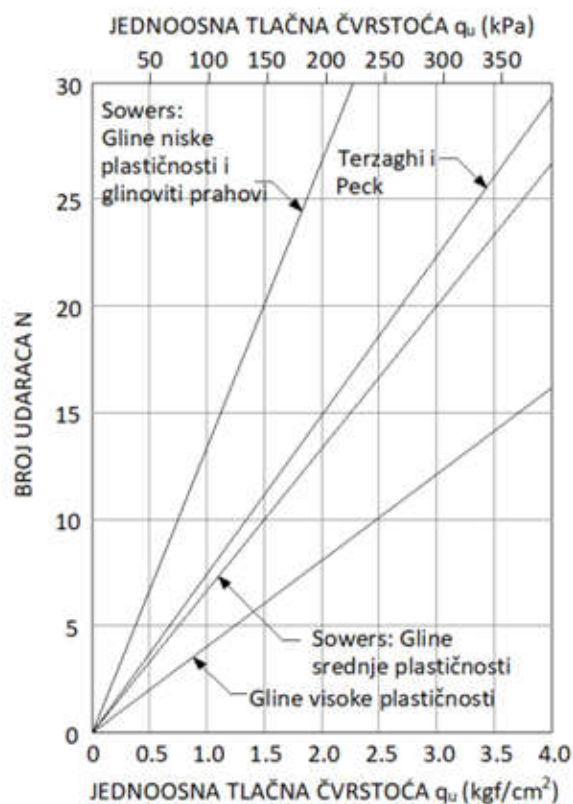
K_{DMT} – Indeks krutosti

Prema standardnom penetracijskom pokusu moguće je odrediti korelacije ovisno o broju udaraca prema tablici 1 u nastavku:

Tablica 1.: Korelacija broja udaraca dobivenih SPT-om sa nedreniranom čvrstoćom, jednoosnom tlačnom čvrstoćom i indeksom konzistensije

Konzistentno stanje		I _c (%)	Nedrenirana posmična čvrstoća c _u (kPa)	Jednoosna tlačna čvrstoća q _u (kPa)	SPT N
Opisno					
Plastično	Vrlo meko	0 do 0,25	0 do 12,5	0 do 25	0 do 2
	Meko	0,25 do 0,50	12,5 do 25	25 do 50	2 do 4
	Srednje	0,50 do 0,75	25 do 50	50 do 100	4 do 8
	Kruto	0,75 do 1,00	50 do 100	100 do 200	8 do 15
Polučvrsto		1,00 do $\frac{w_L - w_S}{I_p}$	100 do 200	200 do 400	15 do 30
Čvrsto		$\frac{w_L - w_S}{I_p}$ do $\frac{w_L}{I_p}$	> 200	> 400	> 30

Jedan od najčešće korištenih dijagrama za procjenu jednoosne čvrstoće na temelju SPT pokusa dan je na slici 42. Za njegovo korištenje potrebna je procjena plastičnosti tla.



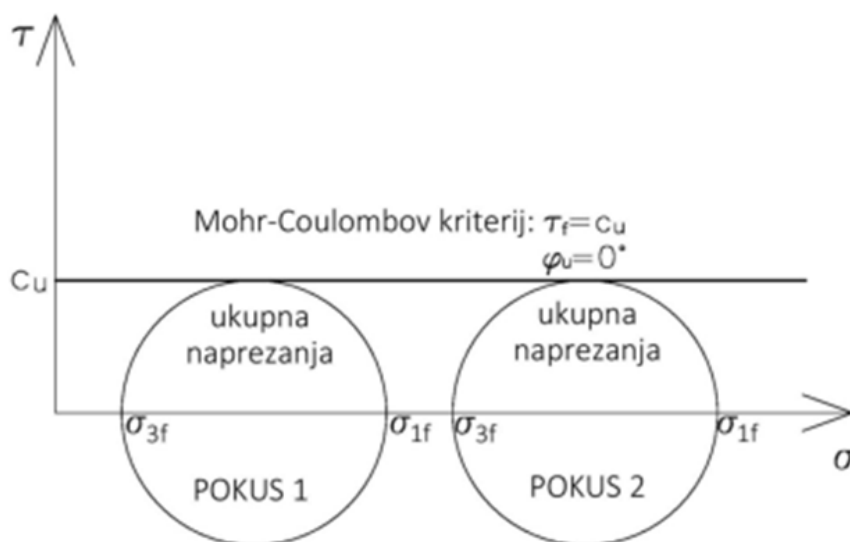
Slika 42.: Procjena jednoosne čvrstoće na temelju rezultata pokusa SPT (preuređeno prema NAVFAC 1982) [6]

5. OVISNOST NEDRENIRANE ČVRSTOĆE O OCR-U

Cilj usporednih ispitivanja je da se na homogenoj glini pokaže razlika rezultata nedreniranih čvrstoća određene jednoosnim posmikom, troosnim posmikom i laboratorijskom krilnom sondom, pri različitim stupnjevima prekonsolidacije i pri različitim naponskim stanjima. S različitim OCR-ovima će se pokušati simulirati različiti uvjeti na terenu budući da prilikom bušenja i vađenja neporemećenih uzoraka na samoj lokaciji dolazi do određenog poremećenja uzorka koji je izvađen sa određene dubine. Ovim ispitivanjima se želi u laboratorijskim uvjetima dovesti uzorak na njegovo geološko opterećenje, ali i na različite stupnjeve prekonsolidacije, te zatim na njima odraditi ispitivanja.

5.1. Teorijski prikaz određivanja nedrenirane čvrstoće

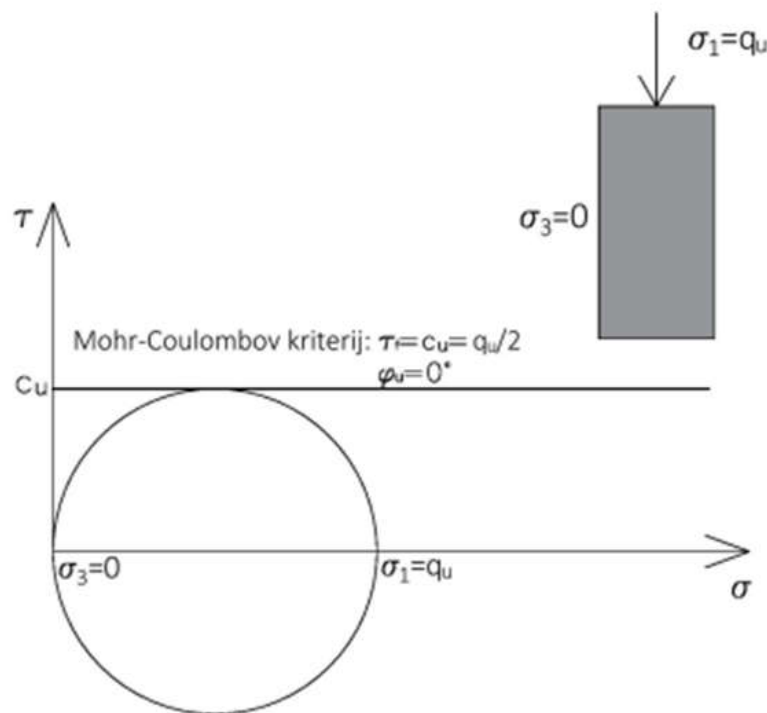
Gledajući Mohr-ove kružnice, nastale kao rezultat tipičnog nekonsolidiranog nedreniranog troosnog pokusa, koji se obično provodi na neporemećenim zasićenim uzorcima sitnozrnatih tala sve u cilju određivanja nedrenirane posmične čvrstoće (c_u), vidljivo je iz slike 43 da identični uzorci tla dostižu jednaku posmičnu čvrstoću pod različitim čelijskim tlakom [12].



Slika 43.: Prikaz Mohrove kružnice za identične uzorke ispitane u troosnom uređaju pri različitom čelijskom tlaku, preuzeto iz [12]

Nametanje većeg ćelijskog tlaka na uzorak tla ne rezultira s povećanjem njegove posmične čvrstoće. Kada se potpuno zasićeni uzorak sitnozrnog tla izloži dodatnom ćelijskom pritisku, generira se u uzorku jednaki dodatni porni tlak. Pod pretpostavkom da svi uzorci imaju jednak koeficijent pora i sastav, niz nekonsolidirano nedreniranih UU pokusa, svaki sa različitim ćelijskim tlakom, bi trebao stoga rezultirati u jednakim vrijednostima razlike glavnih napreznja pri slomu, te je to razlog 'horizontalnog' kriterija sloma ($\varphi_u = 0$) koji siječe vertikalnu os u $\tau = c_u$, gdje c_u predstavlja nedreniranu posmičnu čvrstoću tla i jednaka je polumjeru Mohr-ove kružnice ukupnih napreznja [12].

Na slici 44 je prikazan rezultat pokusa jednoosnog tlaka kao posebnog slučaja nekonsolidiranog nedreniranog (UU) pokusa. U ovom slučaju ne postoji ćelijski tlak koji se nameće na uzorak ($\sigma_3=0$) [12].



Slika 44.: Prikaz Mohrove kružnice za uzorak ispitan pokusom jednoosne tlačne čvrstoće, preuzeto iz [12]

5.2. Program ispitivanja i postupak ugradnje uzoraka

Odabrana je homogena glina, prikazana na slici 45, a koja je pripremana u troosnoj ćeliji konsolidacijom za postizanje željenih stupnjeva prekonsolidacije ($OCR=1$, $OCR=3$ i $OCR=6$).



Slika 45.: Uzorak homogene gline korišten za potrebe ispitivanja, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Prilikom razrade programa usvojene su sljedeće pretpostavke:

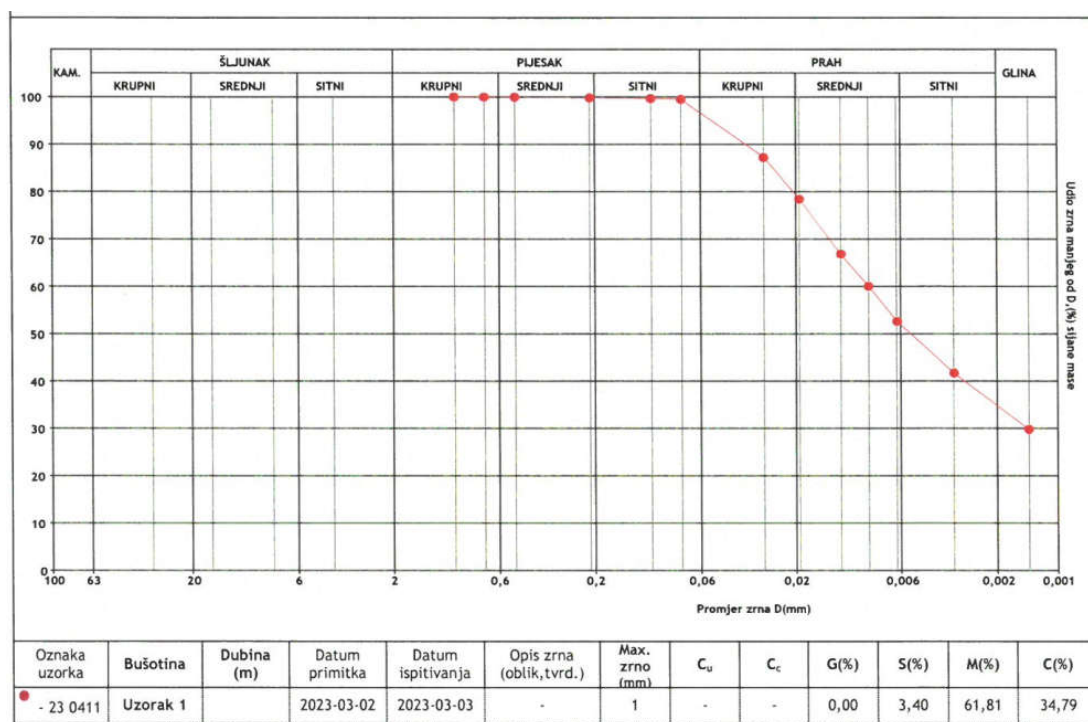
1. Smatra se da je glina sa dubine cca 5m, potopljena, te da je normalno konsolidirana ($OCR=1$).
2. Promjenom konsolidacije pri različitim naprežanjima dovesti glinu do stupnja prekonsolidacije $OCR=3$ i $OCR=6$.
3. Za svaki pokus i OCR provesti 3 ispitivanja
4. Prekonsolidaciju obaviti u troosnoj ćeliji za sva ispitivanja

Ispitivanja su provedena u geotehničkom laboratoriju Instituta IGH u Zagrebu, te je ispitivanje odradilo osoblje osposobljeno za tu vrstu ispitivanja.

Za ispitivanje se koristio uzorak talijanske lončarske gline kupljene u prodavaonici za izradu glinenog posuđa. U nastavku su rezultati određivanja Atterbergovih granica plastičnosti i granulometrijskog sastava tla iz kojeg je vidljivo da se radi o glini niske plastičnosti sa pretežitim udjelom praha od cca 60%.

