

2 Čvrste čestice, vlažnost... struktura tla.

2.1 Nastajanje i mijenjanje tla.

Uslijed temperaturnih promjena, djelovanja vode (smrzavanje, otapanje, prenošenje...), vjetra, bilja, ... ljudske djelatnosti... stijena se razgrađuje u sitnije elemente (šljunak, pijesak, prah ... mehanička razgradnja), rastapa se ili dolazi do promjena u kristalima stijene (kemijska razgradnja). Pri tome usitnjeni, rastopljeni ili drugačije promijenjeni materijal ostaje na mjestu ili se transportira u dubinu, niz padinu, na manje ili veće udaljenosti. Preneseni materijal se taloži na način uvjetovan temperaturom, slanoćom vode, brzinom strujanja vode ili zraka, ... granulometrijskim sastavom i uvjetima na mjestu taloženja.

Svojstva tla koja su važna u graditeljstvu vezana su na raspodjelu veličine čvrstih čestica (granulometrijski sastav), na svojstva pojedinih čvrstih čestica (mineraloška svojstva), ali i na zbijenost ili gustoću tla, na strukturu tla, i na stanje naprezanja u tlu – trenutno i od samog nastanka.

Sedimentna tla (*sedimentary soils*) su ona čije se čvrste čestice, nastale razgradnjom stijene (mehaničkom ili kemijskom), nošene vodom, vjetrom, ledom, organizmima ili uslijed sile teže (pri čemu dolazi do daljeg trošenja, otapanja, sortiranja,...) talože (sedimentiraju) na novom mjestu. Način sedimentiranja može znatno utjecati na svojstva tla.

Rezidualna tla (*residual soils*) čini materijal nastao razgradnjom stijene na mjestu. Česta su u vlažnim i toplim krajevima, te su prilično slabo istražena. Budući da je mehanika tla razvijena prvenstveno na europskim tlima, potreban je poseban oprez.

Nasip (*fill*) nastaje ugradnjom (graditeljskom djelatnošću): na **pozajmištu** materijal se vadi, prenosi se do željenog mjesta i **ugrađuje**, sa ili bez zbijanja, na način koji, prema zahtjevima danog problema, određuje projekt.

Ovdje navedeni prirodni procesi spori su i dugotrajni, te se uglavnom, čak i kod umjetno nastalog tla, može smatrati da promjene još uvijek traju. Zato tlo treba promatrati ne samo u trenutnoj danosti, nego i – ovisno o uvjetima u okolini – u trajnom mijenjanju. Veoma važna može biti razgradnja tla uslijed djelovanja vode, promjena temperature... (*weathering*). U slijedećim poglavljima kratko se obrađuje **vremenski tijek slijeganja i puzanje** tla. Više podataka o nastajanju tla treba potražiti u literaturi iz geologije i pedologije.

2.2 Čvrste čestice tla, pore, voda i zrak. Struktura tla.

Pokazuje se da veoma veliki utjecaj na ponašanje tla ima količina vode u tlu, veličina i oblik čvrstih čestica, te raspored **čvrstih čestica**. Prostor između čvrstih čestica (*solids*) zovemo **porama** (*pore, pores*). Važno za ponašanje tla bit će i jesu li pore potpuno ili samo djelomično ispunjene vodom – jesu li čvrste čestice obavijene vodom, voda se možda nalazi samo na mjestima dodira čvrstih čestica, ili potpuno ispunjava pore – svakako rijetko se tlo može smatrati potpuno suhim.

Uobičajeno je razlikovati tri faze u tlu, to su:

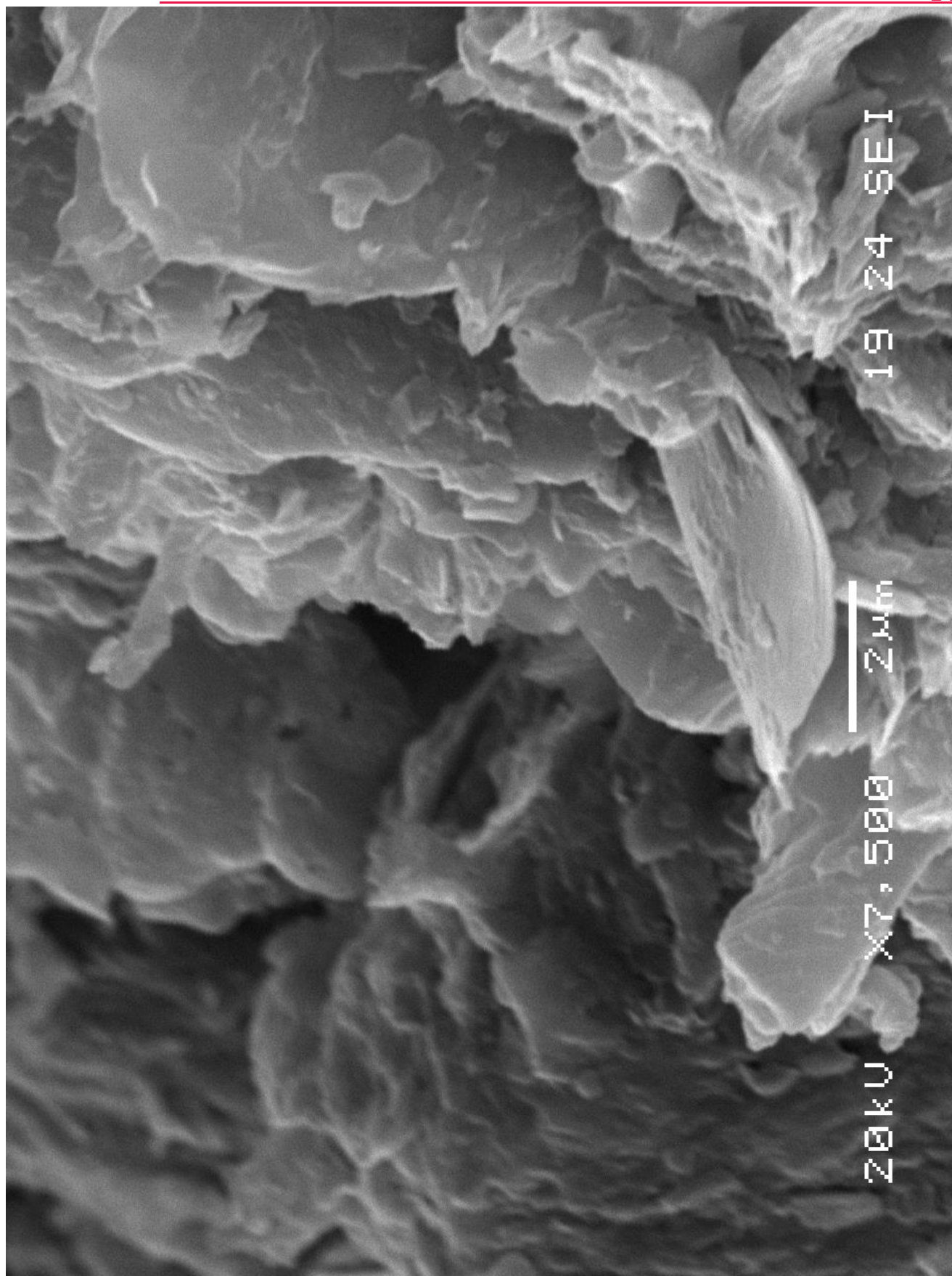
- ◆ čvrste čestice tla,
- ◆ voda u porama tla i
- ◆ zrak, također u porama tla.

Struktura tla (*soil structure*) (Mitchell, 1976) odnosi se na

1. raspodjelu čvrstih čestica i grupa čvrstih čestica, kao i pora između njih... veličine, orijentacije... (*soil fabric*)
2. sile između čvrstih čestica – prije svega elektrokemijske sile između sitnih čestica. (V. Nonveiller, 4.3, str. 47; Lambe i Whitman, Chapter 7, str. 71.)

Za potrebe ispitivanja čvrstoće i stišljivosti tla, kao i zahtjevnija ispitivanja, ulaže se značajni napor da bi se sačuvala originalna **neporemećena** struktura tla, tj. izvadio, prenio **neporemećeni uzorak tla** (*undisturbed sample*) i izrezao i ugradio kao **ispitni uzorak** (*specimen*), jer sastav i proces nastajanja tla rezultiraju jedinstvenom strukturom koja će biti jedinstvenog ponašanja u danim okolnostima.

