

# Određivanje optimalne vlažnosti i CBR vrijednosti tla

---

Jakopović, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:189565>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**



Repository / Repozitorij:

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



# Određivanje optimalne vlažnosti i CBR vrijednosti tla

---

**Jakopović, Lucija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:189565>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-11-04**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

LUCIJA JAKOPOVIĆ

ODREĐIVANJE OPTIMALNE VLAŽNOSTI I  
CBR VRIJEDNOSTI TLA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ODREĐIVANJE OPTIMALNE VLAŽNOSTI I  
CBR VRIJEDNOSTI TLA

ZAVRŠNI RAD

KANDIDAT:

Lucija Jakopović

MENTOR:

Stjepan Strelec, izv. prof. dr. sc.

KOMENTOR:

Damir Štuhec, dipl. ing. geotehnike

VARAŽDIN, 2017.

**Sažetak:**

Lucija Jakopović, Određivanje optimalne vlažnosti i CBR vrijednosti tla

Tlo se kao građevni materijal koristi za izradu nasutih građevina kao što su nasipi za cestovne i željezničke prometnice, aerodromske piste, kolničke konstrukcije, vodoprivredne nasipe i brane za retencije ili akumulacije. Ovi zahvati sadrže ugradnju zemljanih materijala različitim metodama zbijanja čime se poboljšavaju određena svojstva tla (smanjuje se deformabilnost i vodopropusnost a povećava nosivost i posmična otpornost). Prije ugradnje moraju se provjeriti neka fizičko-mehanička svojstva tla čime se ocjenjuje njegova pogodnost za korištenje u određenu svrhu. Provjera svojstava izvodi se pomoću laboratorijskih ispitivanja koja obuhvaćaju Atterbergove granice konzistencije, granulometrijski sastav, optimalnu vlažnost i pripadajuću suhu gustoću te CBR vrijednost. Optimalna vlažnost određuje se standardnim ili modificiranim Proctor-ovim postupkom a pokazuje sposobnost tla da pri zadanoj energiji zbijanja postigne traženu suhu gustoću. CBR vrijednost koristi se pri dimenzioniranju kolničkih konstrukcija a može se odrediti nakon potapanja uzorka u vodu ili neposredno, provedbom ispitivanja odmah nakon zbijanja uzorka tla.

**Ključne riječi:**

Zbijanje, optimalna vlažnost, Proctor-ov pokus, kalifornijski indeks nosivosti, CBR vrijednost

## Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. OPĆI DIO .....  | 3  |
| 2.1. Nastanak tla.....   | 3  |
| 2.2. Klasifikacija tla .....   | 4  |
| 2.2.1. AC – klasifikacija (Airfield Classification System).....        | 8  |
| 2.2.2. USCS – klasifikacija (Unified Soil Classification System) ..... | 8  |
| 2.3. Trodijelni sustav tla.....  | 10 |
| 2.4. Granulometrijski sastav.....                                      | 13 |
| 2.4.1. Sijanje.....  | 14 |
| 2.4.2. Areometriranje .....  | 16 |
| 2.4.3. Kombinirana analiza .....                                       | 17 |
| 2.5. Atterbergove granice ili granice plastičnosti.....                | 18 |
| 2.5.1. Određivanje prirodne vlažnosti.....                             | 18 |
| 2.5.2. Granica tečenja ( $w_L$ ).....                                  | 19 |
| 2.5.3. Granica plastičnosti ( $w_P$ ).....                             | 20 |
| 2.5.4. Indekсни parametri.....   | 20 |
| 2.6. Proctor-ov pokus .....  | 20 |
| 2.6.1. Određivanje vrijednosti CBR-a (California Bearing Ratio).....   | 23 |
| 3. PRAKTIČNI DIO .....   | 26 |
| 3.1. Određivanje vlažnosti uzorka tla.....                             | 27 |
| 3.1.1. Norma.....  | 27 |
| 3.1.2. Namjena .....   | 27 |
| 3.1.3. Značajke.....   | 27 |
| 3.1.4. Oprema.....   | 27 |
| 3.1.5. Procedura ispitivanja.....                                      | 27 |
| 3.1.6. Rezultati .....   | 28 |
| 3.2. Ispitivanje gustoće čvrstih čestica tla.....                      | 28 |
| 3.2.1. Norma.....  | 28 |
| 3.2.2. Namjena .....   | 28 |
| 3.2.3. Značajke.....   | 28 |
| 3.2.4. Oprema.....   | 28 |
| 3.2.5. Procedura ispitivanja.....                                      | 28 |
| 3.2.6. Rezultati .....   | 29 |
| 3.3. Granulometrijska analiza (sijanje i areometriranje).....          | 30 |
| 3.3.1. Norma.....  | 30 |

|   |    |
|---|----|
| 3.3.2. Namjena .....  | 30 |
| 3.3.3. Značajke .....   | 30 |
| 3.3.4. Oprema .....   | 30 |
| 3.3.5. Procedura ispitivanja .....  | 30 |
| 3.3.6. Rezultati .....  | 32 |
| 3.4. Određivanje konzistencije tla – Atterbergove .....                                   | 32 |
| 3.4.1. Norma .....  | 32 |
| 3.4.2. Namjena .....  | 32 |
| 3.4.3. Značajke .....   | 33 |
| 3.4.4. Oprema .....   | 33 |
| 3.4.5. Procedura ispitivanja .....  | 33 |
| 3.4.6. Rezultati .....  | 37 |
| 3.5. Određivanje optimalne vlažnosti pri standardnoj energiji zbijanja po Proctor-u ..... | 38 |
| 3.5.1. Norma .....  | 38 |
| 3.5.2. Namjena .....  | 38 |
| 3.5.3. Značajke .....   | 38 |
| 3.5.4. Oprema .....   | 38 |
| 3.5.5. Procedura ispitivanja .....  | 38 |
| 3.5.6. Rezultati .....  | 41 |
| 3.6. Određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti s bubrenjem .....                       | 42 |
| 3.6.1. Norma .....  | 42 |
| 3.6.2. Namjena .....  | 42 |
| 3.6.3. Značajke .....   | 42 |
| 3.6.4. Oprema .....   | 42 |
| 3.6.5. Procedura ispitivanja .....  | 43 |
| 3.6.6. Rezultati .....  | 45 |
| 4. ZAKLJUČAK .....  | 47 |
| 5. LITERATURA .....   | 48 |
| 6. POPIS SLIKA .....  | 49 |
| 7. POPIS TABLICA .....  | 50 |

## 1.UVOD

Geotehničke istražne radove čini skup postupaka prikupljanja i obrade odgovarajućih podataka o tlu na mjestu buduće građevine i njene bliže okoline. Geotehnički istražni radovi izvode se na terenu i u laboratoriju. Terenskim radovima određuje se prostorni položaj slojeva tla, njihova debljina, dubina razine podzemne vode, dok se u laboratoriju ispituju fizička i mehanička svojstva tla. Laboratorijska se ispitivanja izvode prema unaprijed utvrđenom programu koji je sastavni dio programa istražnih radova, a dopunjuje se ili korigira prilikom preuzimanja i pregleda uzoraka u laboratoriju.

Laboratorijska ispitivanja mogu se podijeliti u nekoliko skupina. Jednu od tih skupina čini određivanje posebnih svojstava tla. Tu spadaju sva ispitivanja za potrebe korištenja zemljanih gradiva kao što su: određivanje prirodne vlažnosti, klasifikacijska ispitivanja (Atterbergove granice tečenja i plastičnosti, granulometrijski sastav), sadržaj organskih sastojaka i Proctor-ov pokus. Rezultati dobiveni razredbenim ispitivanjima služe za svrstavanje materijala u razredbene skupine (klasifikacija tla). U RH zemljana gradiva koja se namjeravaju koristiti za izgradnju nasipa, tampona i nosivih slojeva moraju zadovoljavati svojstva propisana u Općim tehničkim uvjetima (OTU) za radove na cestama i Općim tehničkim uvjetima za radove u vodnom gospodarstvu. [9], [10]

Zbijanje je postupak kojim se tlo, razastrto na mjestu ugradnje, dovodi u stanje kada postaje gradivo s projektiranim geotehničkim svojstvima. Kod zbijanja smanjuje se porozitet ( $e$ ) te je učinak isti za nevezana i vezana tla. Za koherentna se tla smanjuje razmak među česticama i povećava učinak elektrokemijskih sila koje utječu na porast kohezije. Kod nekoherentnog tla povećavaju se dodirne površine i uklještenje među česticama. O zbijenosti ovise svojstva bitna za stabilnost pokosa, nosivost, stišljivost nasipa, vezana za naknadno slijeganje nasipa, vododrživost nasipa i vezana za štetni utjecaj vode kada ona povremeno, privremeno ili stalno djeluje na nasip. Proctor (1933.) je utvrdio da zbijenost tla ovisi o energiji zbijanja i vlažnosti tla koju je nazvao „optimalna vlažnost“. Optimalna vlažnost je vlažnost koja za određenu energiju zbijanja, daje najveću moguću suhu gustoću tla, najveću moguću zbijenost.



Optimalna vlaga dobivena ispitivanjem prema Proctor-ovom pokusu neophodna je za određivanje vrijednosti Kalifornijskog indeksa nosivosti odnosno vrijednosti CBR-a (California Bearing Ratio).

Kalifornijski indeks nosivosti (CBR) je empirički pokus koji se koristi za procjenu vrijednosti nosivosti podloga i tampona prometnica. U ovom završnom radu detaljnije će biti obrađen Proctor-ov pokus i određivanje CBR vrijednosti.

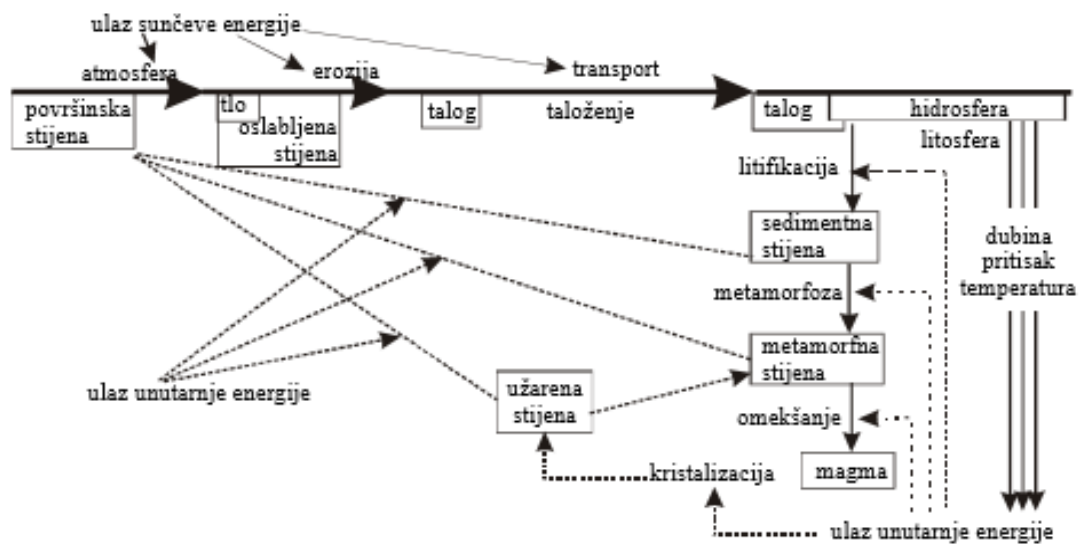
Cilj izvođenja Proctor-ovog pokusa je dobivanje krivulje za odabranu energiju zbijanja gdje se u točki koja predstavlja njen maksimum očita vrijednost optimalne vlažnosti ( $w_{opt}$ ) i pripadne suhe gustoće koja iznosi  $\rho_{dmaks}$ . Kod CBR pokusa se u uzorak prethodno zbijen zadanom energijom zbijanja pri optimalnoj vlažnosti utiskuje normiranom brzinom klip, mjeri sila otpora prodiranja klipa u uzorak i izračunava naprezanje koje podijeljeno sa standardnim naprežanjem daje CBR vrijednost. [5],[6], [7]

Za potrebe izrade ovog završnog rada u geotehničkom laboratoriju provedena su ispitivanja na sitnozrnatom uzorku tla s pozajmišta materijala.

## 2. OPĆI DIO

### 2.1. Nastanak tla

Tlo je nastalo kao posljedica rastrošbe Zemljine kore pod utjecajem atmosferilija. Kao što voda kruži u prirodi, tako se isto može promatrati kruženje stijena koje tvore Zemljinu koru. Razlika je jedino u vremenskom razdoblju promatranja pojave. Geološki ciklus stijene prikazan je na Slici 1.



Slika 1. Geološki ciklus stijene (prema Mitcell, 1976.)

Očvrsla stijenska masa onog trenutka kada se pojavi na površini Zemljine kore, dolazi pod utjecaj atmosferilija. Atmosferilij je skupno ime za čimbenike koji utječu na rastrošbu stijenske mase, a što je početak stvaranja tvorevine koja se naziva tlo. Rastrošbom se stijena više ili manje usitni, a djelomično se izmjeni i kemijski sastav osnovnih kristala. Ovisno o kristalografiji, pojedine stijene su više ili manje podložne rastrošbi. Poznavanje mineraloškog sastava tla bitno je za razumijevanje ponašanja tla.