Oznaka uzorka	Opis uzorka						Granica tečenja (%)	Granica plastičnosti (%)	Indeks plastičnosti (%)
	Bušotina	Dubina (m)	Datum primitka	Datum ispitivanja	Priprema uzorka	Prolaz kroz sito 0.425			
23 0411	Uzorak 1		2023-03-02	2023-03-16	prirodno vlažan	100%	33,42	16,76	16,66

Slika 46.: Rezultati određivanja Atterbergovih granica plastičnosti materijala za ispitivanje, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)



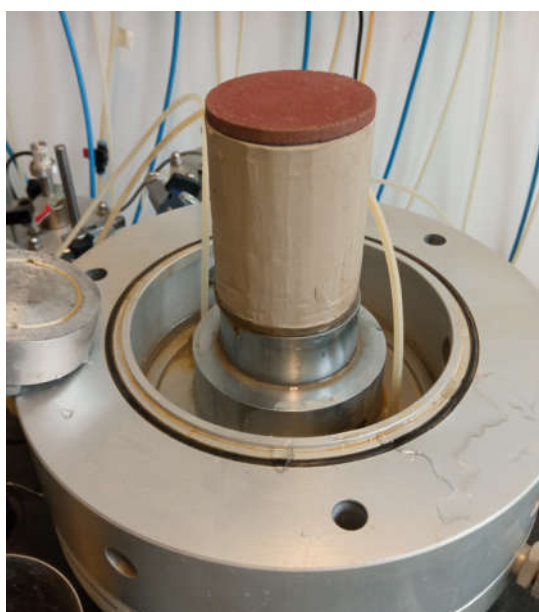
Slika 47.: Rezultati određivanja granulometrijskog sastava materijala za ispitivanje, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Način pripreme uzorka za laboratorijsku krilnu sondu



*Slika 48.: Obrada uzorka za laboratorijsku krilnu sondu,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*

Iz bloka homogene gline obraditi uzorak pomoću trimera na dimenzije cca 50mm x 100mm, kao što je prikazano na slici 48, te ga pažljivo ugraditi u troosnu ćeliju na način da se na dnu i vrhu uzorka postavi porozna pločica i filter papir, te se uzorak zatim zaštiti membranom i O-ringovima. Na slikama 49 do 51 je prikazan postupak ugradnje uzorka u troosnu ćeliju po fazama.



*Slika 49.: Ugradnja uzorka u troosnu ćeliju,
(fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)*



Slika 50.: Postavljanje membrane, O-ringova i gornje kape na uzorak, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)



Slika 51.: Troosna ćelija korištena za pripremu uzorka za laboratorijsku krilnu sondu, (fotografirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Nakon što se ćelija napuni vodom, kreće se u postupak saturacije tako da se na uzorak aplicira ćelijski tlak od 320 kPa, a u uzorak se aplicira povratni tlak od 300 kPa. Pojam povratnog tlaka podrazumijeva da pomoću drenažnog izlaza / ulaza na kapi uzorka otapamo sav zaostali zrak u uzroku čime se osigurava potpuna zasićenost uzorka, te se sprječavaju negativni nadpritisci i utjecaj šupljina kod uzorka koji ima tendenciju širenja prilikom smicanja. Nakon približno 24h se mjeri zasićenost uzorka na način da se podigne ćelijski tlak za malu vrijednost, te se nakon nekog vremena mjeri porast pornog tlak. Računamo parametar B (Skemptonov parametar) kao $B = u / \sigma_3$, a koji bi trebao biti minimalno 95%. Nakon što se postigne traženi parametar B, kreće se na sljedeću fazu ispitivanja – konsolidaciju.

Način pripreme uzorka za jednoosnu tlačnu čvrstoća (JT) i troosni posmik (UU pokus)

Iz bloka homogene gline obraditi uzorak dimenzija cca 38mm x 76mm, izvagati masu uzorka prije ugradnje, te ga pažljivo ugraditi u troosnu ćeliju na način da se na dnu i vrhu uzorka postavi porozna pločica i filter papir, te se uzorak zatim zaštititi membranom i O-ringovima. Nakon što se ćelija napuni vodom, kreće se u postupak saturacije tako da se na uzorak aplicira ćelijski tlak od 320 kPa, a u uzorak se aplicira povratni tlak od 300 kPa. Nakon približno 24h se mjeri zasićenost uzorka na način da se podigne ćelijski tlak za malu vrijednost , te se nakon nekog vremena mjeri porast pornog tlak. Računamo parametar B (Skemptonov parametar) kao $B = u / \sigma_3$, a koji bi trebao biti minimalno 95%. Nakon što se postigne traženi parametar B, kreće se na sljedeću fazu ispitivanja – konsolidaciju.

Postupak konsolidacije

Konsolidacija se za sve tri vrste ispitivanja (jednoosni posmik, troosni posmik, krilna sonda) odrađuju identično, te je razlika samo u završnoj fazi ispitivanja (smicanje).

Prema definiranom programu ispitivanja odrađeno je pet slučajeva ispitivanja:

1. slučaj – Konsolidirati 3 uzorka pri efektivnom naprezanju 50 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 350$ kPa) → **OCR = 1**.

2. slučaj – Konsolidirati 3 uzorka pri efektivnom ćelijskom tlaku 50 kPa, (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 350$ kPa). Zatim se konsolidiraju uzorci na efektivno naprezanje 150 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 450$ kPa), da bi se nakon toga odradila i rekonsolidacija na 50 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 350$ kPa) → **OCR = 3**.

3. slučaj – Konsolidirati 3 uzorka pri efektivnom ćelijskom tlaku 50 kPa, (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 350$ kPa). Zatim se konsolidiraju uzorci na efektivno naprezanje 300 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 600$ kPa), da bi se nakon toga odradila i rekonsolidacija na 50 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 350$ kPa) → **OCR = 6**.

U sklopu ovog diplomskog rada odrađeni su i slučajevi ispitivanja u troosnom posmiku sa povratnom konsolidacijom:

1. slučaj – Konsolidirati 3 uzorka pri efektivnom ćelijskom tlaku 50 kPa, (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 350$ kPa). Zatim se konsolidiraju uzorci na efektivno naprezanje 150 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 450$ kPa), pa konsolidacija na 50 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 350$ kPa). Zatim otpustiti ćelijski i povratni tlak na nulu cca 4h kako bi se simulirali uvjeti prilikom vađenja uzorka na terenu i istiskivanja iz neporemećenog cilindra, ponovno konsolidirati uzorke na efektivno naprezanje 150 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 450$ kPa). Nakon završetka konsolidacije potrebno je spustiti ćelijski tlak na nulu, te odraditi UU ispitivanje pri ćelijskom tlaku 100 kPa, 200 kPa i 400 kPa. Nakon završetka ispitivanja pažljivo izgraditi uzorak iz ćelije, te ga izvagati.

2. slučaj – Konsolidirati 3 uzorka pri efektivnom ćelijskom tlaku 50 kPa, (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 350$ kPa). Zatim se konsolidiraju uzorci na efektivno naprezanje 300 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 600$ kPa), pa konsolidacija na 50 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 350$ kPa). Zatim otpustiti ćelijski i povratni tlak na nulu cca 4h kako bi se simulirali uvjeti prilikom vađenja uzorka na terenu i istiskivanja iz NU cilindra, ponovno konsolidirati uzorke na efektivno naprezanje 300 kPa (povratni tlak $u_0 = 300$ kPa, ćelijski tlak $\sigma_3 = 600$ kPa). Nakon završetka konsolidacije potrebno je spustiti ćelijski tlak na nulu, te odraditi UU ispitivanje pri ćelijskom tlaku 100 kPa, 200 kPa i 400 kPa. Nakon završetka ispitivanja pažljivo izgraditi uzorak iz ćelije, te ga izvagati.

Proces konsolidacije je završen tek kad se promjena volumena stabilizira, te dok se porni tlak u uzorku izjednači sa povratnim tlakom. Ukoliko su zadovoljena oba ova uvjeta kreće se i na posljednju fazu ispitivanja – smicanje.

Postupak smicanja

Jednoosna tlačna čvrstoća – izgradnja uzorka iz ćelije, vaganje i mjerenje dimenzije uzorka nakon konsolidacije, postavljanje uzorka u prešu, te odrađivanje ispitivanja brzinom od 0,76 mm/min. Nakon završetka ispitivanja uzorak je potrebno osušiti na 110°C.

Nedrenirana posmična čvrstoća kod troosnog pokusa – otpuštanje tlakova na nulu, opteretiti uzorka sa ćelijskim lakovima od 100 kPa, 200 kPa i 400 kPa, nuliranje mjerila sile i mjerila pomaka, te smicanje brzinom od 0,76 mm/min. Nakon završetka ispitivanja uzorak je potrebno izgraditi iz ćelije, te ga osušiti na 110°C.

Laboratorijska krilna sonda – izgradnja uzorka iz ćelije, postavljanje uzorka na postolje od laboratorijske krilne sonde, utiskivanje krilca u pripremljeni uzorak, te odrađivanje ispitivanja.

5.3. Rezultati ispitivanja

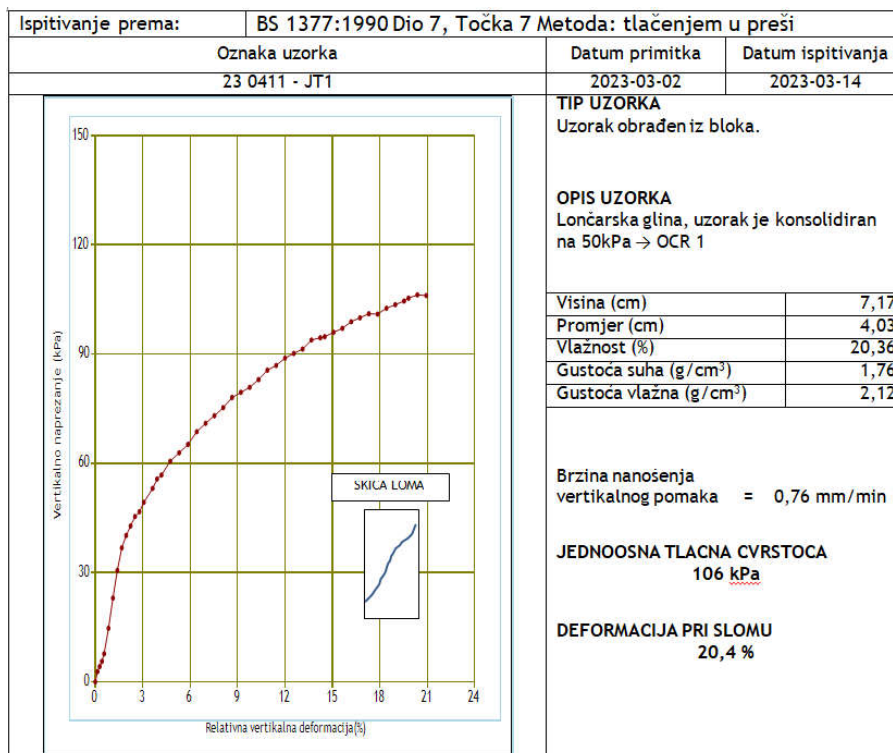
Rezultati ispitivanja su prikazani tablično i u obliku izvještaja o ispitivanju.

Jednoosna tlačna čvrstoća

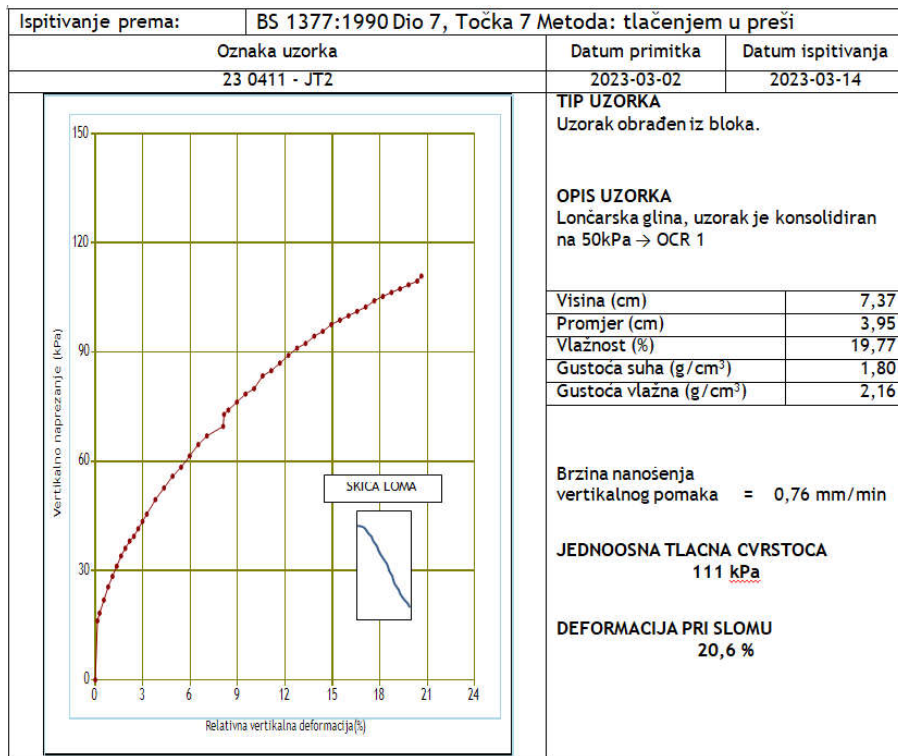
U tablicama 2 do 4 prikazani su rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće za različite OCR-ove, dok su na slikama 52 do 60 prikazani izvještaji o ispitivanju.