Ipak, ponašanje tla dade se djelomično procijeniti pomoću jednostavnih numeričkih opisa čvrstih čestica, volumena pora i količine vode u tlu, čime se omogućava usporedba ispitivanog tla sa već upoznatim tlima. Veličine koje se najčešće koriste opisane su u nastavku.



Slika 2-1. Mikroskopska fotografija čestica gline iz okolice Antwerpena. Na fotografiji je označena dužina duljine 2 mikrona. Dobrotom dr.sc. Ingrid Tomac, dipl.ing.građ., koja je fotografiju snimila na Sveučilištu u Ghentu (*Ghent University*).

2.3 Minerali glina.

Značajno za svojstva tla bit će ako već i nekoliko postotaka težine čvrstih čestica čine **minerali glina** (*clay minerals*). Minerali glina čine tanke sitne listiće, promjera do oko 5 μm (to je 5 tisućinki milimetra). U mehanici tla česticama gline smatraju se najčešće čestice sitnije od 2 μm .

Minerale gline čine ravninske kristalne rešetke u kojima se izmjenjuju slojevi kisika, silicija i kisika, ili kisika, aluminija i kisika, ili slično, pri čemu se na vanjske slojeve kisika električnim silama lijepe molekule vode u trajno prisutnom filmu, a na njih se električnim silama lako naljepljuju daljnji slojevi vode. Pri tome, sitnije čestice općenito imaju veću specifičnu površinu (probajte pratiti kako se mijenja omjer oplošja i volumena kugle ili ploče sa smanjivanjem dimenzija); listićave čestice posebno imaju veću specifičnu površinu, pa minerali glina mogu primiti veliku količinu vode (probajte usporediti oplošje ploče i kocke istog volumena). Zato je vlažnost veoma bitna za ponašanje tla sa znatnim udjelom minerala glina.

Zorni prikaz strukture minerala glina, kao i mnogi petrografski detalji mogu se vidjeti na mnogim web stranicama. Ovdje su – uz dopuštenje autora – prenesene ilustracije koje je izradio Robert Harter, PhD.

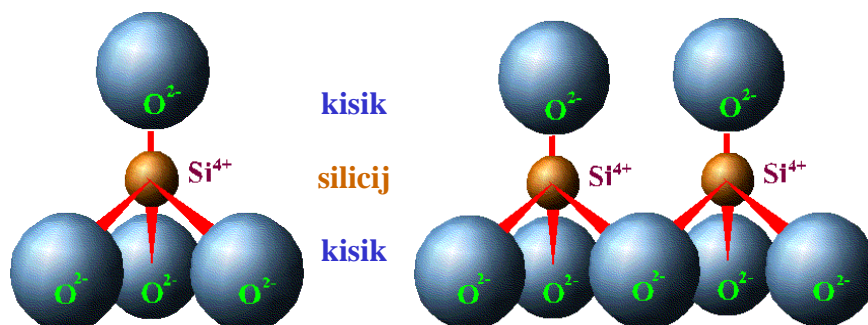
Minerali glina nastaju trošenjem nekih alumosilikata, osobito djelovanjem atmosferilija ili hidrotermalnih procesa. Spadaju u silikatne minerale sa plošnim vezom SiO_4 tetraedara, gdje su na vrhovima tetraedara atomi kisika, a u središtu atom silicija. Plošne rešetke SiO_4 nježno su vezane sa plošnim rešetkama aluminijevog oksida/hidroksida $\text{Al}_2(\text{OH})_4$, a prisutni su i drugi elementi određujući svojstva različitim mineralima glina. Tri najznačajnije skupine su skupina kaolinita, skupina montmorilonita i skupina ilita, pri čemu kaolinit je prisutan u gotovo svim glinama, a montmorilonit i ilit se obično isključuju. Radi ilustracije navode se kemijski opisi najznačajnijih minerala glina:

Kaolinit: $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$.

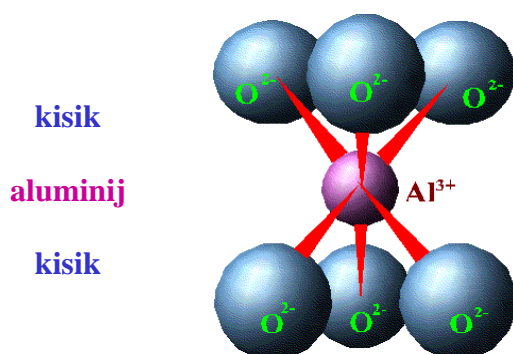
Montmorilonit: $\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \times \text{H}_2\text{O}$, sadrži i Mg i Ca.