Rastrošba započinje djelovanjem tektonskih sila koje svojim utjecajem deformiraju osnovnu stijensku masu do trenutka dok unutar stijenske mase ne dođe do prekoračenja čvrstoće i stvaranja prvih pukotina. Ovo se najčešće dešava duž rasjeda. Zatim se stijena dalje lomi u manje blokove.

Kada blokovi postanu omeđeni pukotinama sa svih strana, dolazi do pomaka blokova i otvaranja pukotina. U pukotine, ma kako one bile uske, čak i u prsline, ulazi voda i tu počinje utjecaj atmosferilija na rastrošbu stijene. [1]

Najčešća podjela čimbenika rastrošbe je na:

MEHANIČKE ČIMBENIKE: tektonske sile, voda, led, abrazija i vegetacija.

KEMIJSKE ČIMBENIKE: oksidacija, karbonizacija, hidratacija, desilikacija i otapanje.

ČIMBENIKE TRANSPORTA: gravitacija, voda, vjetar i led. [1]

## **2.2. Klasifikacija tla**

Tlo je prirodna mješavina mineralnih zrna i kao takvo jedan od najvažnijih inženjerskih materijala. Postoji niz različitih klasifikacija tla. U geomehanici postoji nekoliko načina klasificiranja tla od kojih su neki opće prihvaćeni, a neki se koriste ograničeno ili su napušteni. Oni koji se koriste, koriste se u izvornom obliku ili su naknadno dorađeni. Klasifikacija služi da bi se tla mogla međusobno razlikovati po nazivu iza kojeg se krije skupina tala sličnih fizičko-mehaničkih svojstava. Također, klasifikacija olakšava sporazumijevanje među korisnicima geotehničkih podataka, jer je međunarodno prihvaćena i koristi se s manjim modifikacijama u cijelom svijetu.

Klasifikacije tla mogu biti prema veličini zrna i prema stanju plastičnosti sitnozrnatog tla. Za njih je potrebno provesti relativno jednostavna laboratorijska ispitivanja kao što su sisanje, areometriranje i određivanje granica konzistentnih stanja. Prema veličini odnosno promjeru zrna najviše se koristi podjela prema AC (Airfield Classification) odnosno USC (Unified Soil Classification) sustavu i podjela prema MIT-u (Massachusetts Institute of Technology) koja je uobičajena u domaćoj praksi. [1], [5]

Tablica 1. Podjela tla prema veličini zrna. [1], [2]

| VRSTA TLA        |         | PROMJER ZRNA [mm]      |              | SIMBOL   |
|------------------|---------|------------------------|--------------|----------|
|                  |         | prema AC i USC sustavu | prema MIT-u  |          |
| Krupnozrnato tlo | Šljunak | > 4,75                 | 60 – 2       | <b>G</b> |
|                  | Pijesak | 4,75 – 0,075           | 2 – 0,06     | <b>S</b> |
| Sitnozrnato tlo  | Prah    | < 0,075                | 0,06 – 0,002 | <b>M</b> |
|                  | Glina   |                        | < 0,002      | <b>C</b> |

*Krupnozrnata tla:* sadrže preko 50% zrna većih od 0,075 mm odnosno 0,06 mm

*Sitnozrnata tla:* sadrže preko 50% zrna manjih od 0,075 mm odnosno 0,06 mm

Detaljnija podjela tla prema veličini zrna po MIT-u prikazana je u Tablici 2.

Tablica 2. Klasifikacija tla prema promjeru zrna po MIT-u.

| OPIS  |        |                |            | NAZIVNI PROMJER [mm] | TLO PREMA KRUPNOĆI ZRNA                |
|-------|--------|----------------|------------|----------------------|--|
| ZRNA  | KRUPNA | KAMEN          |            | više od 60           | KRUPNOZRNATO<br>TLO<br>>60 do 0,06 mm  |
|       |        | ŠLJUNAK        | KRUPAN     | 60 – 20              |  |
|       |        |                | SREDNJI    | 20 – 6               |  |
|       |        |                | SITAN      | 6 – 2                |  |
|       |        | PIJESAK        | KRUPAN     | 2 – 0,6              |  |
|       |        |                | SREDNJI    | 0,6 – 0,2            |  |
|       | SITAN  |                | 0,2 – 0,06 |                      |  |
|       | SITNA  | PRAH           | KRUPAN     | 0,06 – 0,02          | SITNOZRNATO<br>TLO<br>0,06 do 0,002 mm |
|       |        |                | SREDNJI    | 0,02 – 0,006         |  |
|       |        |                | SITAN      | 0,006 – 0,002        |  |
| GLINA |        | manje od 0,002 |            |                      |  |

Postoje 4 osnovne podijele grupa tla prema veličini zrna:

**Šljunak** se sastoji od mineralnih zrna i fragmenata stijena većih od 2 mm. Simbol **G** za šljunak dolazi od engleskog naziva za šljunak – Gravel.

**Pijesak** se sastoji od mineralnih zrna i fragmenata stijena razne veličine koji prolaze sitom otvora 2 mm, a zaustavljaju se na situ otvora 0,06 mm. Zrno veličine 0,06 mm je približno najmanje koje se još može raspoznati golim okom. Simbol **S** za pijesak dolazi od engleskog naziva za pijesak – Sand.

**Prah** se sastoji od čestica većih od 0,002 mm, a manjih od 0,06 mm koje imaju malu ili nikakvu koheziju i plastičnost. Simbol **M** za prah dolazi od švedske riječi Myala.

**Glina** se sastoji od čestica manjih od 0,002 mm; dodavanjem vode ili sušenjem mijenjaju joj se konzistentna stanja što utječe na njezina svojstva. Simbol **C** za glinu dolazi od engleskog naziva za glinu – Clay.

Posebnu grupu tla čine:

**Organsko tlo** se sastoji od raspadnutih biljnih tvari koje su fino raspodijeljene. Simbol **O** dolazi od engleskog naziva za organsko - Organic.

**Treset** je vlaknasto močvarno tlo. Simbol **Pt** dolazi od engleskog naziva za treset – Peat.

Graduiranost krupnozrnatog tla izračunava se iz karakteristika granulometrijske krivulje koje se određuju pomoću vrijednosti koeficijenta jednoličnosti  $C_U$  i koeficijenta zakrivljenosti  $C_C$  (Tablica 3). [5]

Tablica 3. Graduiranost krupnozrnatog tla. [1]

| Graduiranost | Uvjeti graduiranosti   | Oznaka |
|--------------|--|--------|
| dobra        | $C_U > 4$ za šljunak; $1 < C_C < 3$<br>$C_U > 6$ za pijesak; $1 < C_C < 3$ | W      |
| slaba        | ako vrijednost $C_U$ i/ili $C_C$ ne zadovoljavaju uvjete                   | P      |

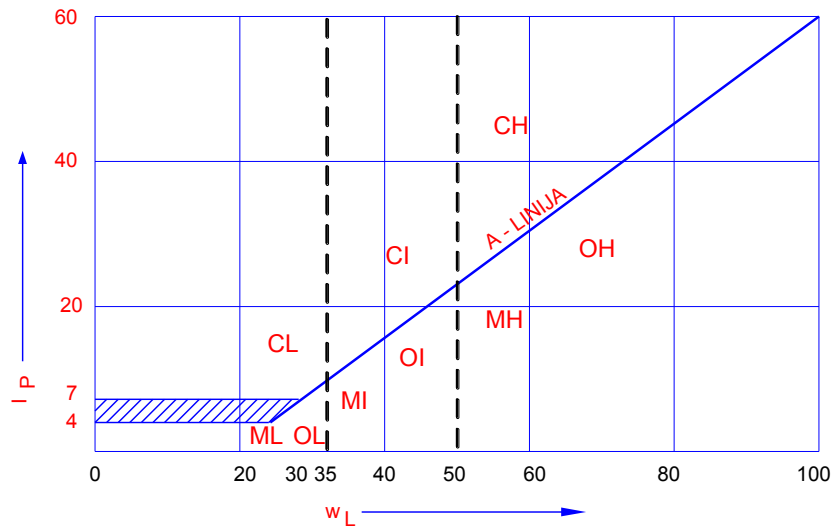
Sitnozrnato tlo klasificira se prema granici tečenja  $w_L$  i indeksu plastičnosti  $I_P$  odnosno položaju točke u dijagramu plastičnosti s koordinatama granice tečenja po osi  $x$  i indeksa plastičnosti po osi  $y$ .

Prema granici tečenja, sitnozrnato tlo može biti (Tablica 4.):

Tablica 4. Plastičnost sitnozrnatog tla. [5]

| Stupanj plastičnosti | Granica tečenja $w_L$ [%] |           | Oznaka |
|----------------------|---------------------------|-----------|--------|
|                      | prema AC                  | prema USC |        |
| nisko plastično      | < 35%                     | < 50%     | L      |
| srednje plastično    | 35% do 50%                | nema      | I      |
| visoko plastično     | > 50%                     | > 50%     | H      |

Indeks plastičnosti dijeli sitnozrnato tlo na anorganske gline, anorganski prah i organske materijale. Arthur Casagrande (1947.) utvrdio je da povezujući indeks plastičnosti ( $I_P$ ) i granicu tečenja  $w_L$  za pojedine koherentne vrste materijala, nastaje grupiranje materijala u pojedinim zonama. Na taj način je dobio dijagram koji je nazvao *dijagram plastičnosti* (Slika 2.). Uočio je da se anorganske gline grupiraju iznad organskih glina i prašinih materijala za iste vrijednosti granice tečenja. To znači da organske gline i prašinski materijali imaju manji raspon vlažnosti između granice plastičnosti i granice tečenja. Proučavajući velik broj prikaza Casagrande je ustanovio kosi pravac, koji je nazvao A-linija. Prema vrijednosti indeksa plastičnosti, ovaj pravac dijeli područje dijagrama na dvije zone: iznad A-linije je zona glinovitih materijala, a ispod A-linije je zona prahovitih i organskih materijala.



Slika 2. Dijagram plastičnosti (sitnozrnata tla) po AC – klasifikaciji [3]

### 2.2.1. AC – klasifikacija (Airfield Classification System)

AC-klasifikacija tla dijeli materijale prema veličini zrna (Tablica 1.), a sitnozrnate još i prema plastičnosti (Tablica 4.).

Prema veličini zrna i njihovom međusobnom odnosu te svojstvima granulometrijske krivulje, krupnozrnati materijali se detaljnije klasificiraju kao:

|   |        |     |        |
|---|--------|-----|--------|
| dobro građuirano krupnozrnato tlo (šljunak i pijesak)     | oznaka | GW  | SW     |
| dobro građuirano krupnozrnato tlo s mnogo gline           | oznaka | GC  | SC     |
| dobro građuirano krupnozrnato tlo s mnogo praha           | oznaka | GM  | SM     |
| slabo građuirano krupnozrnato tlo (šljunak i pijesak)     | oznaka | GP  | SP     |
| slabo građuirano s prekomjerno prahovitih čestica         | oznaka | GFs | SFs    |
| slabo građuirano s prekomjerno glinovitih čestica         | oznaka | GFc | SFc    |
| jednolično građuirano – jednozrnasto, malo sitnih čestica | oznaka | GU  | SU [8] |

### 2.2.2. USCS – klasifikacija (Unified Soil Classification System)

Zasniva se na Cassagrande-ovoj podjeli, s izvjesnim preinakama. Dobila je naziv prema Unified Soil Classification System (objedinjena klasifikacija). Kao i kod AC – klasifikacije postoje osnovne grupe tala:

Krupnozrnata tla: G – šljunak (više od 50% u ukupnoj masi ima šljunka);  
S – pijesak (više od 50% u ukupnoj masi ima pijeska).

Sitnozrnata tla: M – prah (IP ispod "A" linije ili  $IP < 4$ );  
C – glina (IP iznad "A" linije ili  $IP > 7$ );  
O – organsko tlo (IP ispod "A" linije ili  $IP < 4$ ).