Tablica 2.: Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće za OCR=1

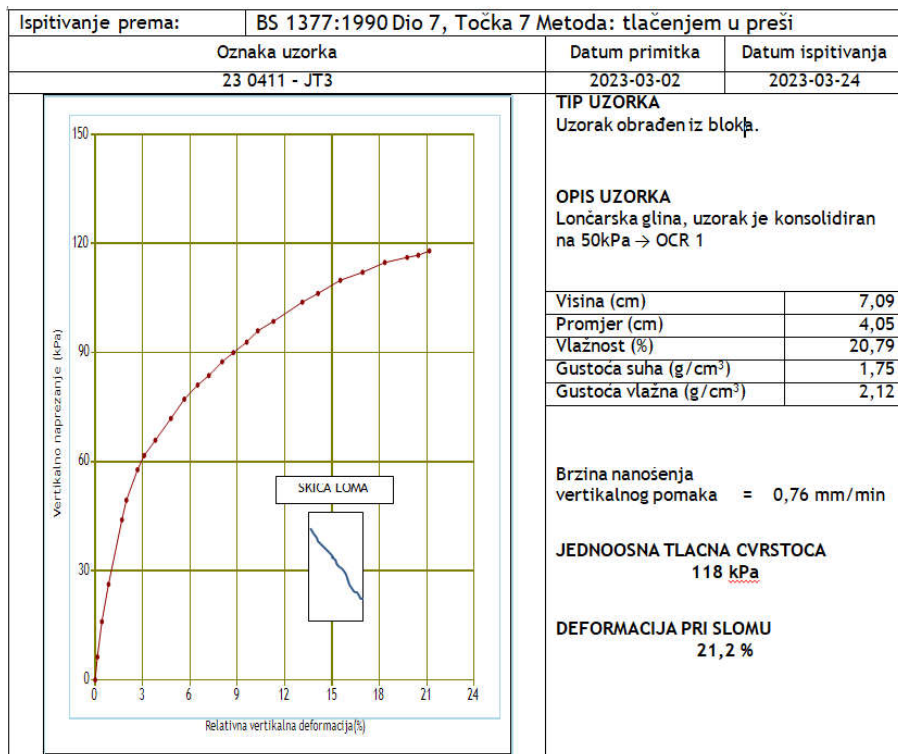
OCR=1	230411-JT1	230411-JT2	230411-JT3
Visina (cm)	7,17	7,37	7,09
Promjer (cm)	4,03	3,95	4,05
Vlažnost (%)	20,36	19,77	20,79
Gustoća suha (g/cm ³)	1,76	1,8	1,75
Gustoća vlažna (g/cm ³)	2,12	2,16	2,12
Deformacija pri slomu (%)	20,4	20,6	21,2
Jednoosna tlačna čvrstoća (kPa)	106	111	118



Slika 52.: Izvještaj o ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



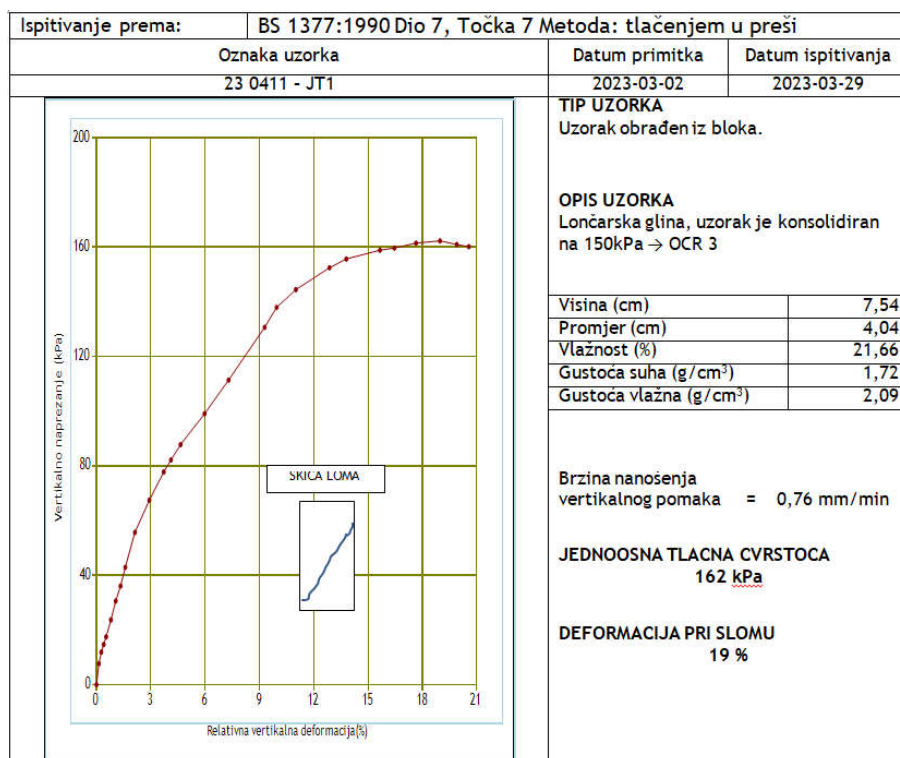
Slika 53.: Izvještaj o ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



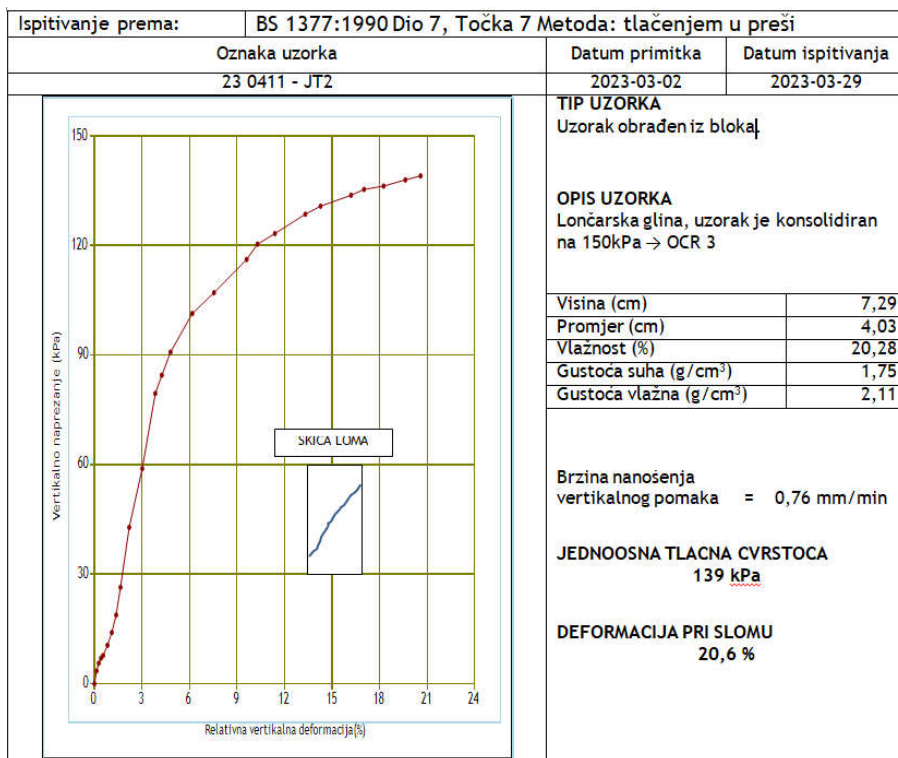
Slika 54.: Izvještaj o ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Tablica 3.: Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće za OCR=3

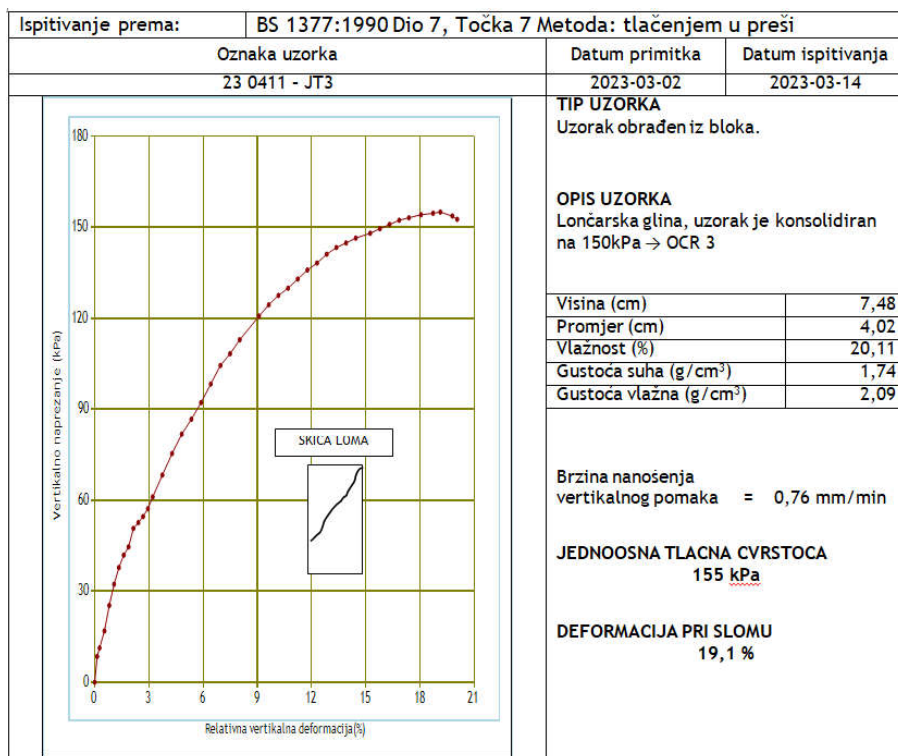
OCR=3	230411-JT1	230411-JT2	230411-JT3
Visina (cm)	7,54	7,29	7,48
Promjer (cm)	4,04	4,03	4,02
Vlažnost (%)	21,66	20,28	20,11
Gustoća suha (g/cm ³)	1,72	1,75	1,74
Gustoća vlažna (g/cm ³)	2,09	2,11	2,09
Deformacija pri slomu (%)	19	20,6	19,1
Jednoosna tlačna čvrstoća (kPa)	162	139	155



Slika 55.: Izvještaj o ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



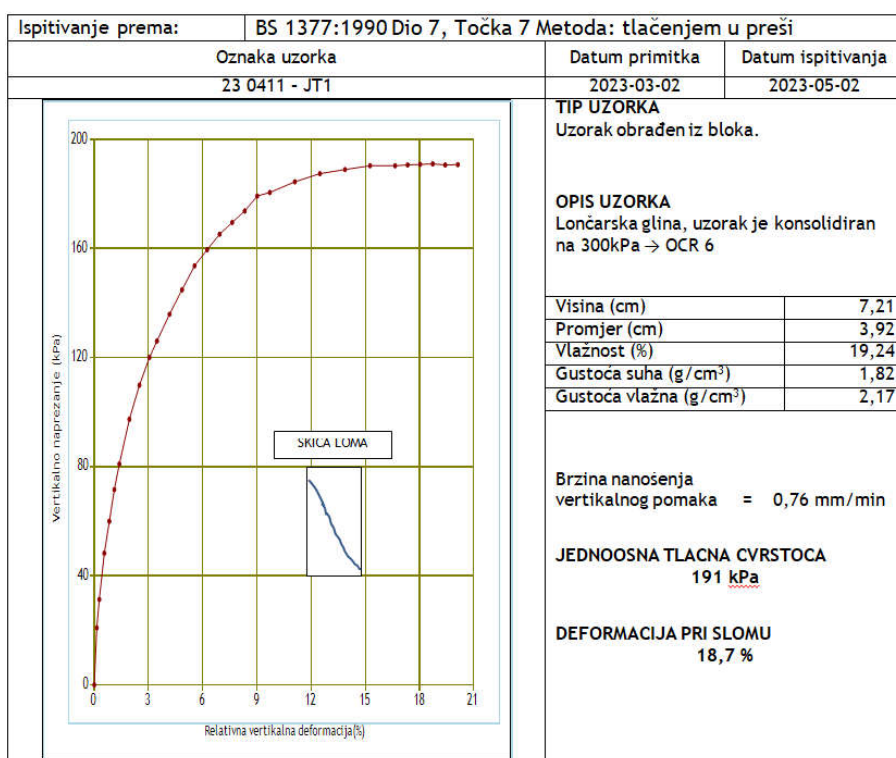
Slika 56.: Izvještaj o ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



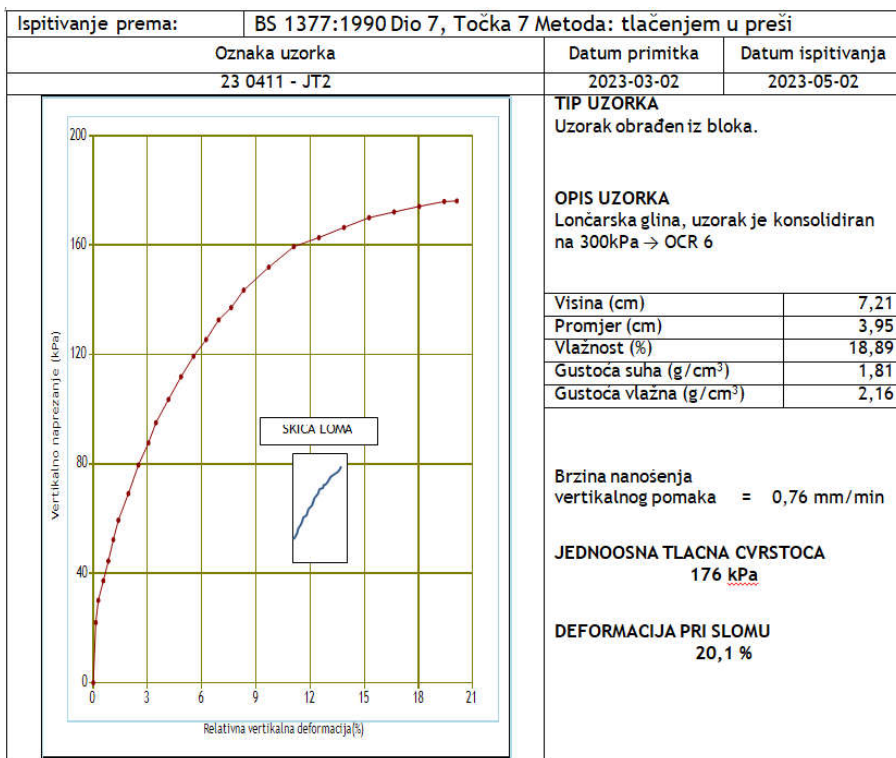
Slika 57.: Izvještaj o ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Tablica 4.: Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće za OCR=6