Iilit: $(\text{OH})_4 \text{K}_y (\text{Al}_4 \cdot \text{Fe}_4 \cdot \text{Mg}_4 \cdot \text{Mg}_6) \text{Si}_{8-y} \cdot \text{Al}_y \text{O}_{20}$, pri čemu $y = 1$ do 1,5

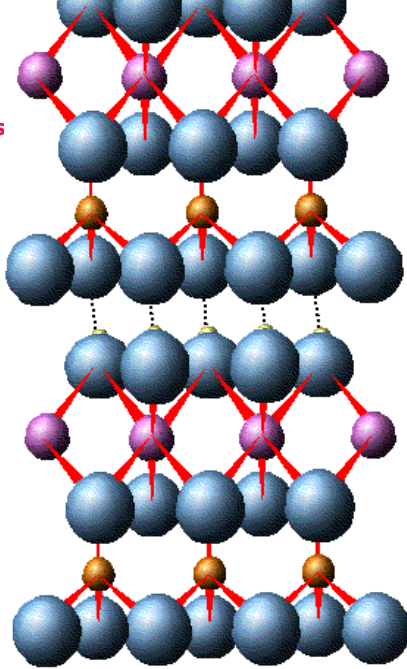
Slika 2-1. Tetraedri silicija i kisika u kristalnoj rešetki minerala glina. Objavljivanje ovdje dopustio je autor Robert Harter, PhD.



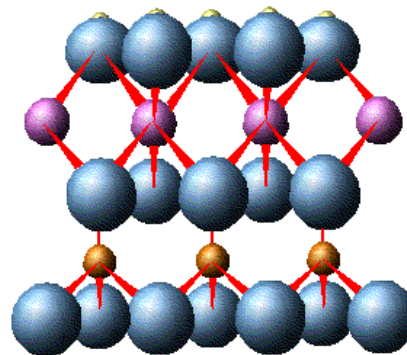
Slika 2-2. Oktaedri aluminija i kisika u kristalnoj rešetki minerala glina. Objavljivanje ovdje dopustio je autor Robert Harter, PhD.



Čvrst



Slika 2-3. Kristali kaolinita. Objavljivanje ovdje dopustio je autor Robert Harter, PhD.



vodik
kisik

aluminij

kisik

silicij

kisik

2.4 Veličina čvrstih čestica tla.

Ponašanje tla, kao i svojstva tla kao što su stišljivost, čvrstoća, propusnost,... kojima se bave slijedeća poglavlja, često je uvjetovano relativnom zastupljenošću čvrstih čestica različitih veličina i njihovim oblikom. Da bi se grafički prikazala raspodjela čestica po veličini, a da bi se vidio i udio sitnih čestica čija prisutnost značajno utječe na ponašanje tla, promjer čestica se prikazuje u logaritamskom mjerilu.

Postoji više sustava granica između grupa zrna tla. Pri izboru načina klasificiranja, važno je dvoje:

- vezanost određenih osobina bitnih za klasu, te
- jednostavna prepoznatljivost klase.

Tako se za granicu između **krupnozrnog** (*granular, coarse*) i **sitnozrnog** tla (*fine*) redovito bira granica vidljivog koja je negdje oko 0,1 mm (kod nas uobičajena je granica 0,06 mm, a u SAD i Japanu: 0,074 mm). Krupnozrna se tla zovu i nekoherentim (*noncohesive*), jer su sipka, a sitnozrna ponekad i koherentnim (*cohesive*), jer je za njih često – ali ne uvijek – važna kohezija, tj. međusobna povezanost čvrstih čestica, ali ti se nazivi napuštaju.