Za podgrupe su sljedeće oznake:

Za krupnozrnat materijale:

Krupnozrnate s manje od 5% čestica manjih od 0,075 mm, odnosno 0,06 mm:

W – dobro graduirano ( $Cu > 4$  za šljunke;  $Cu > 6$  za pijeske);

P – slabo graduirano (nedostaje poneka frakcija)

Krupnozrnate koji sadrže 5 % do 12 % čestica većih od 0,075 mm, odnosno 0,06 mm koriste se dvojne oznake:

GC ili SC – s glinom

GM ili SM – s prahom

Krupnozrnate koji sadrže više od 12% čestica većih od 0,075 mm, odnosno 0,06 mm:

C – s glinom

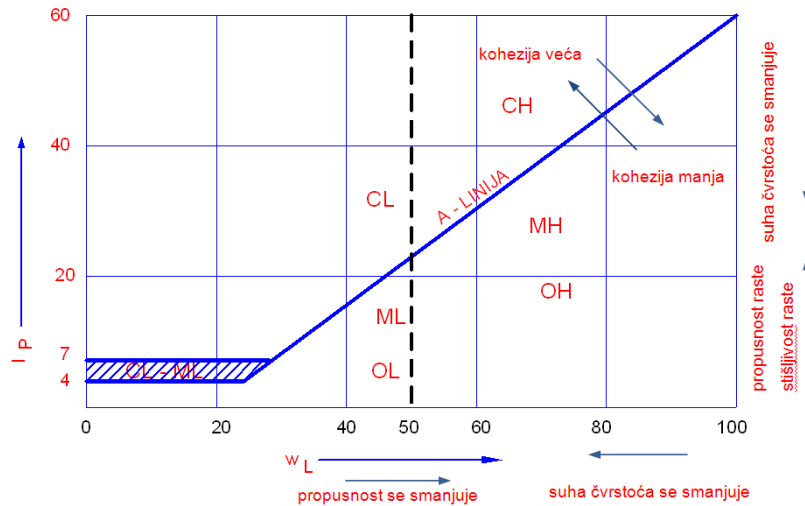
M – s prahom

Za sitnozrnat materijale:

H – visoko plastični ( $w_L > 50\%$ )

L – nisko plastični ( $w_L < 50\%$ )

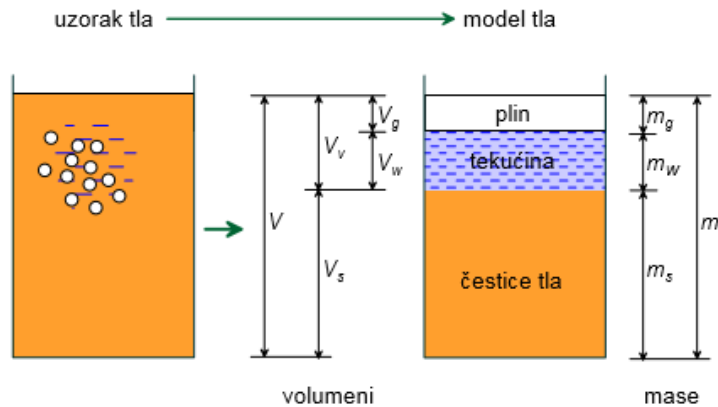




Slika 3. Dijagram plastičnost prema USCS [3]

### 2.3. Trodijelni sustav tla

Tlo je materijal koji se sastoji od tri komponente: čvrstih čestica te tekuće i plinovite faze u porama između čestica. Čestice tla su zrna i pločice vrlo različitih veličina, oblika i mineraloškog sastava. U ponašanju tla odražavaju se svojstva svih triju komponenti kao i njihove interakcije. Ponašanje takvog materijala je vrlo kompleksno, radi čega je neophodno proučiti karakteristike svake komponente, a zatim i njihovu interakciju. Radi jednostavnijeg definiranja odnosa komponenti u tlu uvodi se tzv. model tla uz pomoć kojega se kvantificiraju jedinični odnosi volumena i masa u uzorku tla. [3]



Oznake na slici su:

- $V$  – ukupni volumen uzorka (sve tri faze),  $[m^3]$ ,
- $V_v$  – volumen pora (engl. “voids”),  $[m^3]$ ,
- $V_s$  – volumen čvrstih čestica (engl. “solids”),  $[m^3]$ ,
- $V_g$  – volumen plina (engl. “gas”),  $[m^3]$ ,
- $V_w$  – volumen vode (engl. “water”),  $[m^3]$ ,
- $m$  – ukupna masa uzorka,  $[g]$ ,
- $m_g$  – masa plina,  $[g]$ , masu plina u praktičnim problemima zanemarujemo,
- $m_w$  – masa vode,  $[g]$  i
- $m_s$  – masa čvrstih čestica,  $[g]$ .

Slika 4. Model tla [3]

### Volumni odnosi

Definirani su slijedeći volumni odnosi (bezdimezionalne veličine, vrijednosti im se mogu izraziti i u postocima):

*relativni porozitet*  $n = \frac{V_v}{V}$  (izraz 1.)

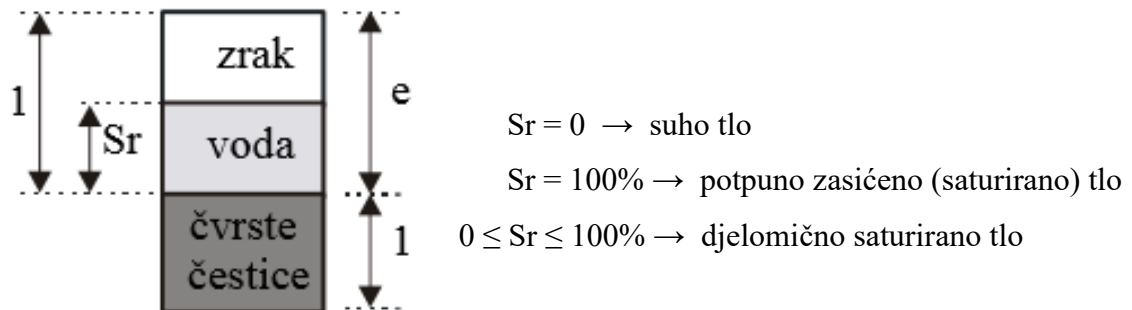
(raspon mu je između  $n_{\min} = 0,10$  i  $n_{\max} = 0,55$ )

*koeficijent pora*  $e = \frac{V_v}{V_s}$  (izraz 2.)

(raspon mu je između  $e_{\min} = 0,10$  i  $e_{\max} = 1,20$ )

stupanj zasićenosti

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} [\%] \quad (\text{izraz 3.})$$



Slika 5. Pojam stupnja zasićenja [1]

### Maseni odnosi

Masa je osnovno svojstvo materijala, dok je težina sila kojom tu masu privlači sila zemljine teže. Definirani su slijedeći odnosi masa ili maseni odnosi unutar uzorka tla:

### Vlažnost

Pore u tlu mogu biti djelomično ili potpuno ispunjene vodom. U prirodi su vrlo rijetka tla koja su potpuno suha tj. imaju samo zrak u porama. Vlažnost tla  $W$ , je omjer mase vode u odnosu na masu čvrstih čestica, u promatranoj zapremnini.

$$w = \frac{m_w}{m_s} * 100 [\%] \quad (\text{izraz 4.})$$

$$w = \frac{\text{težina vode}}{\text{težina čvrstih čestica}} = \frac{G_w}{G_s} * 100 [\%] \quad (\text{izraz 5.})$$

(vlažnost tla je obično  $w < 100 \%$ , ako je  $W = 0 \%$   $\rightarrow$  suho tlo)

Izražava se u postocima [%]. Promjenjiva je i pri stalnoj zapremnini, a što ovisi o stupnju zasićenja  $S_r$ . U slučaju potpuno zasićenog tla, vlažnost se može mijenjati samo kada dođe do promjene zapremnine, a da tlo pri tom ostane potpuno zasićeno. Prirodna vlažnost  $W_0$ , je ona vlažnost, koju tlo ima u prirodnom stanju. Određuje se u laboratoriju na uzorcima koji su tako pakovani da se nisu nimalo osušili u toku dopreme u laboratorij, ali ne moraju biti neporemećeni. Prirodna vlažnost određuje konzistentno stanje tla. [6]

Gustoće se izražavaju u jedinicama  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  ili  $[\text{Mg}/\text{m}^3]$ :

$$\text{gustoća tla} \quad \rho = \frac{m}{V} \quad (\text{izraz 5.})$$

$$\text{gustoća čvrstih čestica} \quad \rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (\text{izraz 6.})$$

$$\text{gustoća vode} \quad \rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (\text{izraz 7.})$$

$$\text{gustoća suhog tla } (S_r = 0) \quad \rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (\text{izraz 8.})$$

## 2.4. Granulometrijski sastav

Granulometrijski sastav tla prikazuje sadržaj čestica određene krupnoće u ukupnoj masi uzorka. Prikazuje se granulometrijskom krivuljom u polulogaritamskom mjerilu, kod kojeg je na osi apscisa promjer zrna  $D$  [mm] u logaritamskom mjerilu, a na osi ordinata prolazi kroz sito određenog otvora u postocima.

Pomoću svojstvenih točaka tj. promjera sita kroz koji prolazi određeni postotak zrna, određuju se svojstva granulometrijske krivulje. Ona se mogu izraziti pomoću efektivnog promjera zrna ( $D_{10}$ ), koeficijenta jednolikosti ( $C_u$ ) i koeficijenta zakrivljenosti ( $C_c$ ), koji se računaju iz promjera zrna:

$D_{10}$  - efektivni promjer zrna, promjer sita kroz kojeg prolazi posljednjih 10 % (težinski) ispitanog uzorka

$D_{30}$ ,  $D_{60}$  – promjer sita kroz kojeg prolazi 30 % odnosno 60 % ukupne količine uzorka

Na temelju tih promjera mogu se za svaku granulometrijsku krivulju odrediti koeficijent jednolikosti i koeficijent zakrivljenosti.

koeficijent jednolikosti  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$  (izraz 9.)

koeficijent zakrivljenosti (opisuje oblik krivulje)  $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}}$  (izraz 10.)

Ukoliko je tlo sastavljeno od isključivo od krupnozrnatog tla (šljunak i pijesak), provodi se analiza sisanja. Sitnozrno tlo nije moguće sijati da bi se dobila krupnoća čestica, već se ona određuje temeljem određivanja promjene gustoće suspenzije uslijed taloženja čestica različitih promjera u vremenu, u poznatoj tekućini. [6]

Postupci za određivanje granulometrijskog sastava su:

**Sisanje** – za čestice veće od 0,06 mm odnosno 0,075 mm

**Areometriranje** (sedimentiranje čestica u vodi) – za čestice manje od 0,06 mm odnosno 0,075 mm

**Kombinirana analiza** – ako materijal sadrži i krupne i sitne frakcije.

### 2.4.1. Sisanje

Provodi se suhim ili mokrim postupkom. Za sisanje se koristi niz (garnitura) sita standardnih dimenzija, čiji se otvori smanjuju na svakom slijedećem situ (odozgo prema dolje). Prilikom izvedbe suhog postupka uzme se određena količina materijala, uzorak (veličina uzorka ovisi o vrsti materijala i veličini zrna). Uzorak se usipa na najgrublje sito u nizu sita (koja su postavljena jedno iznad drugog) u treslicu. Sita s uzorkom se tresu 10 do 15 min. Nakon toga se važe ostatak na svakom situ, te materijal koji je prošao kroz najfinije sito (uhvaćen u zdjelu na dnu). Kroz sito s najvećim otvorima mora proći sav materijal (kako bi se znalo koje je maksimalno zrno).

Ako ima sitnijih frakcija nalijepljenih na krupna zrna primjenjuje se mokri postupak. Postupak je isti kao i suhi samo se na svakom situ materijal ispire, zatim suši i važe. Ovakvim ispitivanjem dobiva se tzv. efektivni promjer zrna (Slika 6.), jer zrno može biti pločasto ili izduženo. [3]



Slika 6. Efektivni promjer zrna [5]



Slika 7. Vrsta sita s obzirom na vrstu otvora [5]



Slika 8. Niz standardnih sita pričvršćenih na tresalicu [5]

## 2.4.2. Areometriranje

Areometriranje je metoda određivanja granulometrijskog sastava tla za materijal koji sadrži zrna manja od 0,06 mm (prah, glina). Budući da tako sitne čestice nije moguće sijati (nisu vidljive golim okom), veličina i postotak pojedinih frakcija određuju se indirektno, mjerenjem gustoće suspenzije u određenim vremenskim intervalima, primjenjujući tzv. Stokesov zakon. Stokesovim zakonom se definira brzina padanja zrnaca u mirnoj tekućini koja je to veća što su čestice krupnije. Drugim riječima, ako u vodu uspemo malu količinu materijala koji se sastoji od čestica različite veličine, krupnije čestice padat će brže, a sitnije sporije.

*Stokes-ov zakon glasi:* 
$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18 \cdot \eta} \cdot D^2$$
 (izraz 11.)

*Brzina se može pisati i kao:* 
$$v = \frac{H}{t}$$
 (izraz 12.)

*Izjednačavanjem tih dvaju izraza dobiva se:*

$$D_t = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot H}{(\rho_s - \rho_w) \cdot t}} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{(\rho_s - \rho_w)}} \cdot \sqrt{\frac{H}{t}} = const \cdot \sqrt{\frac{H}{t}} \quad (\text{izraz 13.})$$

gdje je:

v - brzina padanja čestice

Dt - promjer istaloženog zrna nakon vremena t

η - viskoznost vode na određenoj temperaturi (svojstvo materijala)

H - visina padanja zrna

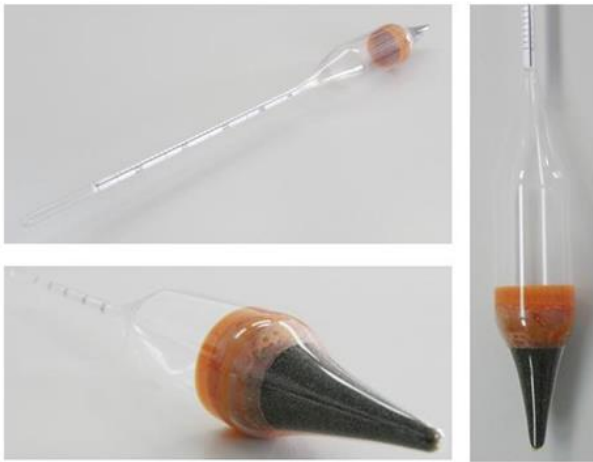
t – vrijeme

ρ<sub>s</sub> – gustoća čestica

ρ<sub>w</sub> – gustoća vode

Areometar (još ga nazivaju i hidrometar) mjeri gustoću na dubini gdje pluta njegovo težište. Gustoća suspenzije se očitava na vratu areometra, na mjestu gdje vrat areometra izviruje iz vode (skala u jedinicama gustoće).