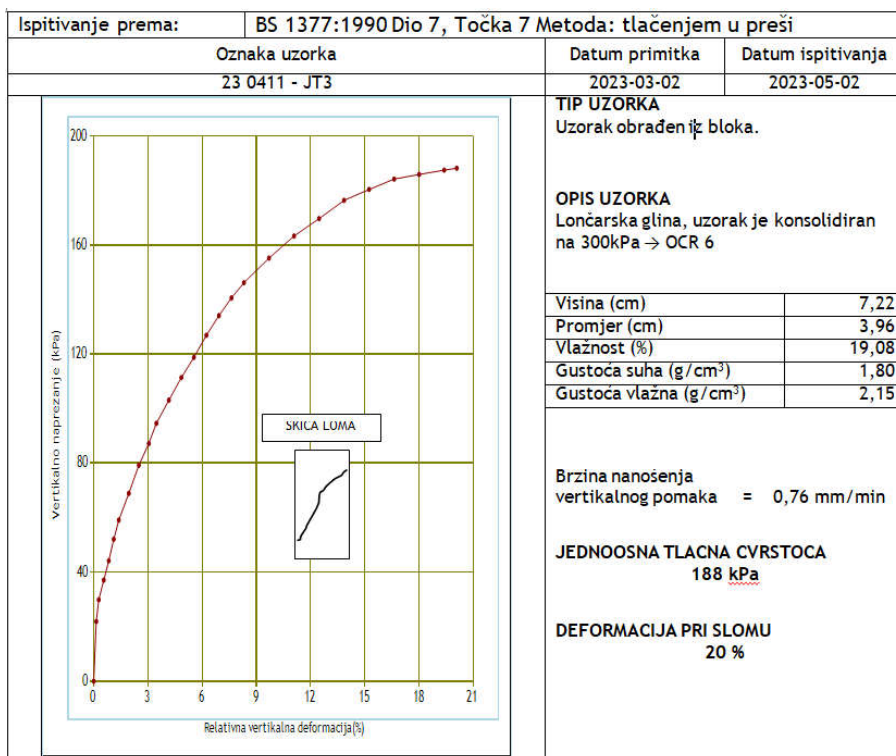
OCR=6	230411-JT1	230411-JT2	230411-JT3
Visina (cm)	7,21	7,21	7,22
Promjer (cm)	3,92	3,95	3,96
Vlažnost (%)	19,24	18,89	19,06
Gustoća suha (g/cm ³)	1,82	1,81	1,8
Gustoća vlažna (g/cm ³)	2,17	2,16	2,15
Deformacija pri slomu (%)	18,7	20,1	20
Jednoosna tlačna čvrstoća (kPa)	191	176	188



Slika 58.: Izvještaj o ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



Slika 59.: Izvještaj o ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



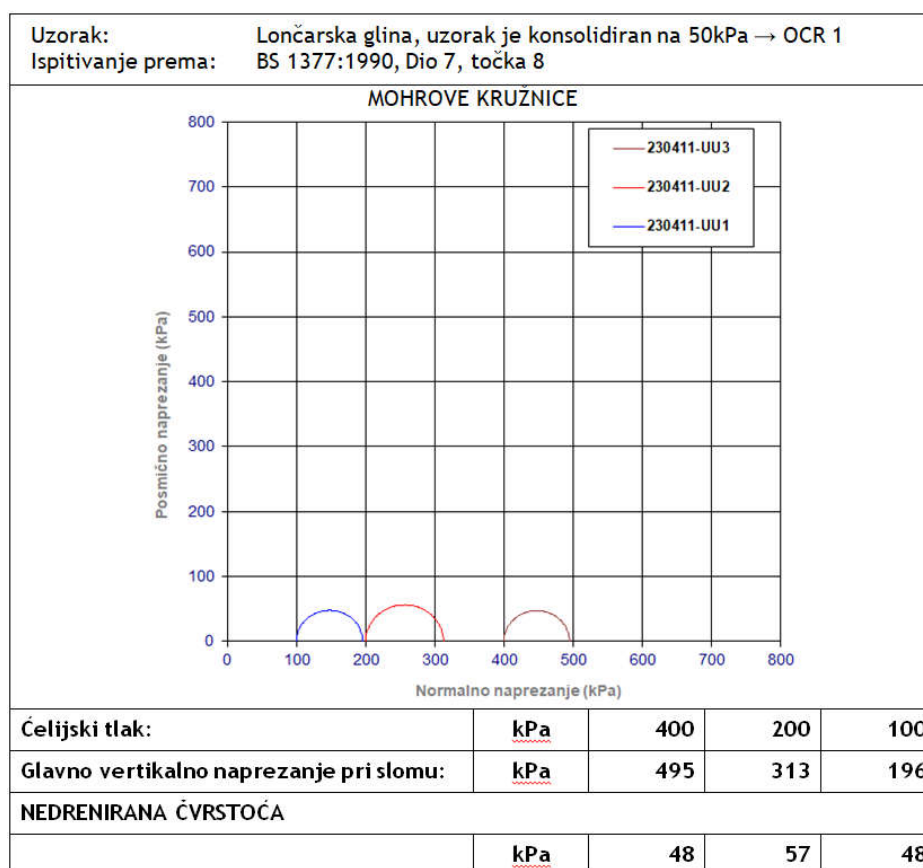
Slika 60.: Izvještaj o ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Troosni posmik

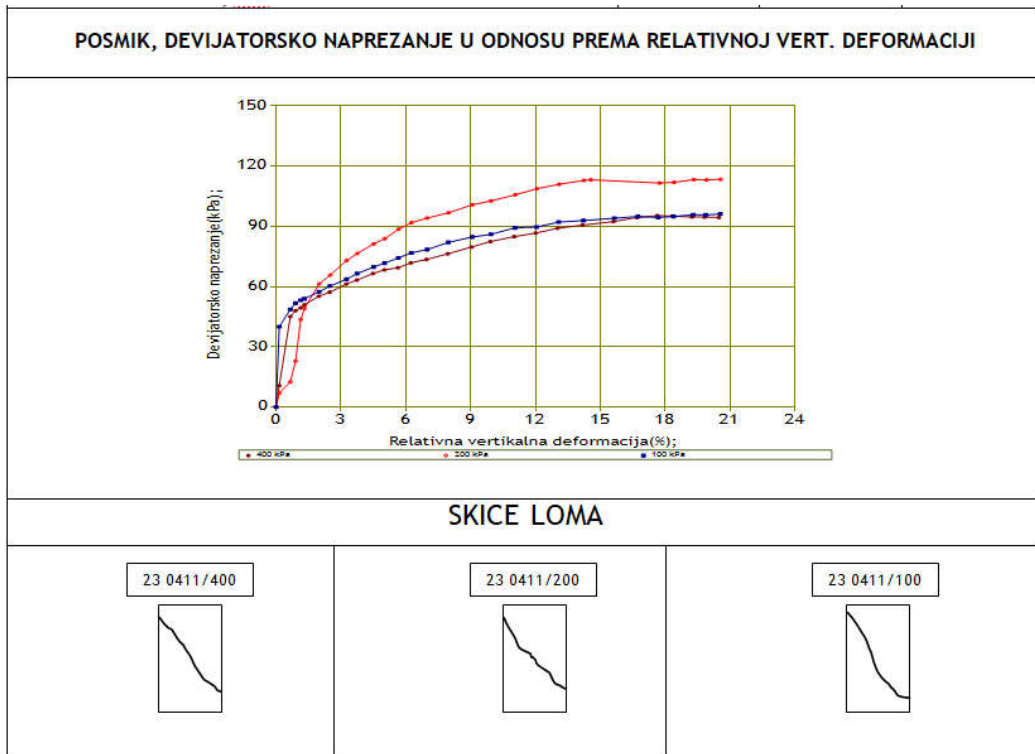
U tablicama 5 do 7 prikazani su rezultati ispitivanja u troosnom posmiku za različite OCR-ove, dok su na slikama 61 do 66 prikazani izvještaji o ispitivanju.

Tablica 5.: Rezultati ispitivanja u troosnom posmiku za OCR=1

OCR=1	230411-UU1	230411-UU2	230411-UU3
Visina (cm)	7,57	7,54	7,54
Promjer (cm)	4,02	3,97	3,97
Vlažnost (%)	21,6	21,61	21,8
Gustoća vlažna (g/cm ³)	2,11	2,15	2,09
Gustoća suha (g/cm ³)	1,74	1,76	1,72
Deformacija pri slomu (%)	17,6	20,6	20,6
Nedrenirana čvrstoća (kPa)	48	57	48



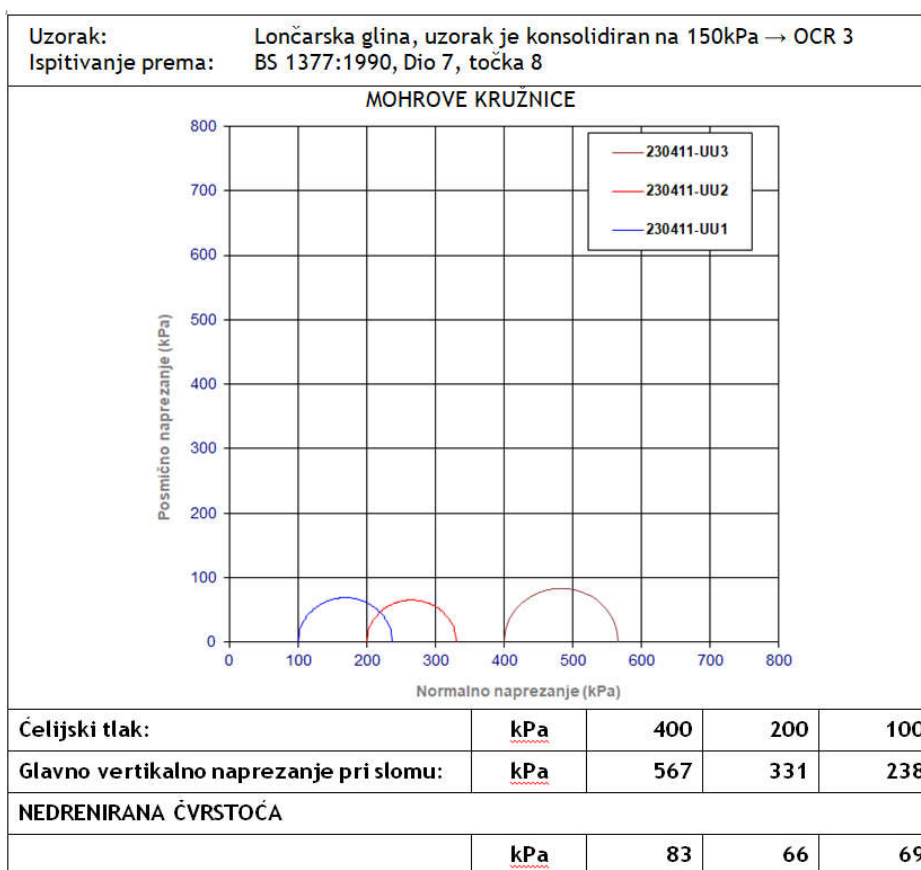
Slika 61.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



*Slika 62.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku,
(skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)*

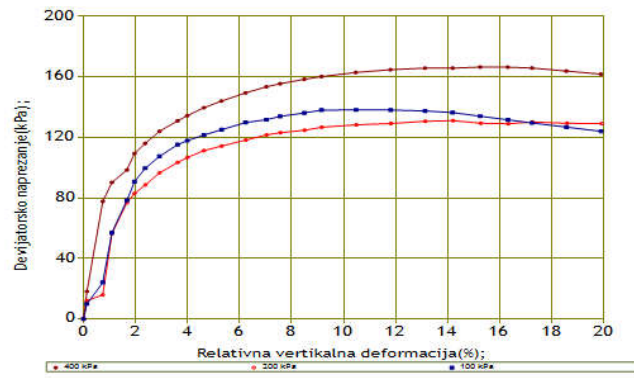
Tablica 6.: Rezultati ispitivanja u troosnom posmiku za OCR=3

OCR=3	230411-UU1	230411-UU2	230411-UU3
Visina (cm)	7,54	7,53	7,54
Promjer (cm)	3,96	4,02	4
Vlažnost (%)	22,26	21,94	21,63
Gustoća vlažna (g/cm ³)	2,13	2,11	2,11
Gustoća suha (g/cm ³)	1,74	1,73	1,74
Deformacija pri slomu (%)	15,2	14,2	10,5
Nedrenirana čvrstoća (kPa)	83	66	69



Slika 63.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku,
 (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