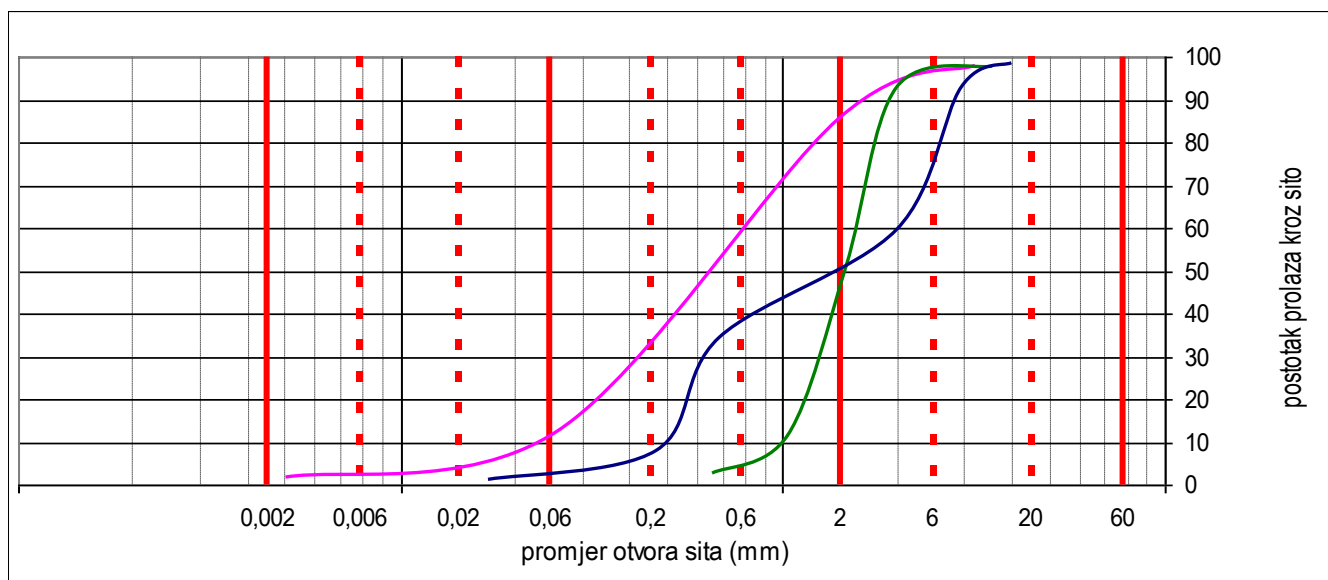
Čvrste čestice tla najčešće svrstavamo prema veličini u četiri grupe: šljunak (*gravel*), pijesak (*sand*), prah (*silt*), i glina (*clay*). Govori se također i o krupnim, srednjim ili sitnim česticama u svakoj od prve tri grupe. Kod nas je uobičajena uporaba niza MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), koji koristi činjenicu da je 20/6 približno jednako 6/2, i da su udaljenosti između brojeva u nizu 2 i 6 u logaritamskom mjerilu približno jednake:

glina: do 0,002 mm	prah: 0,002 do 0,06 mm	pijesak: 0,06 do 2 mm	šljunak: 2 do 60 mm
	krupni: 0,02 do 0,06 mm	krupni: 0,6 do 2 mm	krupni: 20 do 60 mm
	srednji: 0,006 do 0,02 mm	srednji: 0,2 do 0,6 mm	srednji: 6 do 20 mm
	sitni: 0,002 do 0,006 mm	sitni: 0,06 do 0,2 mm	sitni: 2 do 6 mm

2.5 Granulometrijski sastav.

Za promatrano tlo dobro je poznavati raspodjelu veličina čvrstih čestica, **granulometrijski sastav** (*grain size distribution*). Granulometrijski sastav nekog tla – za čestice veće od 63 μm – određuje se sijanjem reprezentativnog uzorka tla, koje može biti suho ili mokro – što znači da se vodom pomogne razdijeliti grumenčice na pojedinačne čvrste čestice, ili odvojiti sitne čestice od krupnih. Sijanje se radi na nizu sita normiranih veličina otvora, te vaganjem ostatka na svakom situ i onoga što je prošlo kroz najfinije sito (*sieve method*). Za najsitnije čestice – za čestice manje od 63 μm – granulometrijski se sastav određuje **areometriranjem** (*sedimentation*). To je postupak u kome se, na normom propisani način, napravi suspenzija sitnozrnog dijela uzorka tla u visokoj posudi. Čvrste čestice talože se različitom brzinom, ovisno o veličini, pa se mjerenjem gustoće suspenzije u određenim vremenskim razmacima, posredno mjeri brzina tonjenja čvrstih čestica tla, te udio pojedinih veličina zrna. (V. npr. Nonveiller, str. 22.)