Pokus teče tako da se u menzuru ulije destilirana voda i naspe materijal tla, koji se dobro natopi i dispergira u vodi pomoću miješalice. Vodi je dodan antikoagulans da spriječi koagulaciju, tj. nakupljanje manjih čestica u veće. Količina materijala tla ovisi o veličini čestica. Čestice tla padaju u suspenziji i talože se na dnu. Prije nego što padnu na dno prođu pored težišta areometra koje predstavlja «vrata» pri prolasku pored kojih se registrira promjena gustoće suspenzije, što se očita na vratu areometra u određenim vremenskim razmacima. [3]



Slika 9. Areometar [5]



Slika 10. Postupak areometriranja [5]

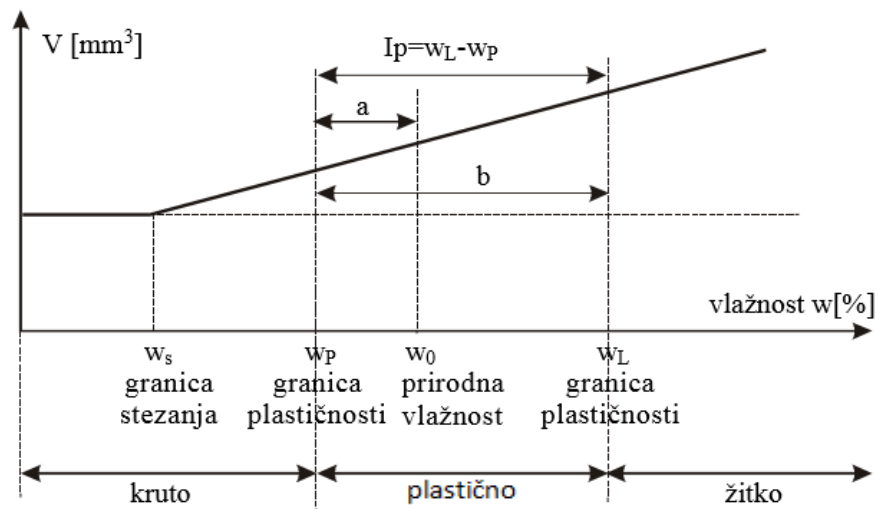
### 2.4.3. Kombinirana analiza

Prirodni materijali su često kombinacija krupnih i sitnih materijala, pa granulometrijsku krivulju, dobivenu sijanjem, treba nastaviti areometriranjem (za čestice manje od 0.06 mm, odnosno 0.075 mm). Kombinirana se analiza provodi ako više od 10% zrnaca prođe kroz sito s navedenim otvorima. [3]



## 2.5. Atterbergove granice ili granice plastičnosti

Granice plastičnosti su vlažnosti koje sitnozrni (koherentni) materijal ima u trenutku kada se ponaša na dogovoreni (standardizirani) način. Karl Atterberg je u svom radu iz 1911. godine vršio pokuse s ponašanjem raznih vrsta pečarskih i keramičarskih glina. Pri tim je pokusima ustanovio da se gline pri određenim vlažnostima ponašaju na određeni način. Povezao je vlažnost materijala i njegovo ponašanje i utvrdio da materijal povećanjem vlažnosti povećava zapreminu i pri tom mijenja svojstva plastičnosti. Također je utvrdio da materijal nakon određene granice, smanjenjem vlage ne gubi na zapremini. Na temelju tih granica se izvode indeksni pokazatelji. [1]



Slika 11. Atterbergove granice [1]

*Granica stezanja ( $w_s$ )*

*Granica plastičnosti ( $w_p$ )*

*Granica tečenja ( $w_L$ )*

### 2.5.1. Određivanje prirodne vlažnosti

Za određivanje prirodne vlažnosti koriste se posudice, koje prethodno treba izvagati i upisati vrijednosti u unaprijed napravljenu tablicu. Zatim u posudicu staviti određenu količinu vlažnog uzorka, koji se izvaže i suši do stalne mase uzorka tla, nakon čega se osušeni uzorak ponovo izvaže i na temelju dobivenih vrijednosti izračuna se postotak zatečene vlažnosti tla.

Pokus se vrši s dva uzorka tla, i nakon toga uzima se aritmetička sredina sadržaja vlažnosti za oba uzorka. Razlika vlažnosti ne smije biti veća od 2,0%.

## **2.5.2. Granica tečenja ( $w_L$ )**

Određena je sadržajem vlažnosti pri kojem će uzorak tla početi teći ako ga se potrese. Odnosno, granica tečenja predstavlja onaj sadržaj vode pri kome koherentni materijal tla prelazi iz tekućeg u plastično konzistentno stanje. Pomoću ovog pokazatelja sitnozrnata tla se mogu podijeliti na sljedeće osnovne grupe prema AC klasifikaciji:

$w_L < 20\%$  - neplastično

$20\% < w_L < 50\%$  - niska plastičnost

$w_L > 50\%$  - visoka plastičnost

### **2.5.2.1. Određivanje granice tečenja pomoću Casagrande-ova aparata**

Granica tečenja se određuje pomoću uređaja s pokretnom mjedenom zdjelicom standardiziranog oblika, tzv. Casagrande-ovog aparata. Pomoću ekscentra na osovini, zdjelica se podiže na visinu od  $1\text{ cm}$  s koje slobodno pada na podlogu. Na uzorku se načini standardizirani žlijeb posebnim nožem. Pokretana ručno ili automatski, zdjelica brzinom od 2 udarca u sekundi udara o podlogu, dok se žlijeb ne sastavi na duljini od  $13\text{ mm}$ . Broj udaraca ne smije biti manji od  $10$ , a ne veći od  $50$ .

### **2.5.2.2. Određivanje granice tečenja pomoću padajućeg šiljka**

Ova metoda koristi se za ispitivanje granice tečenja sitnozrnatih tla, a sastoji se u tome da se mjeri prodiranje šiljka u homogenizirani uzorak tla koji se nalazi u posudi standardizirane visine  $55\text{ mm}$ , kroz vrijeme od  $5\text{ sekundi}$ .

### 2.5.3. Granica plastičnosti ( $w_p$ )

Granica plastičnosti predstavlja onaj sadržaj vode kod kojeg sitnozrnata tla prelaze iz plastičnog u polučvrsto konzistentno stanje. Za određivanje granice plastičnosti nije potrebna aparatura. Kod određivanja granice plastičnosti od uzorka tla se oblikuje valjčić i rola sve dok se ne dobije valjčić promjera 3 mm. Kada se dosegne promjer od 3 mm, na valjčiću moraju biti vidljive dijagonalne pukotine. U slučaju da pukotina na valjčiću nema, postupak rolanja se ponavlja.

### 2.5.4. Indeksni parametri

Unutar dviju granica plastičnosti materijal se ponaša na određeni način, tj. ima određeno konzistentno stanje. Pod konzistentnim stanjem podrazumijeva se plastičnost tla u prirodnom stanju tj. s prirodnom vlažnosti ( $w_0$ ). Konzistentno stanje ovisno o prirodnoj vlažnosti, a može biti: čvrsto, polučvrsto, teško gnječivo, lako gnječivo i žitko. Odnosi prirodne vlage u tlu i opisanih granica plastičnosti mogu poslužiti za kvalitativan opis konzistentnog stanja tla.

Može se definirati:

$$\textit{indeks plastičnosti} \quad I_P = W_L - W_P \quad (\text{izraz 14.})$$

$$\textit{indeks konzistencije} \quad I_C = \frac{W_L - W_0}{I_P} \quad (\text{izraz 15.})$$

$$\textit{indeks tečenja} \quad I_T = \frac{W_0 - W_P}{I_P} \quad (\text{izraz 16.})$$

## 2.6. Proctor-ov pokus

Ovaj je pokus ključan za određivanje svojstava tla koje će biti ugrađeno u nasutu građevinu. Temelji se na određivanju zbijenosti u određenim uvjetima. Prije 1920. godine, ugradnja sitnozrnog tla temeljila se na iskustvu. Proctor (1933.) je utvrdio da zbijenost tla ovisi o energiji zbijanja i vlažnosti tla.

Uočio je da postoji vlažnost koja, za određenu energiju zbijanja, daje najveću moguću suhu gustoću tla, najveću moguću zbijenost. Tu je vlažnost nazvao „optimalna vlažnost“. Predložio je uređaj kojim se ispituje utjecaj tih dvaju parametara. Kao standardnu energiju zbijanja u laboratoriju izabrao je onu koja je bila usporediva energiji koju su građevinski valjci početka dvadesetog stoljeća mogli unijeti u tlo. Tako je nastao standardni Proctor-ov pokus. Kasnijim povećanjem strojeva za ugradnju i zbijanje tla na terenu, američko udruženje za ceste (AASHTO) oko 1950, uveo je modificirani Proctorov pokus kao pogodniji za tada modernu tehnologiju ugradnje tla pri izgradnji autoceste. U tom pokusu energija zbijanja povećana je približno 4,5 puta u odnosu na onu iz standardnog pokusa. Za ovaj pokus nisu potrebni neporemećeni uzorci tla.

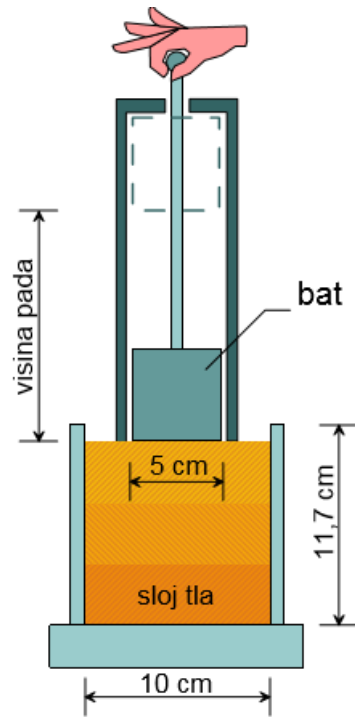
Pri razmatranju rezultata Proctor-ovog pokusa uočene su dvije činjenice:

- povećanjem energije zbijanja opada vrijednost optimalne vlažnosti
- nekoherentna tla pokazuju sasvim različito ponašanje od koherentnih, mnogo manje njihova zbijenost ovisi o vlažnosti.

Razlike u načinu izvođenja standardnog i modificiranog Proctor-ovog pokusa prikazane su u Tablici 5.

Tablica 5. Usporedba veličina standardnog i modificiranog Proctor-ovog pokusa.

| pokus        | broj slojeva | masa bata [kg] | visina pada bata [m] | broj udaraca po sloju | ukupna energija [kNm/m <sup>3</sup> ] | norma ispitivanja |
|--------------|--------------|----------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------|
| standardni   | 3            | 2,49           | 0,305                | 25                    | 592,7                                 | ASTM D698         |
| modificirani | 5            | 4,45           | 0,457                | 25                    | 2693                                  | ASTM D1557        |



Slika 12. Skica Proctorovog uređaja [1]

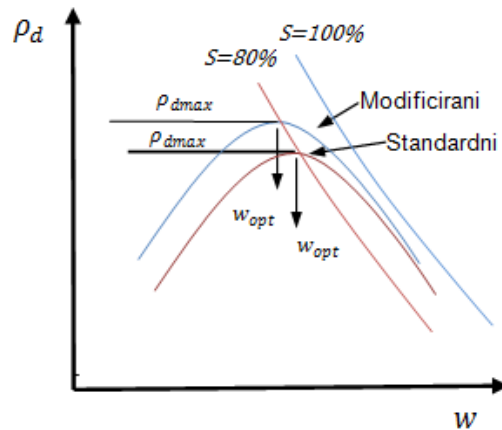


Slika 13. Proctor-ov uređaj



Slika 14. Kontrolna ploča na Proctor-ovom uređaju

Pri provedbi oba Proctor-ova pokusa, standardnog ili modificiranog, izvodi se uobičajeno pet pokusa zbijanja pri različitim vlažnostima, približno pri vlažnostima  $w_{opt} - 4\%$ ,  $w_{opt} - 2\%$ ,  $w_{opt} + 2\%$ ,  $w_{opt} + 4\%$ . Rezultati pokusa prikazuju se grafički.



Gdje je:

$\rho_d$  - suha gustoća

$w$  - vlažnost

Slika 15. Odnosi rezultata dobivenih Standardnim i Modificiranim Proctor-ovim pokusom (Prema Coduto 1999)

Optimalna vlažnost je veličina koja se stalno provjerava u razastrtom sloju prije zbijanja, jer ona osigurava postizanje maksimalno moguće zbijenosti za upotrijebljenu energiju zbijanja. Suha gustoća stalno se provjerava nakon zbijanja, jer ona pokazuje zbijenost ugrađenog tla. To je mjera kakvoće, koja mora zadovoljiti zahtjeve iz tehničkih uvjeta ugradnje tla u nasip. [1], [6]

### 2.6.1. Određivanje vrijednosti CBR-a (California Bearing Ratio)

Kalifornijski indeks nosivosti (CBR) je empirički pokus koji je prvi puta upotrijebljen u Kaliforniji, odakle mu i naziv. Koristi se za procjenu vrijednosti nosivosti prometnica, podloga i tampona. CBR je najrašireniji pokus u odnosu na ostale empiričke penetracijske testove. On je jedan od najprilagodljivijih jer se može koristiti na svim vrstama tla počevši od visokoplastične gline do materijala srednje veličine zrna.