POSMIK, DEVIJATORSKO NAPREZANJE U ODNOSU PREMA RELATIVNOJ VERT. DEFORMACIJI



SKICE LOMA

23 0411/400



23 0411/200



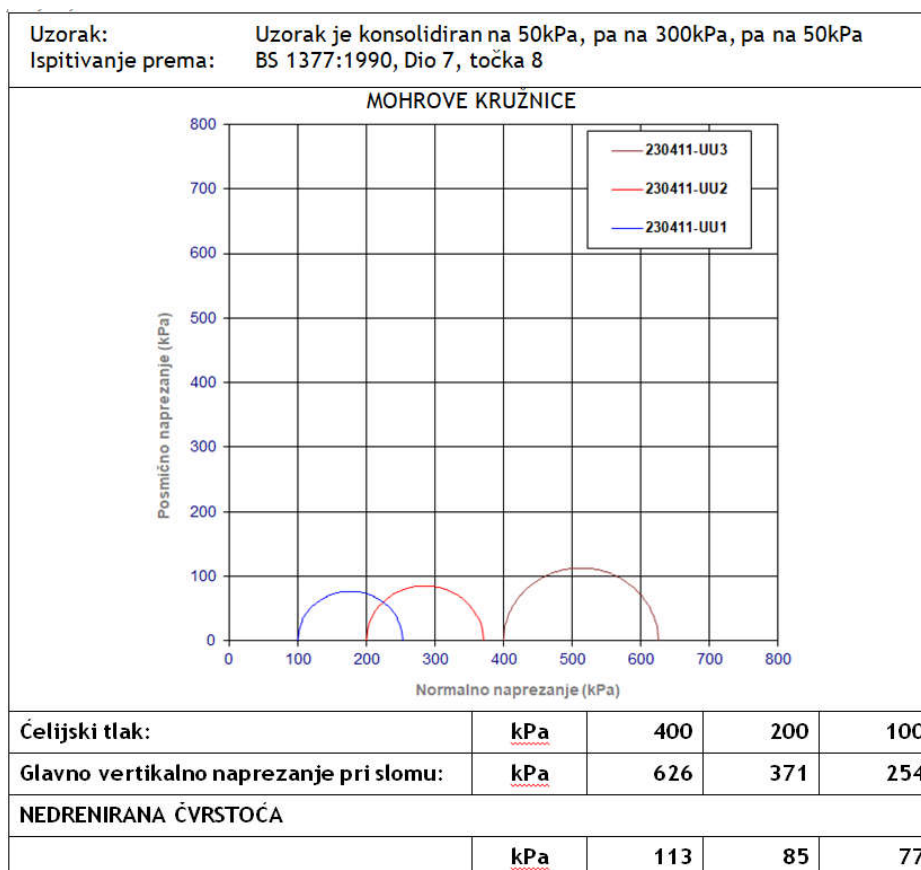
23 0411/100



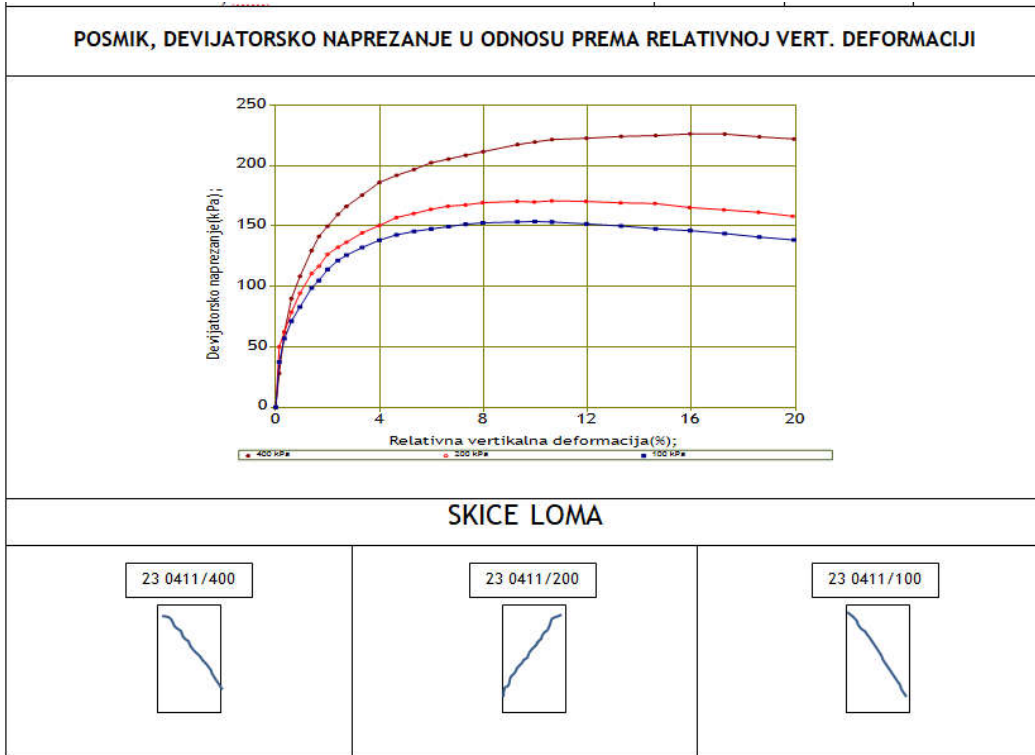
Slika 64.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku,
(skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Tablica 7.: Rezultati ispitivanja u troosnom posmiku za OCR=6

OCR=6	230411-UU1	230411-UU2	230411-UU3
Visina (cm)	7,52	7,54	7,52
Promjer (cm)	3,94	3,97	3,96
Vlažnost (%)	22,31	21,58	21,8
Gustoća vlažna (g/cm ³)	2,15	2,12	2,13
Gustoća suha (g/cm ³)	1,75	1,75	1,75
Deformacija pri slomu (%)	16	10,6	10
Nedrenirana čvrstoća (kPa)	113	85	77



Slika 65.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



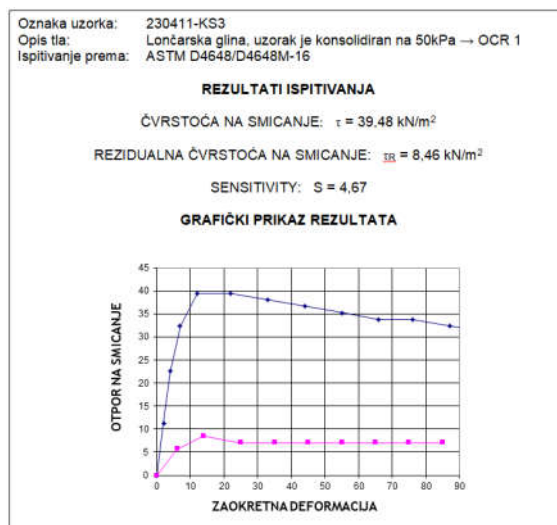
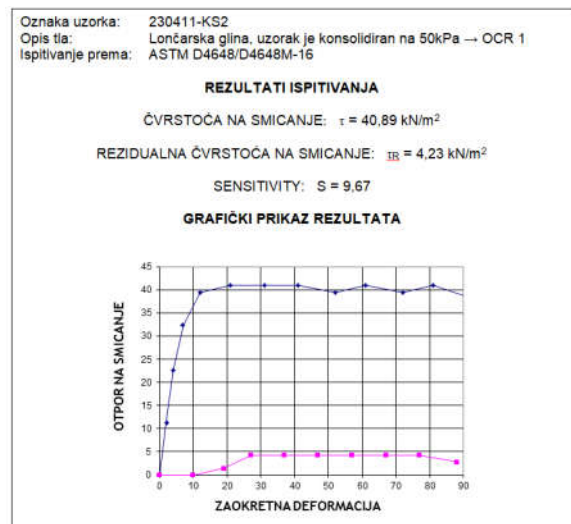
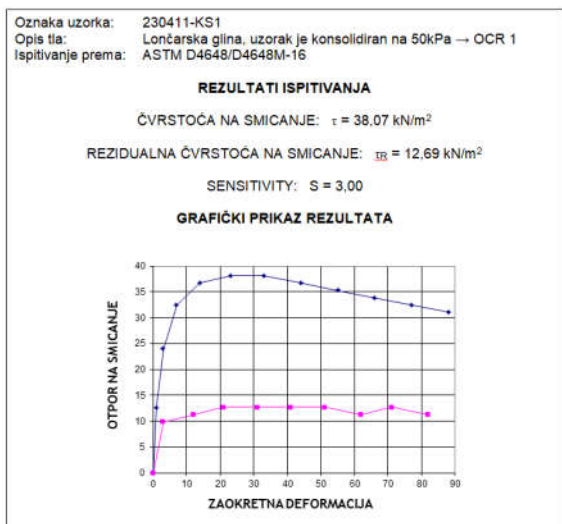
*Slika 66.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku,
(skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)*

Laboratorijska krilna sonda

U tablicama 8 do 10 prikazani su rezultati ispitivanja laboratorijskom krilnom sondom za različite OCR-ove, dok su na slikama 67 do 69 prikazani izvještaji o ispitivanju.

Tablica 8.: Rezultati ispitivanja laboratorijskom krilnom sondom za OCR=1

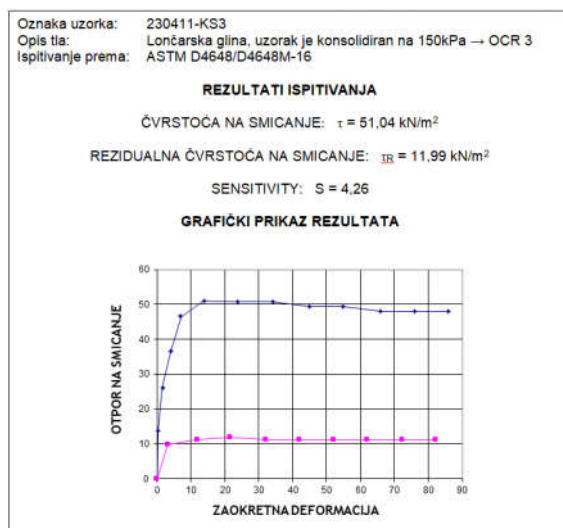
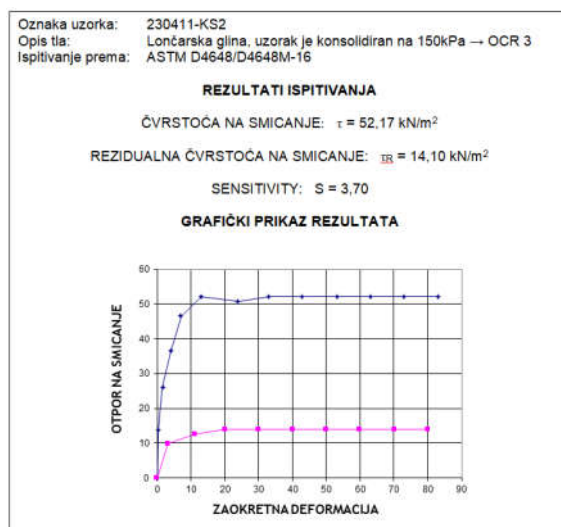
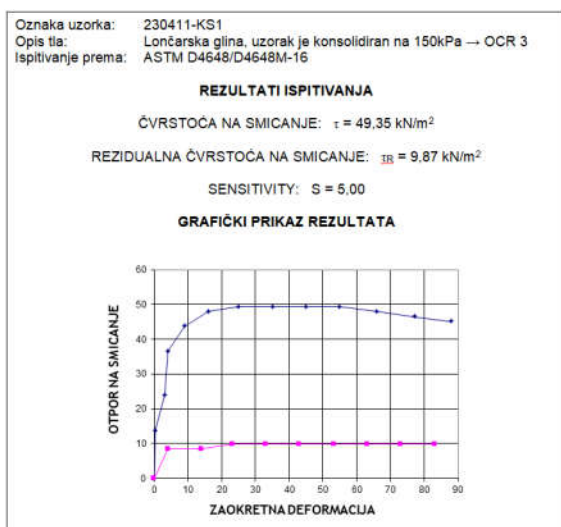
OCR=1	230411-KS1	230411-KS2	230411-KS3
Vršna čvrstoća τ (kPa)	38,07	40,89	39,48
Rezidualna čvrstoća (kPa)	12,69	4,23	8,46
Osjetljivost	3,00	9,67	4,67



Slika 67.: Izvještaji o ispitivanju u laboratorijskom krilnom sondom, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Tablica 9.: Rezultati ispitivanja laboratorijskom krilnom sondom za OCR=3

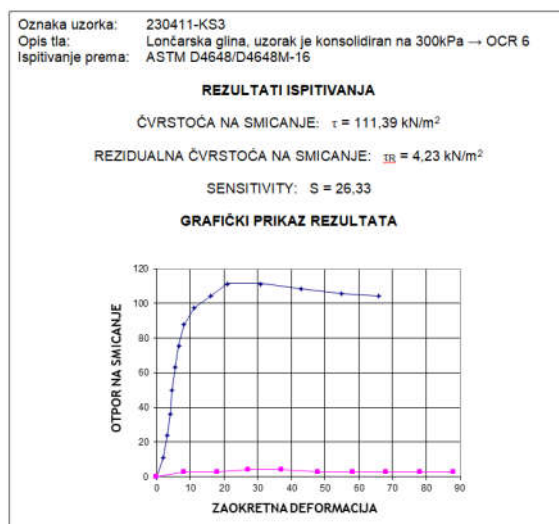
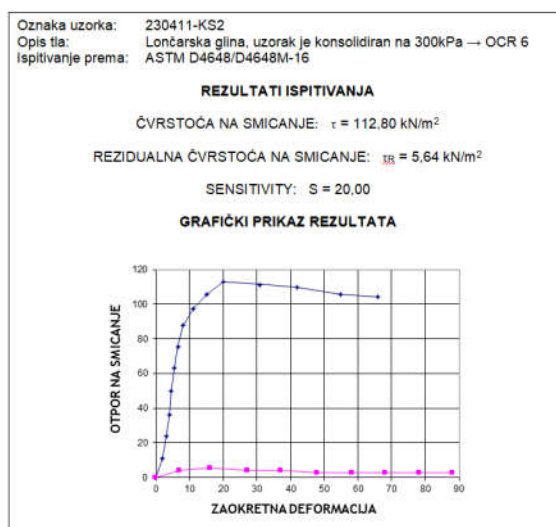
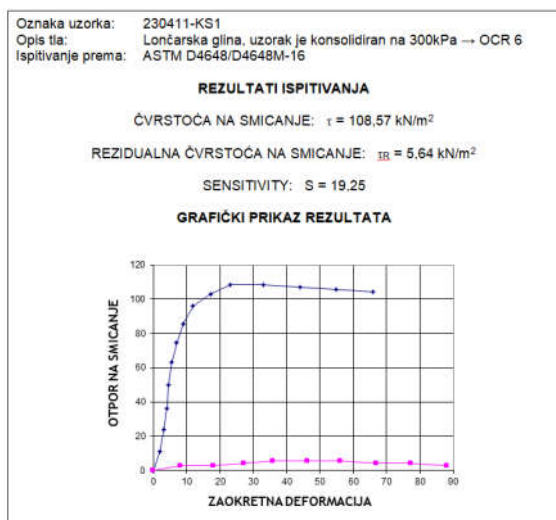
OCR=3	230411-KS1	230411-KS2	230411-KS3
Vršna čvrstoća τ (kPa)	49,35	52,17	51,04
Rezidualna čvrstoća (kPa)	9,87	14,10	11,99
Osjetljivost	5,00	3,70	4,24



Slika 68.: Izvještaji o ispitivanju u laboratorijskom krilnom sondom, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Tablica 10.: Rezultati ispitivanja laboratorijskom krilnom sondom za OCR=6

OCR=6	230411-KS1	230411-KS2	230411-KS3
Vršna čvrstoća τ (kPa)	108,57	112,80	111,39
Rezidualna čvrstoća (kPa)	5,64	5,64	4,23
Osjetljivost	19,25	20,00	26,33



Slika 69.: Izvještaji o ispitivanju u laboratorijskom krilnom sondom, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

5.4. Usporedba rezultata ispitivanja

Ispitivanja su pokazala vrlo mala odstupanja rezultata nedrenirane čvrstoće kod jednoosnog i troosnog posmika. Ako uzmemo prosjek rezultata kod OCR=1 ta su odstupanja cca 9% (51 kPa / 56 kPa), kod OCR=3 su odstupanja cca 4% (73 kPa / 76 kPa), dok ih kod OCR=6 praktički niti nema (92 kPa / 93 kPa). Sa povećanjem OCR-a očekivano dolazi i do povećanja nedrenirane čvrstoće za cca 30 %.