Granulometrijski sastav prikazuje se uobičajeno *granulometrijskim dijagramom*, kao postotak mase ili težine prolaza kroz sito, tj. udjela čvrstih čestica koji su manji od dane dimenzije. Pri tom je na apscisi redovito veličina zrna, tj. veličina otvora sita, i to u logaritamskom mjerilu (zato da se dobro vidi i prisutnost sitnih čestica), najčešće izražena u milimetrima, a na ordinati je postotak prolaza. Uobičajeni su i “uzlazni” i “silazni” granulometrijski dijagrami, tj. negdje je uobičajeno da veličina na apscisi raste prema desno, a negdje prema lijevo.



Slika 2-4. Granulometrijski dijagram i nekoliko granulometrijskih krivulja.

Granulometrijski dijagram pokazuje zorno kako veličine zrna, tako i međusobni odnos pojedinih frakcija.

Dobro graduirano je tlo koje ima zastupljene sve frakcije nekog tla u nizu, što se vidi iz glatke “S” krivulje.

Slabo graduirano je tlo kojemu neke frakcije “nedostaju”, što se očituje u svojevrsnom lomu u krivulji.

Jednolično graduirano je tlo uskog granulometrijskog sastava.

Posebno treba istaknuti prisutnost veće količine sitnih čestica.

Neka bude naglašeno: određeni granulometrijski sastav opisuje raspodjelu veličina čvrstih čestica nekoga tla. Tu nema informacija niti o orijentaciji čvrstih čestica ili veličini pora, niti o količini vode. Dakle je za dobivanje granulometrijskog sastava dovoljno imati reprezentativni “poremećeni” uzorak tla (*disturbed sample*), nije potreban takav koji bi čuvao strukturu tla.

2.6 Specifična masa i specifična težina.

Gustoća, ρ_s , (*particle density*) je masa jedinice volumena čvrstih čestica tla, a *specifična težina*, γ_s , (*specific weight*) je težina jedinice volumena čvrstih čestica tla. Uobičajene su vrijednosti

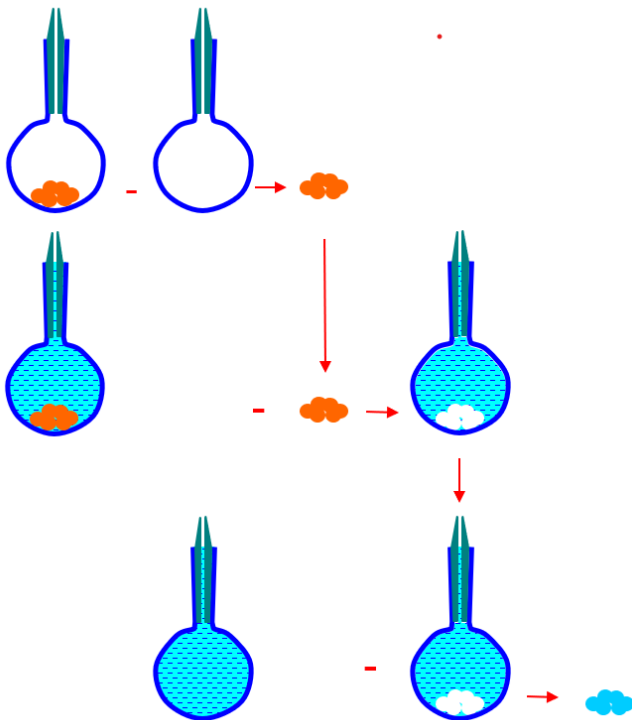
ρ_s ... 2,5 do 2,8 g/cm³, ali su moguće i drugačije,

γ_s ... 25 do 28 kN/m³, dakle su moguće i drugačije.

Podsjetimo se, voda ima gustoću oko $\rho_w = 1$ g/cm³, tj. specifičnu težinu oko $\gamma_w = 9,81$ kN/m³ ≈ 10 kN/m³.

Ako se pokaže da je gustoća tla izvan raspona 2500 i 2800 kg/m³, treba provjeriti mineralogiju tla, prisutnost organskih tvari i geološko porijeklo.