Ovaj pokus je originalno smišljen kako bi omogućio korištenje racionalne metode za projektiranje fleksibilne podloge (makadam ili asfalt), ali da se može primijeniti za krute (beton) i zrnaste podloge. Podaci dobiveni CBR-om mogu se koristiti u projektiranju sletnih staza i običnih prometnica. Standardizirane projektne vrijednosti koriste inženjeri kako bi odredili debljinu konstrukcije koja odgovara vrijednosti CBR-a ovisno o vrsti prometnog opterećenja (avioni ili automobili). Pokus je relativno brz i jednostavan za rukovanje i odmah daje rezultate. Može se vršiti ispitivanje na ne poremećenim ili ponovno zbijenim materijalima te na terenu u malim pokretnim laboratorijima ili u glavnim laboratorijima. Zbijeni uzorci tla ispituju se na uređaju za CBR. [6]

Formula za izračun CBR vrijednosti:

$$CBR = \left( \frac{p}{p_n} \right) \cdot 100[\%]$$

gdje je:

$p$  - naprezanje koje je dobiveno ispitivanjem na odabranim uzorcima materijala  
[ $kN/cm^2$ ],

$p_n$ - standardno naprezanje za određene dubine prodiranja određeno normom  
[ $kN/cm^2$ ].

CBR vrijednost za određeni uzorak tla uvelike ovisi o suhoj gustoći i stupnju vlažnosti. Prilično je prikladno povezati vrijednosti CBR-a za zbijena tla s krivuljom vlažnosti i gustoće izvedene iz jednog standardnog testa zbijenosti (Proctor). Za određeni stupanj zbijenosti CBR vrijednost se smanjuje s povećanjem vlažnosti, a to smanjenje postaje veće iznad optimalne vrijednosti. Brzina smanjenje je posebno oštra za nevezana tla.



- 1 - Prekidač za podizanje ili spuštanje postolja,
- 2 – Pokretno postolje za nanošenje sile,
- 3 - Klip kružnog presjeka,
- 4 - Mikroura za očitavanje dubine prodora klipa,
- 5 – Prsten dinamometra poznate konstante elastičnosti,
- 6 - Mikroura za očitavanje deformacije prstena.

Slika 16. Uređaj za CBR pokus u laboratoriju

Rezultati se prikazuju u dijagramu opterećenje  $p$  [ $\text{kN}/\text{cm}^2$ ], prodiranje klipa [mm].

Tablica 6. Orijentacione vrijednosti CBR-a prema vrstama tla. [5]

| vrsta tla     | min CBR [%] |
|---------------|-------------|
| sitnozrno tlo | 5-7         |
| pijesak       | 8-12        |
| šljunak       | $\geq 15$   |

CBR se izvodi u laboratoriju i na terenu.





Slika 17. Oprema za CBR  
pokus na terenu [6]

### 3. PRAKTIČNI DIO

Tijekom izvedbe terenskih istražnih radova uzimaju se uzorci tla za laboratorijska ispitivanja. Uzorci mogu biti poremećeni (ako ih se ispituje samo zbog klasificiranja tla) i neporemećeni, ako treba odrediti svojstva koja su ovisna o strukturi tla, kao što su vodopropusnost, deformabilnost i čvrstoća a uzimaju se prema unaprijed utvrđenom programu te se dalje ispituju u geomehaničkom laboratoriju.

Iz iskopanog materijala ili izvađene jezgre prilikom bušenja, uzimaju se poremećeni uzorci. Neporemećeni se uzorci iz bušotina uzimaju posebnim priborom. Iz jama, bunara i potkopa uzimaju se kocke pažljivo iskopanog materijala na način da se gotovo uopće ne poremeti njihova prirodna struktura. Poremećeni se uzorci pakiraju samo u plastične, dobro zatvorene omote. Neporemećeni uzorci se pažljivo pakiraju u parafin i plastične košuljice, da bi zadržali prirodnu vlagu. Takve uzorke potrebno je čuvati u prostoru kontrolirane vlažnosti i temperature (vlažna komora), a isto tako ih pažljivo transportirati do laboratorija.

Za klasifikaciju tla te ispitivanje optimalne vlažnosti i CBR vrijednosti tla, što je ujedno i tema ovog završnog rada, nije potrebno da uzorak bude neporemećen. [1], [3]

Ova laboratorijska ispitivanja provedena su prema važećim normama za geomehanička ispitivanja HRN, ASTM, BS. Klasifikacija tla provedena je prema USC sustavu, ali prema graničnim veličinama zrna podjele po MIT-u.

## **3.1. Određivanje vlažnosti uzorka tla**

### **3.1.1. Norma**

Određivanje vlažnosti tla uzorka prema normi ASTM D2216.

### **3.1.2. Namjena**

Ovo ispitivanje se provodi u svrhu određivanja sadržaja vode u tlu (odnosno vlažnosti tla). Vlažnost tla se definira kao odnos mase porne vode (vode koja ispunjava pore tla) i mase čvrste faze tla (mase čvrstih čestica tla).

### **3.1.3. Značajke**

Za mnoga tla sadržaj vode može biti vrlo važan podatak, kojim se uspostavlja odnos između ponašanja tla i njegovih karakteristika. Konzistencija sitnozrnog tla uvelike ovisi o vlažnosti tla. Sadržaj vode u tlu se također koristi u izražavanju faznih odnosa u određenom volumenu tla (zrak, voda i čvrste čestice).

### **3.1.4. Oprema**

Posudice, laboratorijska žlica, špahtla, sušionik, vaga.

### **3.1.5. Procedura ispitivanja**

- 1) Odrediti i zabilježiti masu prazne posudice i zapisati njezin laboratorijski broj. Posudica mora biti prethodno očišćena i osušena ( $M_p$ ).
- 2) Staviti uzorak tla u posudicu. Izvagati i zabilježiti masu posudice, zajedno s vlažnim uzorkom tla ( $M_{p1}$ ).
- 3) Staviti posudicu s vlažnim uzorkom tla u sušionik, u kojem je namještena temperatura od 105 °C. Posudica zajedno s uzorkom se suši u sušioniku do stalne mase uzorka (obično do sljedećeg dana).
- 4) Izvaditi posudicu s uzorkom iz sušionika i pričekati da se laboratorijska posudica i suhi uzorak tla ohlade na sobnu temperaturu. Izvagati i zabilježiti masu laboratorijske posudice zajedno sa suhim uzorkom tla ( $M_{p2}$ ).
- 5) Isprazniti i očistiti posudicu.

### 3.1.6. Rezultati

1) Masa čvrstih čestica tla:

$$M_d = M_{p2} - M_p$$

2) Masa porne vode:

$$M_w = M_{p1} - M_{p2}$$

3) Vlažnost tla:

$$w = \frac{M_w}{M_d} \cdot 100 \quad [\%]$$

## 3.2. Ispitivanje gustoće čvrstih čestica tla

### 3.2.1. Norma

Određivanje specifične gustoće tla korištenjem piknometra prema normi ASTM D854.

### 3.2.2. Namjena

Ovo ispitivanje se provodi u svrhu određivanja specifične gustoće tla korištenjem piknometra. Specifična gustoća je omjer mase suhog uzorka tla u odnosu na masu istisnute vode, pomnoženo s gustoćom vode.

### 3.2.3. Značajke

Specifična gustoća tla se koristi kod određivanja odnosa faza u tlu za određeni volumen tla.

### 3.2.4. Oprema

Piknometar, vaga, lijevak, laboratorijska žlica.

### 3.2.5. Procedura ispitivanja

1) Odrediti i zabilježiti masu praznog, suhog i čistog piknometra ( $M_p$ ).

- 2) Staviti oko 10grama prosijanog uzorka tla u piknometar. Odrediti i zabilježiti masu piknometra sa suhim uzorkom tla ( $M_1$ ).
- 3) Dodati destilirane vode da popuni oko 1/2 do 3/4 piknometra. Uzorak ostaviti potopljen 10 minuta.
- 4) Izmjeriti temperaturu vode (T) kod ispitivanja.
- 5) Ispuniti piknometar destiliranom vodom do oznake. Suhom krpom obrisati vanjsku površinu piknometra. Odrediti masu piknometra sa sadržajem ( $M_2$ ).
- 6) Piknometar se stavlja u vrući pijesak i omogućiti se da sadržaj piknometra lagano vrije kako bi se istisnuo sav zrak iz pora.
- 7) Isprazniti piknometar i očistiti ga. Zatim ga napuniti samo destiliranom vodom do oznake. Suhom krpom obrisati vanjsku površinu piknometra. Odrediti masu piknometra s vodom ( $M_3$ ).
- 8) Isprazniti piknometar i očistiti ga.

### 3.2.6. Rezultati

- 1) Izračunati gustoću čestica tla bez pora na temperaturi T, koristeći jednadžbu:

$$\rho_{sT} = \frac{M_s}{M_{ws}} \cdot \rho_{wT} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

gdje je:  $M_s$  - masa suhog uzorka,

$M_{ws}$  - masa istisnute vode,

$\rho_{wT}$  - gustoća vode.

- 2) Izračunati korigiranu gustoću zbog temperature:

$$\rho_{s(20^\circ\text{C})} = \rho_{sT} \cdot K_T \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

gdje je:  $K_T$  - koeficijent korekcije zbog temp. vode T (čita se iz tablice).

- 3) Izračunati specifičnu težinu:

$$\gamma_s = g \cdot \rho_{s(20^\circ\text{C})} \text{ [kN/m}^3\text{]}$$

gdje je:  $g$  - gravitacija ( $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ ).

### **3.3. Granulometrijska analiza (sijanje i areometriranje)**

#### **3.3.1. Norma**

Određivanje granulometrijskog sastava tla prema normi HRS CEN ISO/TS 17892-4.

#### **3.3.2. Namjena**

Ovaj test se provodi kako bi se odredio postotak zrna različitih veličina sadržanih unutar uzorka tla. Sijanje se obavlja kako bi se utvrdila raspodjela krupnijih čestica (šljunak i pijesak), a areometriranje kako bi se utvrdila raspodjela sitnih čestica (prah i glina).

#### **3.3.3. Značajke**

Distribucija zrna različitih veličina utječe na inženjerska svojstva tla.

Granulometrijskom analizom određuju se veličine čestica, što je važno za klasifikaciju tla.

#### **3.3.4. Oprema**

Vaga, set sita, četka za čišćenje, tresaljka, mikser, areometar, cilindar za sedimentiranje, termometar, štoperica.

#### **3.3.5. Procedura ispitivanja**

##### a) Sijanje

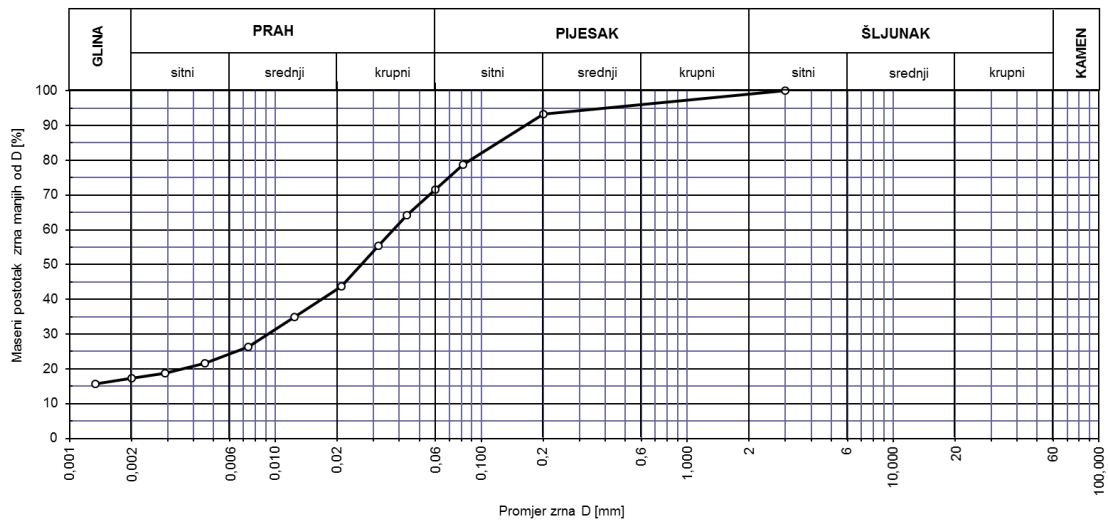
- 1) Izvagati i zapisati težinu svakog sita i posude u koju se skuplja uzorak koji prođe kroz sva sita.
- 2) Izvagati suhi uzorak koji ide na granulometrijsku analizu i tako odrediti njegovu masu.
- 3) Sva sita moraju biti očišćena od prethodnih ispitivanja. Sita je potrebno složiti jedno na drugo, krenuvši od najfinijeg prema najgrubljem.  
Ispod najfinijeg sita još dolazi posuda u koju se skuplja uzorak koji prođe kroz sva sita. Pažljivo sipati uzorak u set sita i staviti poklopac.
- 4) Smjestiti set sita na mehaničku tresaljku i nakon uključenja tresaljke ostaviti da se trese 10 minuta.
- 5) Skinuti sita s tresaljke i pažljivo vagati i zapisivati svako sito s ostatkom. Ne zaboraviti vagnuti posudu u koju se skupio najfiniji dio uzorka.