Rezultati ispitivanja laboratorijskom krilnom sondom su kod OCR=1 i OCR=3 nešto niži u odnosu na rezultate dobivene jednoosnim i troosnim posmikom, dok je kod OCR=6 vrijednost nedrenirane čvrstoće čak i veća od rezultata dobivenih jednoosnim i troosnim posmikom.

Kao prilog analizi rezultata ispitivanja u nastavku su prikazani tablično i dijagramom odnosi naprezanja prekonsolidacije : nedrenirana čvrstoća po OCR-u za svaki tip pokusa.

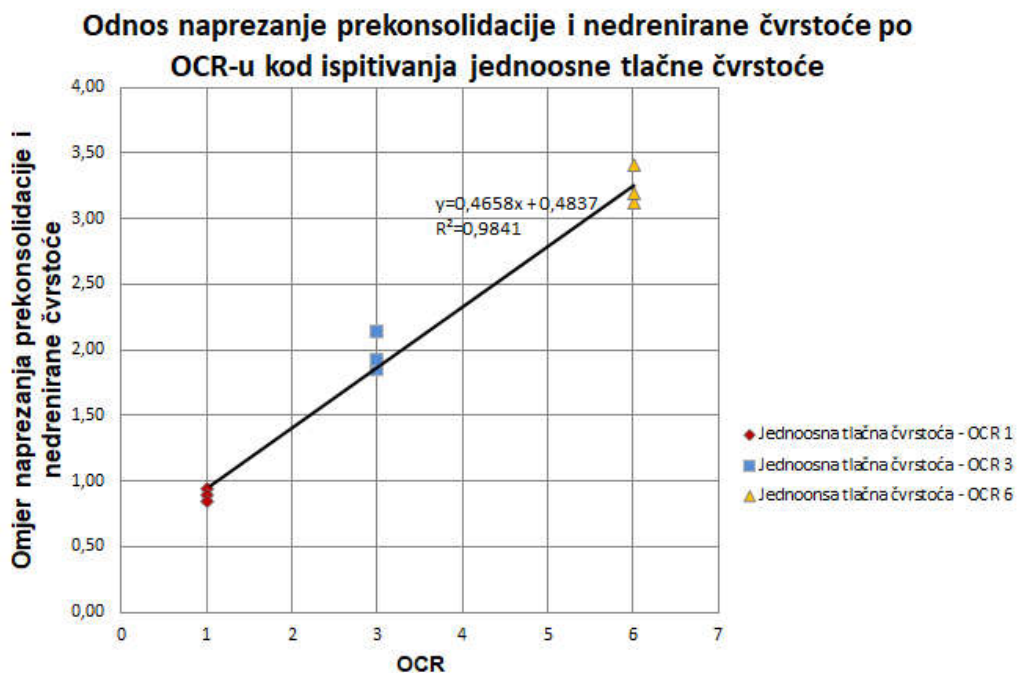
Na taj način se iz naprezanja prekonsolidacije, koje se može odrediti u edometarskom pokusu može prognozirati nedrenirana čvrstoća, što je vrlo važan podatak. Kod OCR=3 i OCR=6 nedrenirana čvrstoća je oko $1/3 - 1/2$ naprezanja prekonsolidacije.

Jednoosna tlačna čvrstoća

U nastavku je tablica 11 sa sumarnim rezultatima ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće, te dijagram odnosa napreznja prekonsolidacije i c_u po OCR-u na slici 70.

Tablica 11.: Sumirani prikaz rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće

Napreznje prekonsolidacije (kPa)	Nedrenirana čvrstoća (kPa)	Omjer: Napreznje / Nedrenirana	OCR
50	53	0,94	1
50	56	0,89	1
50	59	0,85	1
150	81	1,85	3
150	70	2,14	3
150	78	1,92	3
300	96	3,13	6
300	88	3,41	6
300	94	3,19	6



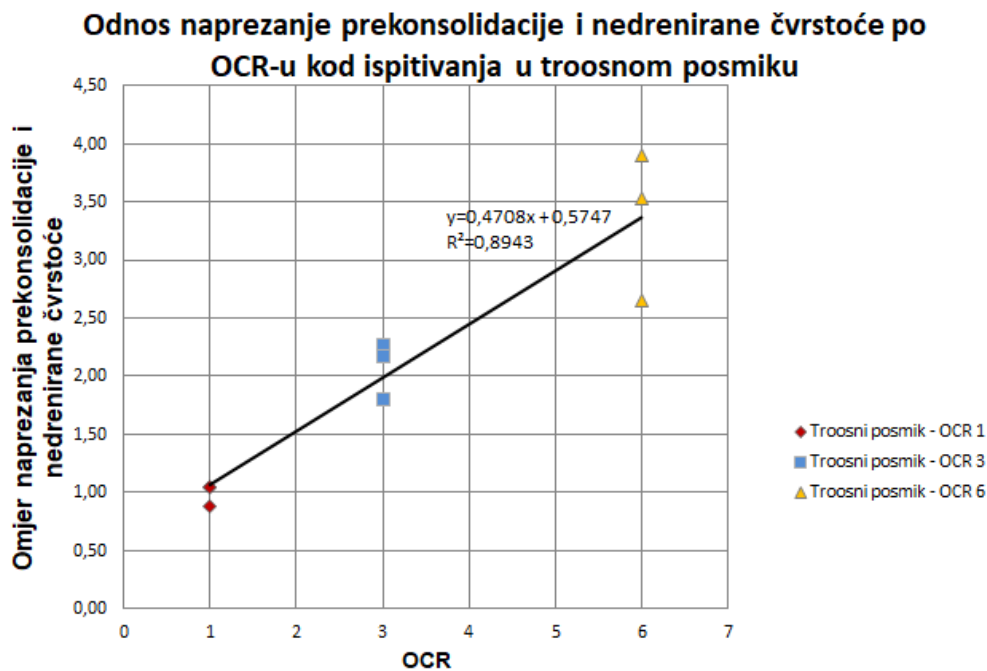
Slika 70.: Dijagram odnosa napreznja prekonsolidacije i nedrenirane čvrstoće po OCR-u

Troosni posmik

U nastavku je tablica 12 sa sumarnim rezultatima ispitivanja u troosnom posmiku, te dijagram odnosa napreznja prekonsolidacije i c_u po OCR-u na slici 71.

Tablica 12.: Sumirani prikaz rezultata ispitivanja u troosnom posmiku

Napreznje prekonsolidacije (kPa)	Nedrenirana čvrstoća (kPa)	Omjer: Napreznje / Nedrenirana	OCR
50	48	1,04	1
50	57	0,88	1
50	48	1,04	1
150	83	1,81	3
150	66	2,27	3
150	69	2,17	3
300	113	2,65	6
300	85	3,53	6
300	77	3,90	6



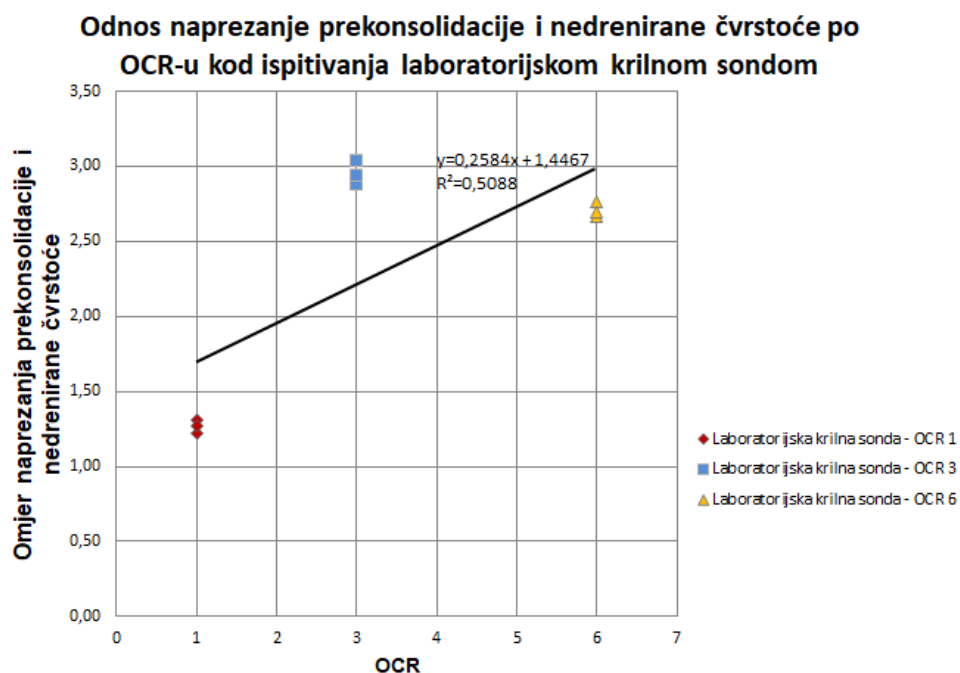
Slika 71.: Dijagram odnosa napreznja prekonsolidacije i nedrenirane čvrstoće po OCR-u

Krilna sonda

U nastavku je tablica 13 sa sumarnim rezultatima ispitivanja u krilnom sondom, te dijagram odnosa napreznja prekonsolidacije i c_u po OCR-u na slici 72.

Tablica 13.: Sumirani prikaz rezultata ispitivanja laboratorijskom krilnom sondom,

Napreznje prekonsolidacije (kPa)	Nedrenirana čvrstoća (kPa)	Omjer: Napreznje / Nedrenirana	OCR
50	38,07	1,31	1
50	40,89	1,22	1
50	39,48	1,27	1
150	49,35	3,04	3
150	52,17	2,88	3
150	51,04	2,94	3
300	108,57	2,76	6
300	112,8	2,66	6
300	111,39	2,69	6



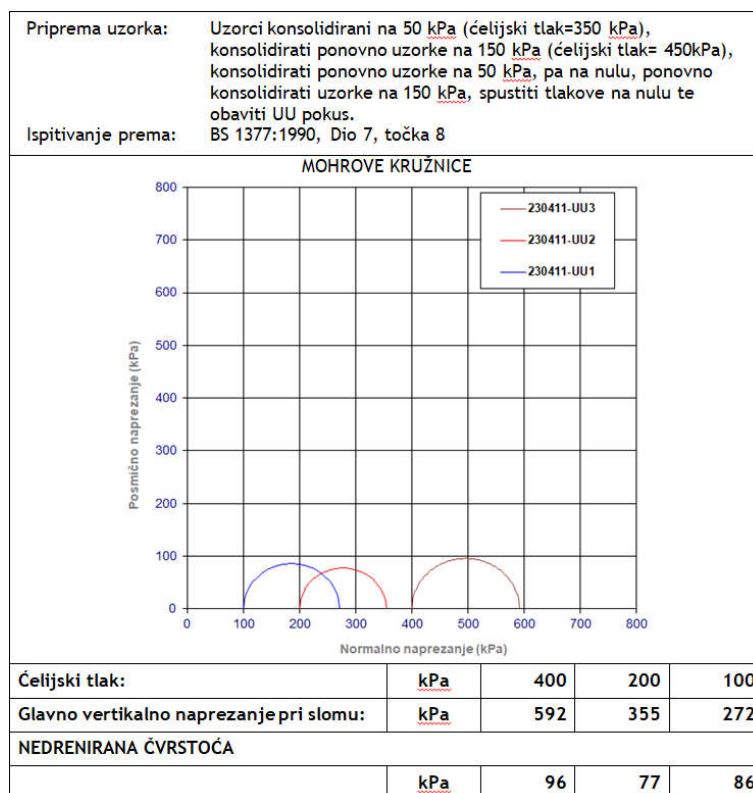
Slika 72.: Dijagram odnosa napreznja prekonsolidacije i nedrenirane čvrstoće po OCR-u