## b) Areometriranje

- 1) Uzeti uzorak koji se skupio u posudi na dnu kod procesa sijanja, staviti ga u pehar i dodati destilirane vode i nekog kemijskog reagensa (antikoagulansa) koji pospješuje raspršivanje čestica (npr. natrij-heksametafosfat ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>). Promiješati smjesu kako bi uzorak bio potpuno mokr. To traje oko 10 minuta.
- 2) Prije samog postupka areometriranja potrebno je napraviti korekciju areometra i termometra u kontrolnom cilindru, kako bi se kasnije u analizi rezultati mogli korigirati.
- 3) Uzorak koji je prethodno pomiješan s destiliranom vodom i antikoagulansom preliterati u mikser i dodati još destilirane vode ako je potrebno, tako da posuda u kojoj se miješa bude barem do pola puna. Uključiti mikser i ostaviti da se miješa dvije minute.
- 4) Odmah nakon miješanja u mikseru, uliti uzorak u cilindar za sedimentiranje. Dodati destilirane vode do oznake na cilindru.
- 5) Zatvoriti otvoreni kraj cilindra čepom i sve još osigurati tako da se dlan ruke stavi na čep. Drugom rukom primiti dno cilindra i okrenuti ga naopako i opet uspraviti. Ovaj postupak ponoviti oko 30 puta u roku od jedne minute.
- 6) Spustiti cilindar na stol i pokrenuti mjerenje vremena. Skinuti čep s cilindra, pažljivo u disperziju spustiti areometar (hidrometar) i pripremiti se za prvo mjerenje. (Umetanje areometra bi trebalo trajati oko 10 sekundi, s tim da treba minimizirati svaki poremećaj. Otpuštanje areometra iz ruke bi trebalo biti približno na dubini prvog čitanja, kako bi se izbjeglo nepotrebno stvaranje mjehurića).
- 7) Čitanje se vrši na vrhu meniskusa koji se stvori na kontaktu između suspenzije i areometra. Nakon posljednjeg čitanja, areometar lagano izvaditi i prebaciti u kontrolni cilindar gdje se vrtnjom očisti od čestica koje su se uhvatile za njegove stijenke.
- 8) Areometarska očitavanja vrše se nakon 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 15 min, 45 min, 2 h, 5 h i 24 h od početka sedimentiranja.

### 3.3.6. Rezultati

Rezultati ispitivanja prikazuju se u obliku granulometrijske krivulje u polulogartamskom dijagramu dje je na osi x u logaritamskom mjerilu promjer zrna u milimetrima, a na osi y postotni prolaz materijala kroz sito određenog otvora (Slika 18.). ispitivani materijal klasificiran je prema USC sustavu kao glina s pijeskom koja sadrži 28 % pijeska, 55 % praha i 17 % čestica manjih od 0,002 mm (glina).



Slika 18. Granulometrijski dijagram ispitivanog uzorka tla

## 3.4. Određivanje konzistencije tla – Atterbergove

### 3.4.1. Norma

Određivanje granice tečenja, granice plastičnosti i indeksa plastičnosti ( $I_p$ ) tala prema normi BS 1377 : Part 2.

### 3.4.2. Namjena

Ovo ispitivanje se provodi kako bi se odredile granica plastičnosti i granica tečenja sitnozrnatog tla. Granica tečenja ( $w_L$ ) je definirana kao vlažnost izražena u postocima, kod koje dolazi do prelaska materijala iz plastičnog u tekuće stanje. To se ispituje pomoću dvije metode: Casagrande-ovim aparatom ili padajućim šiljkom. Uzorak se ugradi u Casagrande-ov aparat i u njega se ureže propisani utor. Nakon toga se ručica aparata vrti brzinom od 20kretna u sekundi, prilikom čega posudica aparata s ugrađenim uzorkom pada s visine od 10 mm.

Nakon 25 udaraca utora u uzorku bi se trebao spojiti u dužini od 13 mm, ako uzorak ima vlažnost na granici tečenja. Kod ispitivanja statičkim laboratorijskim penetrometrom, uzorak ima vlažnost na granici tečenja ako šiljak penetrometra utone u uzorak 20 mm za vrijeme prodiranja od 5 s. Granica plastičnosti ( $w_p$ ) je definirana kao vlažnost izražena u postocima, kod koje uzorak tla prelazi iz plastičnog u polučvrsto konzistentno stanje. Određivanje granice plastičnosti vrši se valjanjem valjčića od materijala iz uzorka. Da bi uzorak imao vlažnost na granici plastičnosti, valjčići moraju imati promjer od 3 mm, pri čemu se na njima moraju pojaviti pukotine izazvane stezanjem materijala zbog gubitka vlažnosti.

### **3.4.3. Značajke**

Švedski znanstvenik Albert Atterberg je originalno definirao sedam „granica konzistencije“, pomoću kojih je klasificirao sitnozrna tla. U današnjoj inženjerskoj praksi se koriste samo dvije osnovne granice konzistencije: granica tečenja i granica plastičnosti (ponekad je u upotrebi i granica stezanja tla ( $w_s$ )). Atterberg-ove granice se određuju na temelju vlažnosti, odnosno sadržaju vlage u tlu. Granica plastičnosti je vlažnost koja definira graničnu vrijednost vlažnosti kod koje tlo prelazi iz polučvrstog u plastično stanje. Granica tečenja je vlažnost koja je definirana kao granična vrijednost vlažnosti kod koje tlo prelazi iz plastičnog u viskozno, odnosno tekuće stanje. Granica stezanja ( $w_s$ ) je vlažnost kod koje tlo ima minimalni volumen, koji se ne može više smanjivati iako je moguć daljnji pad vlažnosti tla. Veliki broj inženjerskih svojstava tla je koreliran prema granici tečenja i granici plastičnosti.

### **3.4.4. Oprema**

Casagrande-ov aparat ili statički laboratorijski penetrometar (padajući šiljak), tarionik, nož za Casagrande-ov aparat, 8 posudica, vaga, staklena radna ploča, laboratorijska žlica, posuda s destiliranom vodom, sušionik namješten na temperaturu od 105 °C.

### **3.4.5. Procedura ispitivanja**

a) Određivanje prirodne vlažnosti tla ( $w_0$ )

- 1) Tlo se prosije kroz sito veličine otvora 0,5 mm kako bi se uklonili mogući kamenčići. Izvažu se dvije posudice, te se njihov broj i masa zapisuju u tablicu koja se nalazi na obrascu za laboratorijska ispitivanja.
- 2) Nakon toga se u posudicu stavlja određena količina uzorka, izvažuje i stavlja u sušionik na sušenje. Posudice s uzorkom se suše do stalne mase uzorka tla.



- 3) Posudice se vade iz sušionika i pričekaju se da se ohlade na sobnu temperaturu. Izvažu se posude i uzorci, a podaci se zapisuju u tablicu.
- 4) Dobivene vrijednosti koriste se za izračunavanje zatečene vlage u uzorku, nakon čega se posudice prazne, čiste i pripremaju za daljnja ispitivanja.

b) Određivanje granice tečenja Casagrande-ovim aparatom

- 1) Nakon što se uzorak prosije kroz sito veličine otvora 0,5 mm, miješa se sa određenom količinom destilirane vode, te se homogenizira dok se ne dobije glatka masa.
- 2) Izvažuje se prazna posudica, te se njena oznaka i masa zapisuju u tablicu.
- 3) Provjerava se da li visina pada mjedene posude na postolje Casagrande-ovog aparata odgovara visini od 10 mm. Na nožu za Casagrande-ov aparat, kojim se urezuje utor, nalazi se posebni dio čija visina iznosi 10 mm, pa se pomoću tog dijela podešava visina pada mjedene posude. Širina dijela za urezivanje je 2 mm. Potrebno je uvježbati brzinu okretanja ručice aparata, koja približno mora biti 20 okretaja u sekundi.
- 4) U zdjelicu se razmaže prethodno homogeniziran vlažan uzorak tla, koji se mora dobro pritisnuti u posudu da bi se eliminirali eventualni mjehurići zraka. Uzorak u posudi mora biti horizontalan dok dubina na najdubljem dijelu posude ne smije prelaziti 10 mm.
- 5) U tako postavljen uzorak se po sredini zarezuje normiran žlijeb nožem posebna oblika, pri čemu nož treba držati stalno okomito na dno zdjelice, tako da širina žlijeba na dnu stalno iznosi 2 mm. Posebno je potrebno pripaziti da se uzorak ne pomiče prilikom urezivanja brazde. Tako je uzorak u mjedenoj zdjelici podijeljen na dvije polovice.
- 6) Slijedeći korak je provjera da li je postolje ispod Casagrande-ove posude (aparata) i sam vanjski dio posude (aparata) očišćen od tla. Tada se okreće ručka aparata brzinom od dva udarca u sekundi, čime se žlijeb urezan u masu postepeno zatvara i tako sve dok se žlijeb na dnu zdjelice ne zatvori u duljini od 12 do 13 mm. Ukoliko broj udaraca prođe 50, tada se ide na korak broj 8 i ne zapisuje se broj udaraca.
- 7) Uzme se laboratorijska žlica, te se od jednog do drugog kraja posude povuče kako bi se uzeo uzorak iz posude. Uzorak mora biti uzet s obje strane brazde na mjestu kontakta. Uzeti uzorak se stavlja u prethodno izvaganu posudicu (korak

broj 2), te se ta posudica sa uzorkom ponovo važe i stavlja u sušionik na sušenje, do stalne mase uzorka. Preostali dio uzorka se izvadi iz posude aparata te se posuda očisti i osuši, kao i cijeli aparat.

- 8) Ponovno se promiješa cijeli uzorak i dodaje se mala količina destilirane vode da bi se povećala vlažnost, tako da se smanji broj udaraca potrebnih za zatvaranje utora.
- 9) Postupak se ponavlja više puta tako da se kod svakog ispitivanja dobije manji broj udaraca. Jedno ispitivanje mora imati zatvaranje utora od 25 do 35 udaraca, drugo od 20 do 30 udaraca, a treće između 15 i 25 udaraca. Za svaki postupak se određuje vlažnost kao i kod koraka 7.

c) Određivanje granice tečenja padajućim šiljkom

- 1) Nakon što se uzorak prosije kroz sito veličine otvora 0,5 mm, miješa se sa određenom količinom destilirane vode, te se homogenizira dok se ne dobije glatka masa.
- 2) S homogeniziranim uzorkom se popuni posudica statičkog laboratorijskog penetrometra, dobro se utisne materijal pazeći da se uklone svi mogući mjehurići zraka, odreže se višak ravnim vrhom kako bi se dobila ravna i glatka površina.
- 3) Sa podignutim i zakočenim penetracijskim stošcem, pusti se potporni sklop tako da vrh stošca jedva dodiruje površinu uzorka u čaši. Kad je stožac na mjestu, laganim pomicanjem čaše vrh stošca mora iscrtavati tanku liniju na površini uzorka.
- 4) Spusti se šipka mjernog brojila tako da se ostvari dodir sa osovinom stošca i dobije očitavanje, te ga se zabilježi. Uzme se štoperica u ruku i uhvati kočnica sklopa drugom rukom.
- 5) Otpusti se stožac, ako aparatura nema automatski uređaj za otpuštanje i ostavi da stožac 5 sekundi prodire u uzorak.
- 6) Nakon 5 sekundi zakoči se stožac na novoj, nižoj poziciji, spusti se šipka mjernog brojila opet tek toliko da jedva dođe u dodir s osovinom stošca, te se zabilježi ovo novo očitavanje do točnosti 0,1 mm.
- 7) Stožac se podigne i pažljivo očisti, kako bi se izbjeglo grebanje. Tada se uzme novi uzorak tla i ponovi se ispitivanje.

- 8) Ako je razlika između prvog i drugog prodiranja manja od 0,5 mm zabilježi se prosjek ta dva prodiranja.
- 9) Ako je drugo prodiranje veće od 0,5 mm i manje od 1 mm razlike od prvog, obavlja se treće ispitivanje. Ako ukupni raspon i tada nije veći od 1 mm zabilježi se prosjek tri penetracije.
- 10) Ako je ukupni prosjek veći od 1 mm, odstranjuje se tlo iz čaše, ponovo ga se promiješa i ponavlja se postupak dok se ne dobiju jednolični rezultati. Iz čaše oko područja u koje je penetrirao stožac uzme se oko 10 grama uzorka i stavlja ga se na sušenje do stalne mase, kako bi se ispitao sadržaj vlage.
- 11) Prethodne točke ispitivanja se ponavljaju još najmanje tri puta i pritom se koristi isti uzorak tla u koji su se dodavale različite količine destilirane vode. Nastavlja se od sušeg prema vlažnijem stanju. Količina vode mora biti tolika da dobiveni raspon vrijednosti prodiranja bude približno od 15 do 25 mm i da tijekom četiri ili više ispitivanja bude jednoliko raspoređen.
- 12) Svaki put kad se uzorak odstranjuje iz čaše zbog dodavanja vode, čašu i stožac treba temeljito očistiti. Ako se iz bilo kojeg razloga uzorak ostavlja u čaši, treba prekriti vlažnom krpom da se spriječi isušivanje.

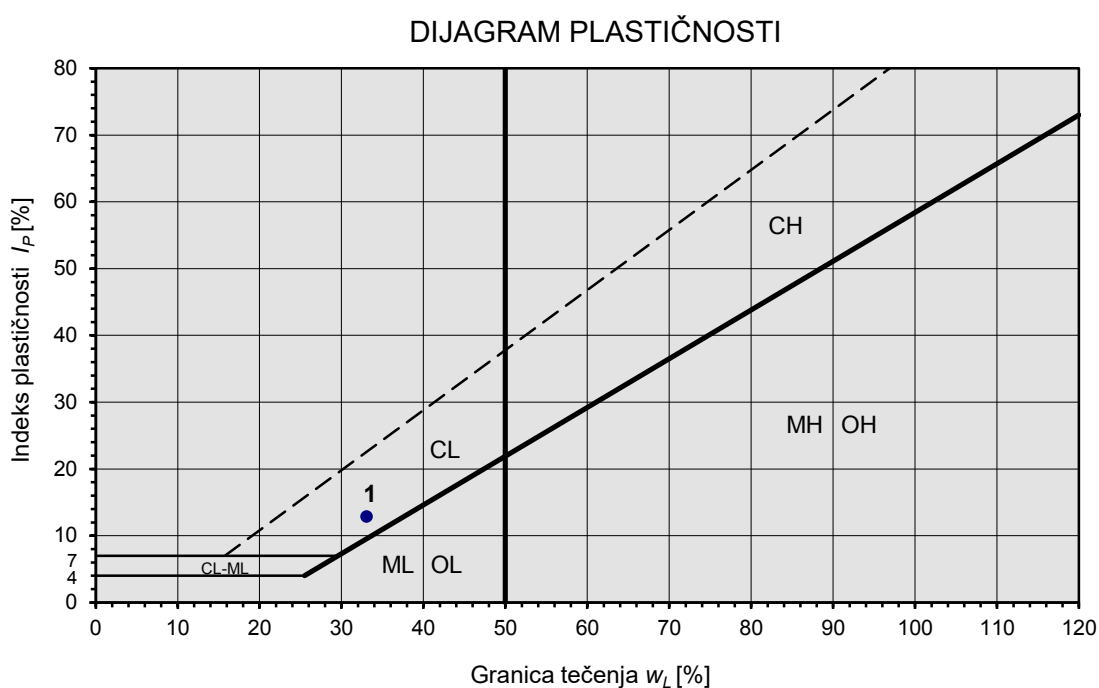
#### d) Određivanje granice plastičnosti

- 1) Izvažuju se prazne posude sa poklopcima i vrijednosti se unesu u tablicu.
- 2) Uzorak tla se pomiješa sa destiliranom vodom dok ne postigne konzistenciju u kojoj se može valjati bez lijepljenja za dlan.
- 3) Tlo se oblikuje u valjčice i valja se dlanovima. Koristi se određeni pritisak sa 90 poteza u minuti da se dobije valjčić ujednačenog promjera. Valjčić mora biti promjera 3 mm, za što je potrebno oko dvije minute.
- 4) Kada promjer valjčića dosegne propisanu vrijednost, valjčić se izlomi na više komada. Ti dijelovi se opet gnječe i valjaju u valjčić. Ovaj postupak se nastavlja dok se ne smrvi zbog pritiska potrebnog za daljnje valjanje ili dok se više ne može valjati u valjčice debljine 3 mm.
- 5) Sakupe se razmravljeni dijelovi valjčića, zajedno ih se stavi u posudu i važe, zapisuje se masa, te se posuda sa valjčićima stavlja na sušenje do stalne mase uzorka.

- 6) Koraci 3, 4 i 5 ponavljaju se najmanje 2 puta. Određuje se vlažnost iz svakog ispitivanja, koristeći prethodno opisani postupak. Za svako vaganje koristi se ista vaga.

### 3.4.6. Rezultati

Rezultati ispitivanja vlažnosti na granici tečenja i granici plastičnosti poslužili su za izračunavanje indeksa plastičnosti i provedbu klasifikacije tla prema USC sustavu. Slika 19. prikazuje položaj točke ispitivanog uzorka tla na dijagramu plastičnosti koja se nalazi u području gline niske plastičnosti (CL). Koordinate točke 1 su vrijednost granice tečenja po osi x (33,1 %) i vrijednost indeksa plastičnosti po osi y (12,8 %).



Slika 19. Dijagram plastičnosti ispitivanog uzorka tla

## **3.5. Određivanje optimalne vlažnosti pri standardnoj energiji zbijanja po Proctor-u**

### **3.5.1. Norma**

Optimalna vlaga na uzorcima određena je prema normi HRN EN 13286 – 2.

### **3.5.2. Namjena**

Ovaj laboratorijski test izvodi se kako bi se utvrdio odnos između sadržaja vlage i suhe gustoće tla pri određenom stupnju zbijenosti. Stupanj zbijenosti predstavlja određenu količinu mehaničke energije koja se primjenjuje za zbijanje uzorka tla.

### **3.5.3. Značajke**

Zbijenost tla ovisi o energiji zbijanja i vlažnosti tla. O zbijenosti ovise svojstva bitna za stabilnost pokosa, nosivost, stišljivost nasipa.

### **3.5.4. Oprema**

Špahtla, posudice, vaga, sušionik, Proctor-ov uređaj, cilindrični kalup.

### **3.5.5. Procedura ispitivanja**

- 1) Pripremiti uzorke s različitom količinom vode te ostaviti 24 sata da odstoje u posudama.
- 2) Nakon 24 sata potrebno je uzorke homogenizirati. Postupak ponoviti za svaki uzorak.
- 3) Vrlo je važno da prilikom postavljanja samog cilindra na uređaj, cilindar bude dobro pričvršćen kako ne bi došlo do oštećenja klipa. Tlo određene vlažnosti ugrađuje se zbijanjem u slojevima u cilindrični kalup unutrašnjeg promjera 10,2 cm, visine 11,75 cm i zapremnine 994 cm<sup>3</sup>. Zbija se pomoću određenog broja udaraca slobodno padajućeg bata promjera 5,1 cm, zadane mase, sa zadane visine.
- 4) Zbijanje se ponavlja za svaki sloj.
- 5) Tako zbijenom uzorku se odredi suha gustoća  $\rho_d$ . Pokus se ponavlja nekoliko puta pri različitim vlažnostima tla  $w$ , da bi se dobio utjecaj vlažnosti na veličinu suhe gustoće zbijenog tla, kao mjere zbijenosti.
- 6) Nakon provedbe pokusa potrebno je za svaki uzorka uzeti uzorke koji se stave u posudice te u sušionik kako bi se odredila vlažnost  $w$ .



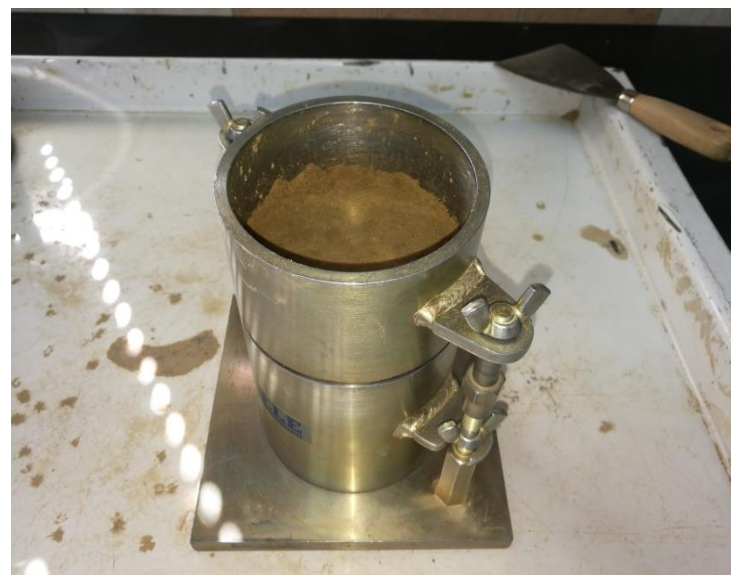
Slika 20. Priprema za izvođenje Proctor-ovog pokusa



Slika 21. Punjenje cilindričnog klipa s uzorkom



Slika 22. Zbijanje uzorka tla



Slika 23. Zbijen uzorak tla



Slika 24. Vaganje zbijenog uzorka tla s kalupom



Slika 25. Vađenje zbijenog uzorka tla iz kalupa

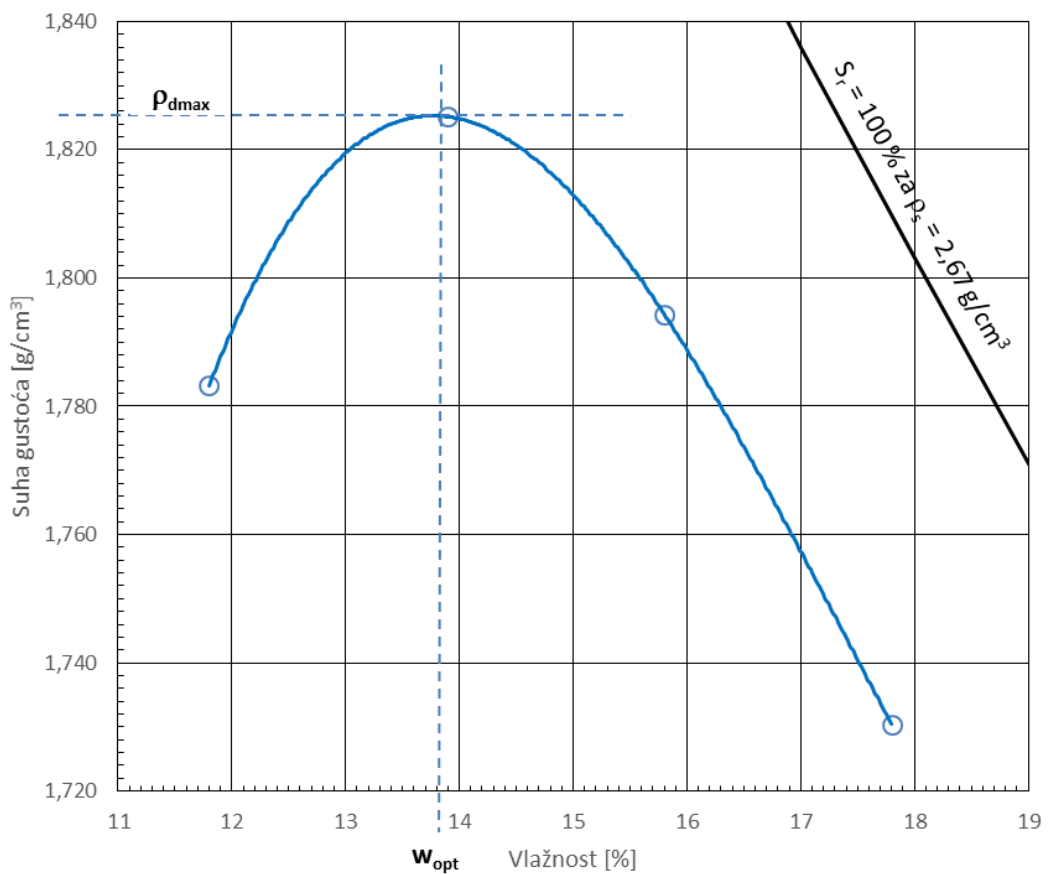


Slika 26. Uzimanje uzorka za određivanje vlažnosti

### 3.5.6. Rezultati

Tablica 7. Prikaz rezultata provedenih ispitivanja po standardnom Proctor-ovom postupku.

| Broj probe                               | 1      | 2      | 3      | 4      |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Masa cilindra [g]                        | 4397,4 | 4397,4 | 4397,4 | 4397,4 |
| Masa cilindra i vlažnog tla [g]          | 6278,8 | 6359,2 | 6358,3 | 6321,0 |
| Masa vlažnog tla [g]                     | 1881,4 | 1961,8 | 1960,9 | 1923,6 |
| Gustoća vlažnog tla [g/cm <sup>3</sup> ] | 1,994  | 2,079  | 2,078  | 2,038  |
| Vlažnost [%]                             | 11,8   | 13,9   | 15,8   | 17,8   |
| Gustoća suhog tla [g/cm <sup>3</sup> ]   | 1,783  | 1,825  | 1,794  | 1,730  |



Slika 27. Grafička interpretacija rezultata ispitivanja



Dobivene vrijednosti suhe gustoće i pripadajuće vlažnosti povezuju se glatkom krivuljom. Određivanje optimalne vlažnosti izvodi se grafičkim postupkom. Na tjemenu krivulje se po osi x očitava optimalna vlažnost, a po osi y pripadajuća najveća suha gustoća. Iz dijagrama se očitava optimalna vlažnost od 13,8 % i pripadajuća najveća suha gustoća od 1,825 g/cm<sup>3</sup>.

Na Slici 27. prikazana je i krivulja potpunog zasićenja. Ona povezuje suhu gustoću s vlažnosti kada su sve pore ispunjene vodom ( $S_r = 100\%$ ). Točke krivulje se za poznatu gustoću čvrstih čestica tla računaju prema izrazu:

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + \frac{w}{S_r} \rho_s} \rho_w$$

## **3.6. Određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti s bubrenjem**

### **3.6.1. Norma**

Kalifornijski indeks nosivosti ili CBR vrijednost određena je prema normi HRN EN 13286 – 47:2004 na homogeniziranom uzorku kod optimalne vlage i zbijenom sa standardnom energijom po Proctor-u..

### **3.6.2. Namjena**

Posebno je namijenjen za ispitivanju posteljice (podloge u kolničkoj konstrukciji) kod dimenzioniranja savitljivih (asfaltnih) zastora, a koristi se i za ispitivanje stabiliziranog tla općenito.

### **3.6.3. Značajke**

Optimalna vlaga dobivena ispitivanjem prema Proctor-ovom postupku bitna je za određivanje vrijednosti Kalifornijskog indeksa nosivosti odnosno CBR-a (California Bearing Ratio). Učinak zbijanja tla ovisi o količini energije koja je uložena u to zbijanje.