5.5. Rezultati posebnih slučajeva troosnog posmika sa povratnom konsolidacijom

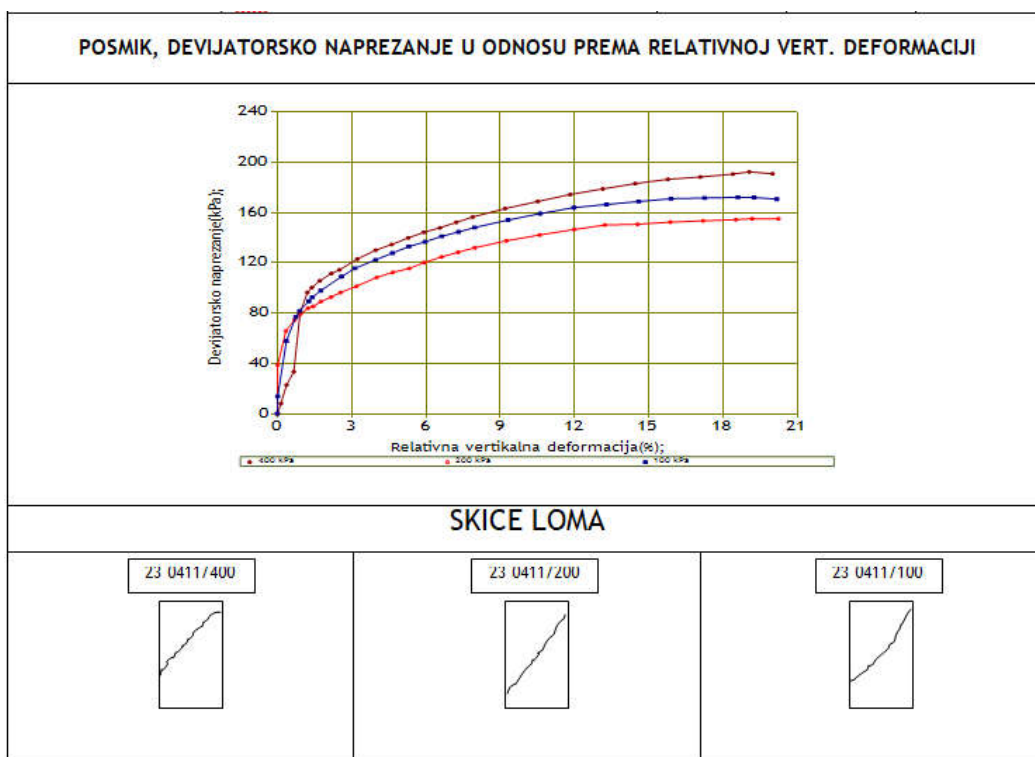
U tablicama 14 i 15 prikazani su rezultati ispitivanja u troosnom posmiku sa povratnom konsolidacijom za različite OCR-ove, dok su na slikama 73 do 76 prikazani izvještaji o ispitivanju.

Tablica 14.: Rezultati ispitivanja u troosnom posmiku za OCR=3

OCR=3	230411-UU1	230411-UU2	230411-UU3
Visina (cm)	7,61	7,56	7,53
Promjer (cm)	3,94	3,93	3,95
Vlažnost (%)	22,07	22,13	22,19
Gustoća vlažna (g/cm ³)	2,12	2,12	2,15
Gustoća suha (g/cm ³)	1,73	1,74	1,76
Deformacija pri slomu (%)	19,1	20,2	18,6
Nedrenirana čvrstoća (kPa)	96	77	86



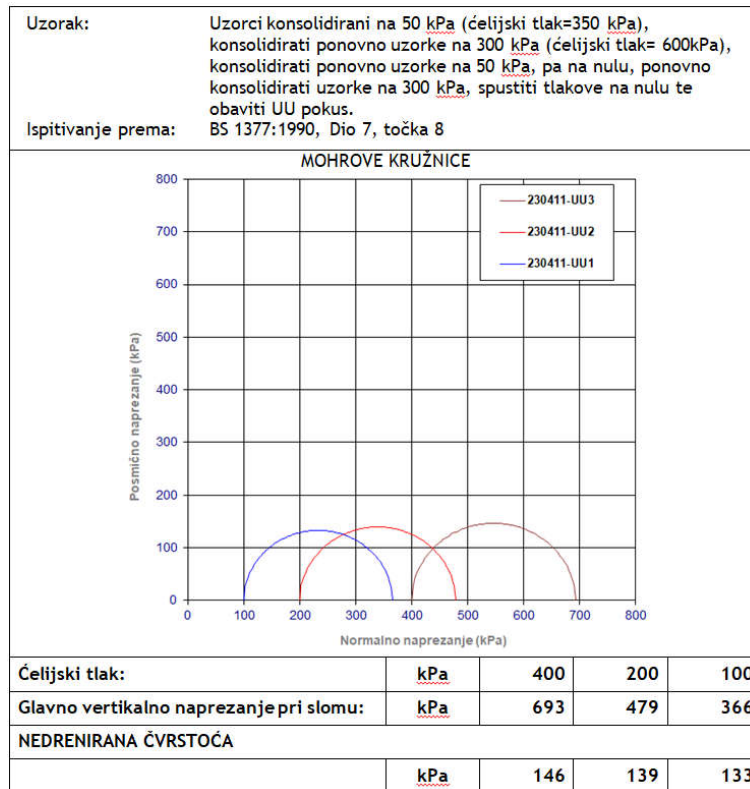
Slika 73.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



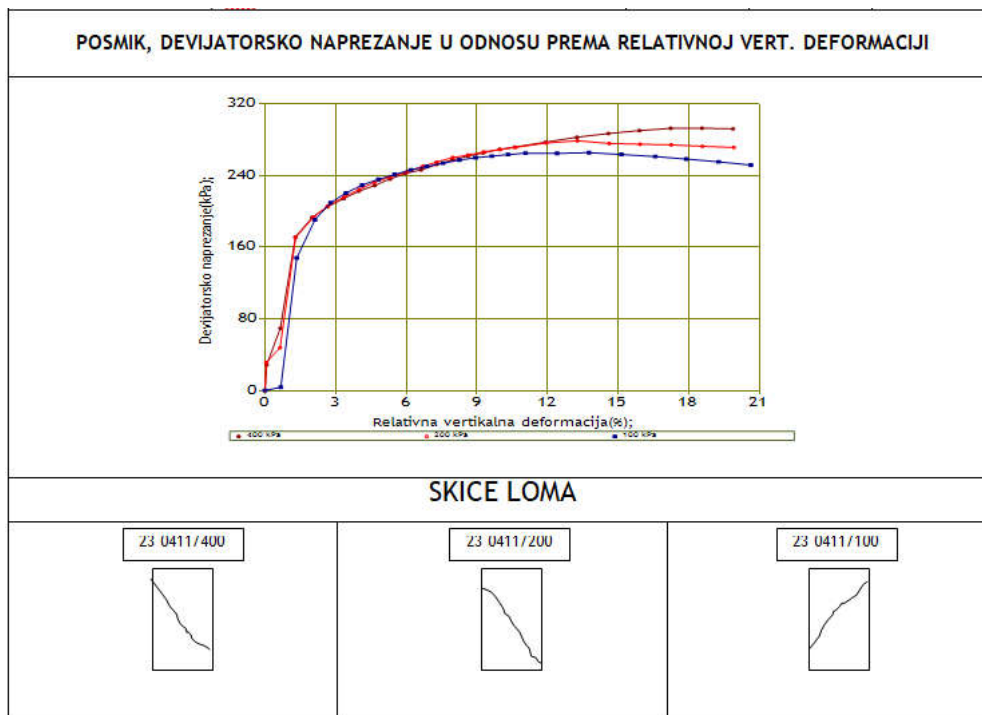
Slika 74.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku,
(skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Tablica 15.: Rezultati ispitivanja u troosnom posmiku za OCR=6

OCR=6	230411-UU1	230411-UU2	230411-UU3
Visina (cm)	7,54	7,53	7,26
Promjer (cm)	3,89	3,88	3,89
Vlažnost (%)	22,28	22,13	22,13
Gustoća vlažna (g/cm ³)	2,14	2,12	2,12
Gustoća suha (g/cm ³)	1,75	1,74	1,74
Deformacija pri slomu (%)	18,6	13,3	13,8
Nedrenirana čvrstoća (kPa)	146	139	133



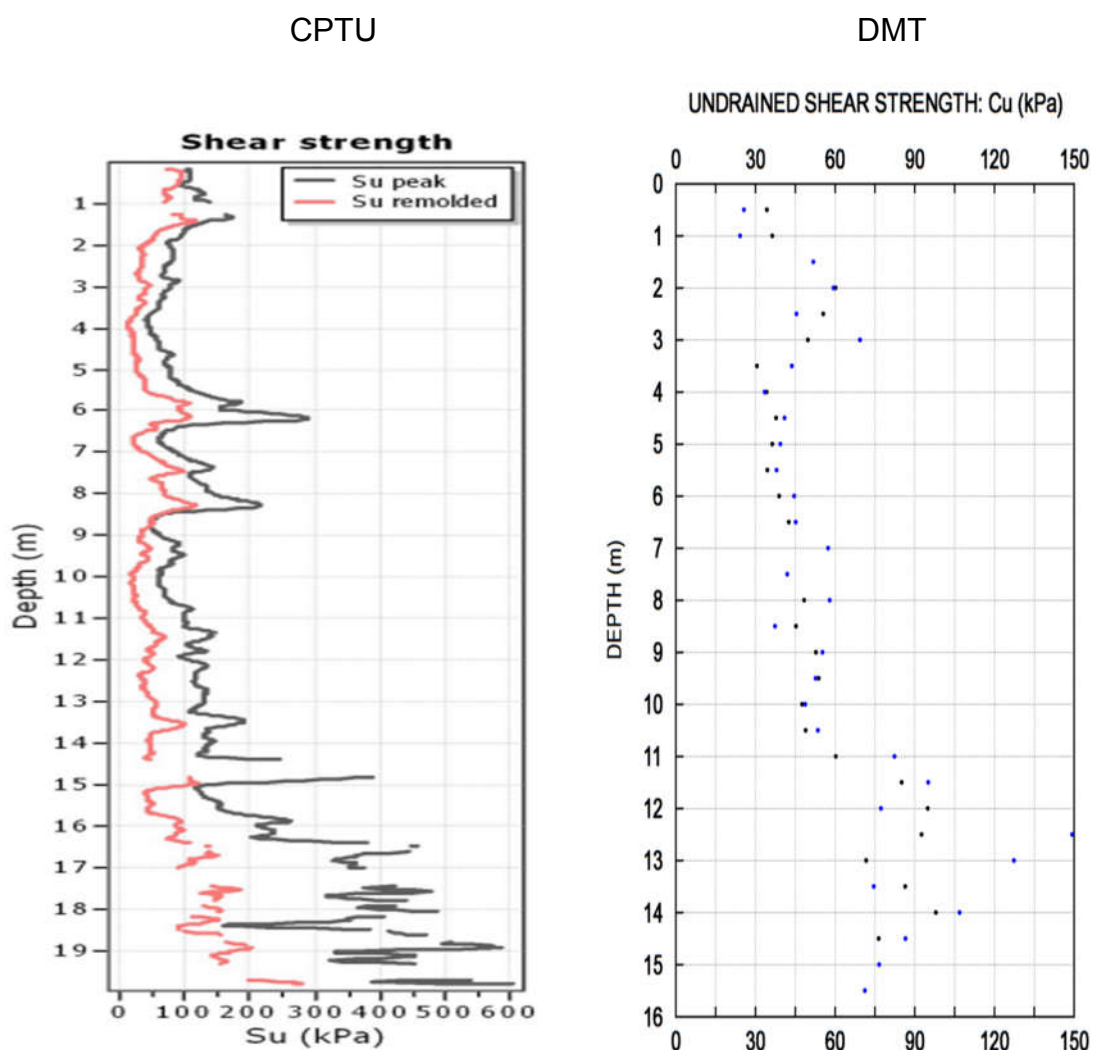
Slika 75.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)



Slika 76.: Izvještaj o ispitivanju u troosnom posmiku, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

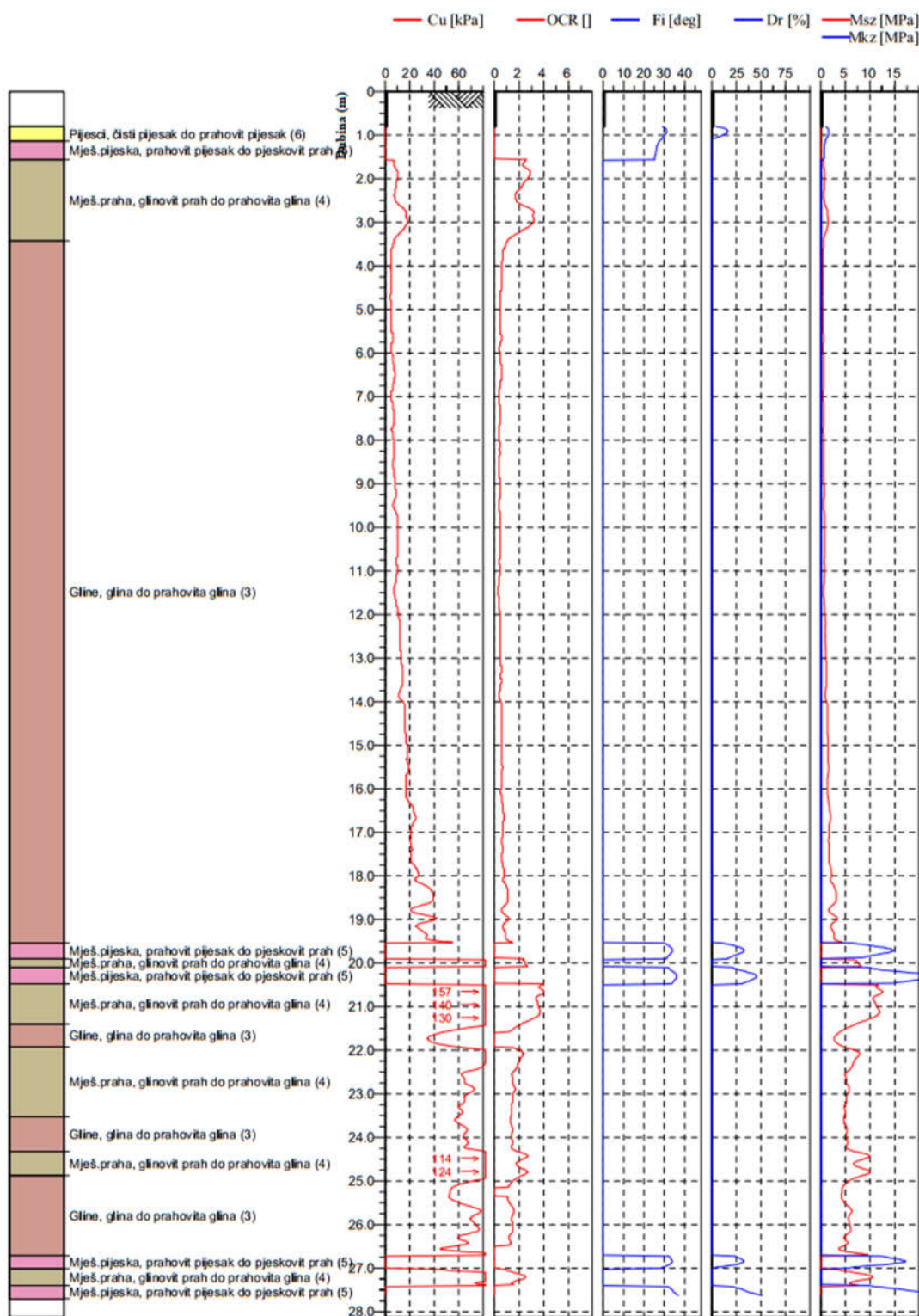
6. PRIMJERI GEOTEHNIČKIH ZAHVATA S PRIMJENOM NEDRENIRANE ČVRSTOĆE

Za potrebe izgradnje skladišta na glinovitom tlu, sa šljunčanim pilotima kao metodom poboljšanja tla uspoređeni su rezultati CPTU i DMT ispitivanja. Nedrenirana čvrstoća ($s_u=c_u$) bila je važna za proračun nosivosti temeljne konstrukcije, te je vidljivo da se DMT ispitivanjima dobiju manje nedrenirane čvrstoće nego CPTU pokusom. Na slici 77 prikazan je primjer interpretacije rezultata nedrenirane čvrstoće dobivenih CPTU-om i DMT-om.



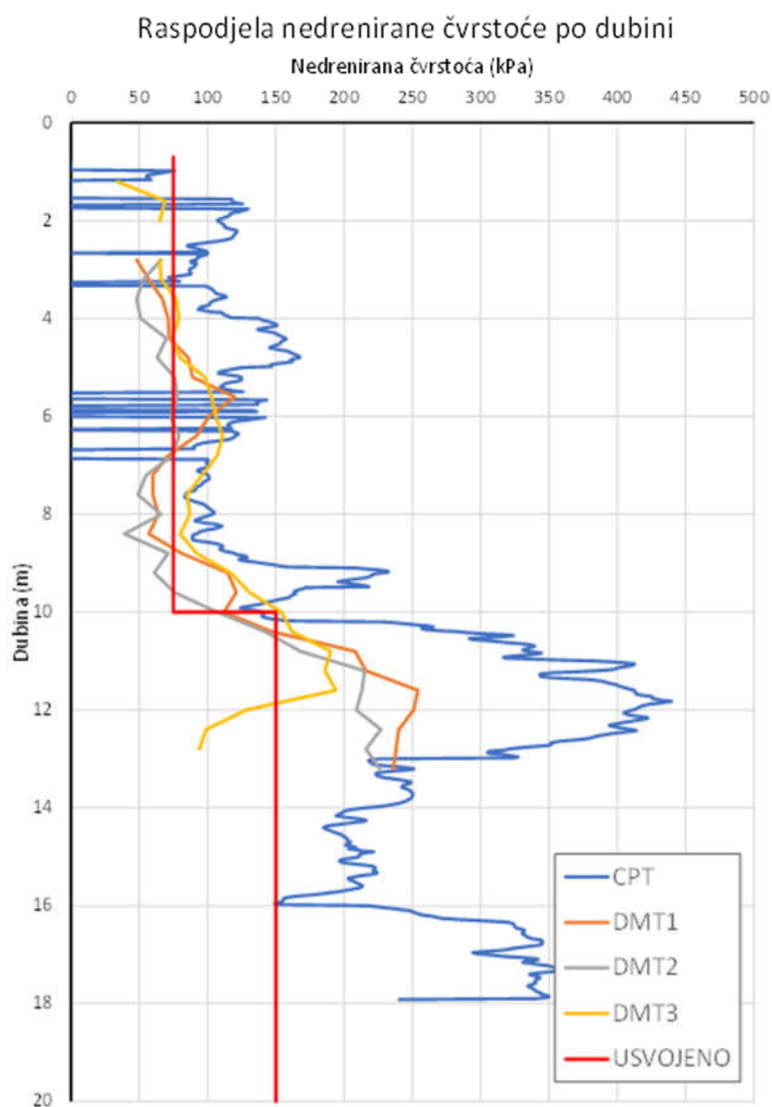
Slika 77.: Primjer CPTU i DMT interpretacije rezultata, preuzeto iz [6]

Za potrebe izgradnje uređaja za pročišćavanje na mekom tlu u Kninu dan je primjer CPTU karakterizacije temeljnog tla na slici 78. Mala nedrenirana čvrstoća (c_u) uvjetovala je primjenu šljunčanih pilota.



Slika 78.: Primjer CPTU interpretacije rezultata, (skenirano uz dozvolu IGH, 2023.)

Za potrebe izgradnje grupe silosa temeljenih na ploči, izvršena su ispitivanja CPTU i DMT, te je nedrenirana čvrstoća korištena za procjenu nosivosti temeljnog tla. Usvojena je srednja vrijednost svih ispitivanja (crvenom punom linijom označeno na slici 79).



Slika 79.: Primjer raspodjele nedrenirane čvrstoće po dubini [6]

7. ZAKLJUČAK

Poznavanje geotehničkih parametara neophodno je prilikom projektiranja geotehničkih građevina kao što su stabilizacija klizišta, potporni zidovi, zagatne stijene i temelji. Projektiranje građevina na sitnozrnomo tlu, zbog njegovih karakteristika, predstavlja veliki izazov za inženjere. Osobito se to odnosi na pojavu nedreniranih uvjeta u tlu kada pri brzom smicanju, kao što su primjerice seizmička djelovanja, dolazi do porasta poreznih tlakova u tlu bez mogućnosti njihove disipacije. Nedrenirana čvrstoća tla, c_u , kao najveće posmično naprezanje u tlu, predstavlja stoga najvažniji parametar tla u nedreniranim uvjetima [12].

U diplomskom radu je prikazano na koji se način vrijednosti nedrenirane čvrstoće na homogenoj glini razlikuju ovisno o vrstama laboratorijskih pokusa kod različitih stupnjeva prekonsolidacije i pri različitim naponskim stanjima. Odabrana je homogena glina koja je pripremana u troosnoj ćeliji. Pretpostavka je da je glina sa cca 5 m dubine, potopljena, te da je normalno konsolidirana ($OCR = 1$). Promjenom konsolidacije pri različitim naprezanjima glinu smo doveli do stupnja prekonsolidacije $OCR = 3$ i do $OCR = 6$. Za svaki od tri OCR-a provedena su po tri ispitivanja: jednoosna tlačna čvrstoća, troosni posmik i laboratorijska krilna sonda. Rezultati ispitivanja su pokazala vrlo mala odstupanja rezultata nedrenirane čvrstoće jednoosnog i troosnog posmika, dok su rezultati laboratorijskom krilnom sondom korigirani s koeficijentom u ovisnosti o indeksu plastičnosti samog materijala. Odrađena su dodatno ispitivanja sa povratnom konsolidacijom u troosnom posmiku kako bi se simulirali uvjeti prilikom vađenja uzorka na terenu i istiskivanja uzorka iz metalnog cilindra za uzorkovanje. Rezultati su u tim slučajevima pokazala znatno veće vrijednosti nedrenirane čvrstoće, što dokazuje da se poremećenje uzorka događa i prilikom utiskivanja na terenu, ali i prilikom istiskivanja iz metalnog cilindra za uzorkovanje. Kao određeni prilog analizi rezultata ispitivanja prikazani su odnosi naprezanja prekonsolidacije i nedrenirane čvrstoće po OCR-u, te se na taj način može prognozirati nedrenirana čvrstoća iz naprezanja prekonsolidacije određenog u edometarskom pokusu.

8. LITERATURA

- [1] Pušić, L., Kačunić, D. J., Određivanje nedrenirane čvrstoće pomoću pokusa padajućeg šiljka, Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Zagreb, 2018., <<https://master.grad.hr/phd-simpozij/2018/proceedings/02.pdf>>. Pristupljeno 16. svibnja 2023.
- [2] Mulabdić, M., Ispitivanje tla u geotehničkom laboratoriju, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2018.
- [3] Szavitsz-Nossan, V., Mehanika tla i stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2009.
- [4] Kvasnička, P., Domitrović, D. Mehanika tla. Interna skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2007., <<https://docplayer.net/21113229-Mehanika-tla-interna-skripta-prof-dr-predrag-kvasnicka-dubravko-domitrovic-dipl-ing-zagreb-2007.html>>. Pristupljeno 16. svibnja 2023.
- [5] Mayne, P. W., Determining OCR in clays from laboratory strength, Journal of Geotechnical Engineering, 1988., <https://www.researchgate.net/profile/Paul-Mayne/publication/248876904_Determining_OCR_in_Clays_from_Laboratory_Strength/inks/58343bd308ae138f1c0d3ed2/Determining-OCR-in-Clays-from-Laboratory-Strength.pdf>. Pristupljeno 16. svibnja 2023.
- [6] Mulabdić, M., Mehanika tla i temeljenje: Predavanje 2: Plitko temeljenje, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2018.
- [7] <<https://www.macslope.com/verification/bearing-capacity>>. Pristupljeno 22. lipnja 2023.

- [8] HRN EN 1997-1:2012/A1:2014 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje -
- 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004/A1:2013)
- [9] Peck, R.B., Hanson, W.E., Thornburn, T.H., Foundation Engineering,
USA, 1974
- [10] Soldo, B., Nastavni materijali sa predavanja iz kolegija Temeljne
konstrukcije – Aksijalno opterećeni piloti, Sveučilište Sjever, Odjel za
graditeljstvo, Varaždin, 2022.
<https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7511178/_mod_resource/content/1/3-PILOTI%20AKSIJALNO%20OPTERE%C4%86ENI.pdf>. Pristupljeno 22.lipnja 2023.
- [11] Narita K., (2000): Design and Construction of Embankment Dams.
Aich Institute of Technology, Dept. Of Civil Eng.
<<https://dokumen.tips/documents/design-and-construction-of-embankment-dams.html?page=11>>. Pristupljeno 22.lipnja 2023.
- [12] Danjo, J., Gržan, A., Ovisnost nedrenirane čvrstoće o indeksu
konzistencije glinenih tala za odabrana klizišta u sjeverozapadnoj
Hrvatskoj, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2020.
- [13] <https://www.researchgate.net/figure/The-deep-large-scale-landslide-near-Aratozawa-Dam-reservoir-photo-by-H-Fukuoka_fig2_309598227>.
>. Pristupljeno 22.lipnja 2023.
- [14] Soldo, B., Nastavni materijali sa predavanja iz kolegija Geotehničko
inženjerstvo – Ponavljanje – mehanika tla i temeljenje, Sveučilište
Sjever, Odjel za graditeljstvo, Varaždin, 2022
<<https://moodle.srce.hr/2021-2022/course/view.php?id=124727>>.
Pristupljeno 22.lipnja 2023.

- [15] <https://www.igeotest.com/knowledge_academy_marchetti.php>.
Pristupljeno 26.06.2023.
- [16] <https://www.igeotest.com/knowledge_academy_marchetti.php>.
Pristupljeno 26.06.2023.
- [17] A. W. Skempton, Discussion on the design and planning of New Hong Kong airport, Proceedings of ICE, vol. 7, 1957, pp. 305 - 307.
- [18] Lunne, T.; Robertson, P.K.; Powell, J.J.M.: Cone penetration Testing in Geotechnical Practice, Black Academic & Professional, 1997.
- [19] Jamiolkowski, Michele. "New developments in field and laboratory testing of soils," State of the Art Report." In Proc. 11th Int. Conf. On SMFE, vol. 1, pp. 57-153. 1985.

Norme:

- [20] ASTM D4648-05, Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil
- [21] BS 1377: Part 7 1990 (točka 7.2), Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće. Metoda tlačenjem u preši.
- [22] BS 1377: Part 7:1990 (točka 8), Određivanje nedrenirane posmične čvrstoće pri troosnom posmiku bez mjerenja pornog tlaka.



IZJAVA O AUTORSTVU

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, članaka, 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, EDIN SERDAREVIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom PRILOG ISTRAŽIVANJU NEKONVENCIONALNE ČESTOĆE I ZNAČAJ U GEOMETRIČKIM ZAHVATIMA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

PRILOG

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. 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.

Sukladno čl. 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.