### **3.6.4. Oprema**

Špahtla, posudice, vaga, sušionik, Proctor-ov uređaj, cilindrični kalup, dodatno opterećenje, CBR uređaj.

### 3.6.5. Procedura ispitivanja

- 1) Pripremiti uzorak tla tako da mu se doda količina vode koja odgovara optimalnoj vlažnosti, homogenizirati ga te provesti Proctor-ov pokus.
- 2) Na kalup sa zbijenim uzorkom dodaje se uteg mase 4 kg koji simulira dodatno opterećenje kolovozne konstrukcije i sve zajedno potapa u vodu na 96 sati pri čemu se mjeri promjena visine uzorka i izračunava linearno bubrenje
- 3) Nakon završetka potapanja, u uzorak se utiskuje klip kružnog poprečnog presjeka površine  $19,4 \text{ cm}^2$  brzinom od  $1,27 \text{ mm/min}$  do dubine od 2,5; 5,0 i 7,5 mm uz očitavanja sile otpora prodiranja klipa.
- 4) Vađenje uzorka iz kalupa.
- 5) Na mjestu utiskivanja klipa uzima se uzorak za određivanje vlažnosti  $w$ .



Slika 28. Homogeniziranje uzorka



Slika 29. Punjenje cilindričnog kalupa uzorkom tla



Slika 30. Zbijen uzorka tla



Slika 31. Vaganje zbijenog uzorka tla s cilindričnim kalupom



Slika 32. Potapanje uzorka u vodu



Slika 33. Priprema uzorka za izvođenje CBR pokusa



Slika 35. Uzorak tla nakon utiskivanja klipa



Slika 34. Izvođenje CBR pokusa



Slika 36. Vađenje uzorka za određivanje vlažnosti

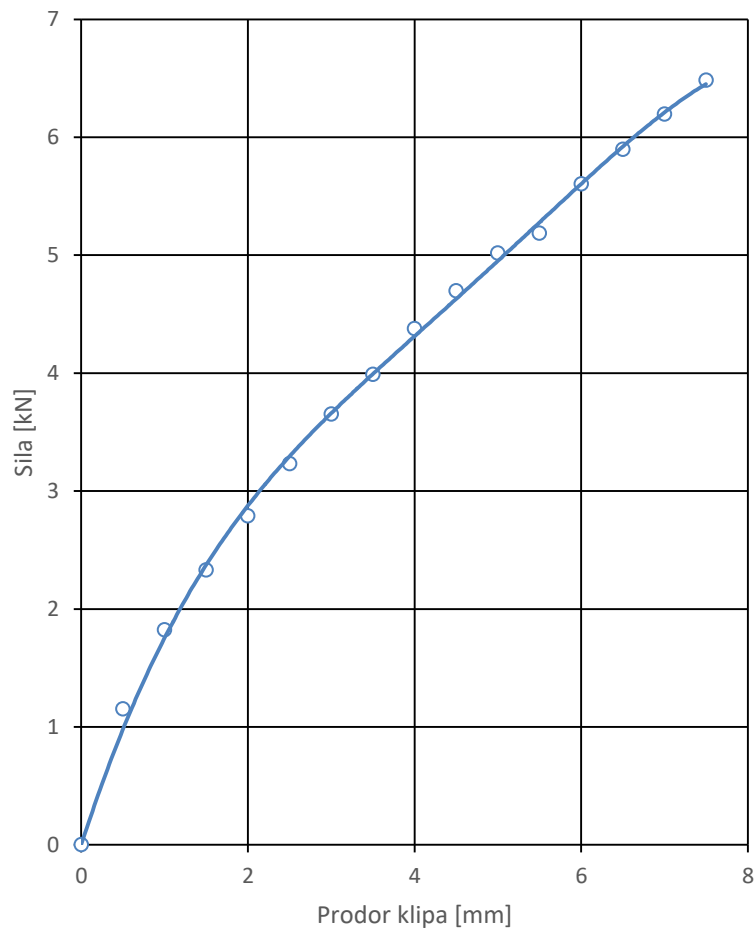


Slika 37. Usitnjavanje uzorka za određivanje vlažnosti

### 3.6.6. Rezultati

Tablica 8. Rezultati određivanja CBR vrijednosti.

|  |                                     |         |         |         |
|--|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| PRODOR KLIPA [mm]                                |                                     | 2,5     | 5,0     | 7,5     |
| STAND. NAPREZANJE ( $p_n$ ) [kN/m <sup>2</sup> ] |                                     | 0,69    | 1,03    | 1,30    |
| Udaraca/sloj 56                                  | očitanje mikroure [pars]            | 132     | 205,1   | 259     |
|  | silu [N]                            | 3228,72 | 5016,75 | 6335,14 |
|  | naprezanje (p) [kN/m <sup>2</sup> ] | 0,167   | 0,259   | 0,326   |
|  | CBR [%]                             | 24,16   | 25,15   | 25,08   |



Slika 38. Grafički prikaz rezultata ispitivanja

CBR vrijednost je odnos između izmjerenog i standardiziranog napreznja prodiranja klipa pri normiranoj dubini prodiranja, a obično se iskazuje kao postotak. Prema normi izvođenja ispitivanja, mjerodavno je veće napreznje između dubine prodiranja klipa od 2,5 mm i 5 mm. Ako napreznje na dubini 7,5 mm bude veće od onog na dubini prodiranja klipa od 5 mm ispitivanje se ponavlja. Ako napreznje bude i dalje jednako ili veće od onog na 5 mm, mjerodavno je napreznje na 5 mm dubine prodiranja klipa. U slučaju ispitivanog uzorka tla, mjerodavna CBR vrijednost iznosi 25,15 %.

## 4. ZAKLJUČAK

Tlo se kao građevni materijal počelo koristiti još u dalekoj prošlosti. Postoje dvije osnovne vrste građevina na površini tla kod kojih se tlo koristi kao gradivo. To su usjeci i zasjeci koji se izvode u samom tlu i nasipi različitih vrsta i namjena koji se izrađuju od tla. Da bi tlo moglo ispuniti tehničke zahtjeve ugradnje, moraju mu se prethodno utvrditi određena fizičko-mehanička svojstva. U njih spadaju Atterbergove granice konzistencije, granulometrijski sastav, optimalna vlažnost i pripadajuća suha gustoća te CBR vrijednost. Optimalna vlažnost ima ključnu ulogu pri ugradnji tla metodom zbijanja jer samo ona omogućuje postizanje najveće suhe gustoće pri korištenju zadane energije zbijanja. Tla koja se zbijaju s vlažnosti manjom ili većom od optimalne ne postižu propisane vrijednosti suhe gustoće koje osiguravaju stabilnost, nosivost i nepropusnost nasutih građevina. CBR vrijednost pak predstavlja važan podatak kod projektiranja nosivosti kolovoznih konstrukcija i aerodromskih pista. Za potrebe izrade nasipa, tražena fizičko-mehanička svojstva tla određena laboratorijskim ispitivanjima uspoređuju se s propisanim svojstvima sadržanim u Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama i u vodnom gospodarstvu. Opisana i provedena laboratorijska ispitivanja na konkretnom uzorku tla pokazala su da ispitivani materijal zadovoljava propisana svojstva za ugradnju u nasip i posteljicu ceste (Tablica 9.).

Tablica 9. Usporedba traženih i ispitanih svojstava tla prema OTU za radove na cestama

| Fizičko-mehaničke karakteristike                   | Zahtjev prema OTU (2001) za radove na cestama (nasip)   | Zahtjev prema OTU (2001) za radove na cestama (posteljica) | Ispitane fizikalno-mehaničke karakteristike                      |
|--|---|--|--|
|  |   |  | <b>Uzorak 1</b>  |
| Koeficijent jednoličnosti<br>$U = d_{60} / d_{10}$ | $U > 9$<br>Ako je $U < 9$ moguća je primjena materijala refuliranjem  | $U > 9$  | Nije određen jer materijal sadrži >10 % čestica gline < 0,001 mm |
| Organske primjese                                  | < 6 %   | < 6 %  | ---  |
| Optimalna vlažnost                                 | $w_{opt} \leq 25 \%$  | ----   | <b>13,8 %</b>  |
| Suha obujamska gustoća po standardnom Proctoru     | $\rho_d \geq 1,50 \text{ g/cm}^3$ za $h \leq 3 \text{ m}$<br>$\rho_d \geq 1,55 \text{ g/cm}^3$ za $h > 3 \text{ m}$ | $\rho_d > 1,65 \text{ g/cm}^3$                             | <b>1,83 g/cm<sup>3</sup></b>                                     |
| Granica tečenja                                    | $w_L \leq 65 \%$  | $w_L < 40 \%$  | <b>33,1 %</b>  |
| Indeks plastičnosti                                | $I_p \leq 30 \%$  | $I_p < 20 \%$  | <b>12,8 %</b>  |
| Bubrenje nakon 4 dana                              | < 4 %   | < 3 %  | <b>0,93 %</b>  |
| Proctorov broj<br>$P_b = 1/\rho_d - 1/\rho_s$      | $P_b = 0$ do 0,20   | ----   | <b>0,17</b>  |
| CBR vrijednost                                     | ----  | > 3 %  | <b>25,2 %</b>  |
| USC klasifikacija                                  | CL, CH, ML, MH, SC  | CL, CH, ML, MH, SC   | <b>CL s pijeskom</b>   |

## 5. LITERATURA

- [1] Roje-Bonacci, T. Mehanika tla. 3. izd. Split: Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet; 2007.
- [2] Dostupno na: <http://nastava.tvz.hr/zlatovic/knjiga/3.pdf> Datum pristupa (20.5.2017.)
- [3] Kvasnička P., Domitrović, D. Mehanika tla. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet; 2007.
- [4] Dostupno na:  
<http://www.gf.uns.ac.rs/predmeti/mehanikatla/1.%20Geotehnicki%20istrazni%20radovi.pdf> Datum pristupa: (22.5.2017.)
- [5] Strelec S., Štuhec D. Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi, Interna skripta, Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2011
- [6] Roje - Bonacci, T. ( 2012. ): Zemljani radovi, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, Izdavač: Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu
- [7] Roje- Bonacci, T. (2015.): Nasute građevine, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, Izdavač: Sveučilište u Splitu - FGAG
- [8] Nonveiller, E.: Mehanika tla i temeljenje građevina, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Školska knjiga, Zagreb 1979.
- [9] OTU 2001., knjiga II, zemljani radovi, odvodnja i obložni zidovi
- [10] OTU 2012., knjiga II, gradnja i održavanje komunalnih vodnih građevina

## **6. POPIS SLIKA**

Slika 1. Geološki ciklus stijene

Slika 2. Dijagram plastičnosti (sitnoznata tla) po AC – klasifikaciji

Slika 3. Dijagram plastičnost prema USCS

Slika 4. Model tla

Slika 5. Pojam stupnja zasićenja

Slika 6. Efektivni promjer zrna

Slika 7. Vrsta sita s obzirom na vrstu otvora

Slika 8. Niz standardnih sita pričvršćenih na tresalicu

Slika 9. Areometar

Slika 10. Postupak areometriranja

Slika 11. Atterbergove granice

Slika 12. Skica Proctor-ovog uređaja

Slika 13. Proctor-ov uređaj

Slika 14. Kontrolna ploča na Proctor-ovom uređaju

Slika 15. Odnosi rezultata dobivenih Standardnim i Modificiranim Proctor-ovim pokusom

Slika 16. Uređaj za CBR pokus u laboratoriju

Slika 17. Oprema za CBR pokus na terenu

Slika 18. Granulometrijski dijagram ispitivanog uzorka tla

Slika 19. Dijagram plastičnosti ispitivanog uzorka

Slika 20. Priprema za izvođenje Proctor-ovog pokusa

Slika 21. Punjenje cilindričnog klipa s uzorkom



Slika 22. Zbijanje uzorka tla

Slika 23. Zbijen uzorak tla

Slika 24. Vaganje zbijenog uzorka tla s kalupom

Slika 25. Vađenje zbijenog uzorka tla iz kalupa

Slika 26. Uzimanje uzoraka za određivanje vlažnosti

Slika 27. Grafička interpretacija rezultata ispitivanja

Slika 28. Homogeniziranje uzorka

Slika 29. Punjenje cilindričnog kalupa uzorkom tla

Slika 30. Zbijen uzorka tla

Slika 31. Vaganje zbijenog uzorka tla s cilindričnim kalupom

Slika 32. Potapanje uzorka u vodu

Slika 33. Priprema uzorka za izvođenje CBR pokusa

Slika 34. Izvođenje CBR pokusa

Slika 35. Uzorak tla nakon utiskivanja klipa

Slika 36. Vađenje uzorka za određivanje vlažnosti

Slika 37. Usitnjavanje uzorka za određivanje vlažnosti

Slika 38. Grafički prikaz rezultata ispitivanja

## **7. POPIS TABLICA**

Tablica 1. Podjela tla prema veličini zrna

Tablica 2. Klasifikacija tla prema promjeru zrna po MIT-u

Tablica 3. Graduiranost krupnozrnatog tla

Tablica 4. Plastičnost sitnozrnatog tla

Tablica 5. Usporedba veličina standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa

Tablica 6. Orijentacione vrijednosti CBR-a prema vrstama tla

Tablica 7. Prikaz rezultata provedenih ispitivanja po standardnom Proctor-ovom postupku

Tablica 8. Rezultati određivanja CBR vrijednosti

Tablica 9. Usporedba traženih i ispitanih svojstava tla prema OTU za radove na cestama