Budući da su čvrste čestice tla različitih oblika i veličina, a najčešće su obavijene vodom, i na njima su vezani mjehurići zraka – ili se vežu pri nalijevanju vode, da bi se odredila specifična masa, treba odrediti i masu i volumen dovoljno velike reprezentativne nakupine čvrstih čestica. U tu svrhu koristi se *piknometar* (*pycnometer*), bočica izrađena tako da joj se unutarnji volumen može odrediti s preciznosti od npr. 0,001g vode. Bočica ima čep izvana fino izbrušen tako da tijesno zatvara grlo bočice, a kroz koji prolazi cjevasti otvor tako tanak, da pri zatvaranju pune bočice dolazi do istiskivanja vode sve do zanemarivo malene kapi na vrhu. Veličina bočice bira se prema veličini čvrstih čestica tla.



Slika 2-5. Skica ispitivanja u piknometru, u koracima.

Mjeri se

- ♦ masa čistog i suhog piknometra, $m_{\text{piknometra}}$,
- ♦ masa piknometra ispunjenog destiliranom vodom sobne temperature, $m_{\text{piknometra s vodom}}$
- ♦ masa čvrstih čestica tla u suhom stanju, m_{uzorka} , tj. nakon 24-satnog sušenja na 105 C, i to kao masa piknometra sa usutim uzorkom od koje se oduzme masa piknometra, $m_{\text{uzorka}} = m_{\text{piknometra s uzorkom}} - m_{\text{piknometra}}$,
- ♦ masa piknometra u kojem je uzorak, te je piknometar nadopunjen vodom, voda je zagrijavana i miješana tako da izađu svi mjehurići zraka, i je sve ohlađeno na sobnu temperaturu, $m_{\text{piknometra s uzorkom nadopunjenog vodom}}$

Iz toga računa se

- ♦ volumen čvrstih čestica preko mase vode koju u piknometru “ne zauzima” uzorak i specifične mase vode:

$$V_{\text{uzorka}} = (m_{\text{piknometra s vodom}} - (m_{\text{piknometra s uzorkom nadopunjenog vodom}} - m_{\text{uzorka}})) / \rho_w$$

- ♦ odakle specifična masa čvrstih čestica je:

$$\rho_s = m_{\text{uzorka}} \rho_w / (m_{\text{piknometra s vodom}} - m_{\text{piknometra s uzorkom nadopunjenog vodom}} + m_{\text{uzorka}})$$

pri čemu ρ_w je gustoća vode, oko 1 g/cm^3 .

Jedan zadatak je naveden u nastavku.

2.7 Prisutnost organskih tvari, kalcijevog karbonata i slično.

Prisutnost organskih tvari značit će npr. veću stišljivost tla, ponekad nedopustivo veliku, smanjivanje čvrstoće i nosivosti tla, te osjetljivost na promjenu vlažnosti tla. Također, mogu biti značajni procesi koji u tlu nisu završeni, dakle možemo očekivati promjenjivost svojstava tla u bližoj budućnosti. Miris i boja mogu pokazati prisutnost organskih tvari, a posebnim se ispitivanjem može dokazati i količina: bilo izgaranjem, bilo primjenom kemikalije (H_2O_2).

Prisutnost kalcijevog karbonata (CaCO_3) može pomoći pri klasifikaciji tla, te uputiti na mjeru povezanosti (cementiranosti) čvrstih čestica. Ispitivanje se radi primjenjujući klorovodičnu kiselinu (HCl).

Prisutnost različitih kemikalija može učiniti tlo opasnim za rad, za izvedbu određenog objekta ili npr. za armaturu u objektu. Miris ponekad može otkriti prisutnost kemikalija, ali različita ispitivanja koja su u razvoju omogućuju stvarnu provjeru i mjerenje količine, te procjenu različitih opasnosti.

2.8 Poroznost, vlažnost, gustoća, jedinična težina.

Osim osobina čvrstih čestica, pokazuje se, bitan je i njihov raspored i veličina pora, kao i količina vode u tlu. To nisu sve informacije koje opisuju strukturu tla, ali su relativno jednostavno mjerljive i dobro primjenjive. U tu svrhu trebamo *neporemećeni uzorak* (*undisturbed sample*) tla, dakle takav koji čuva strukturu tla i prisutnu vlagu.

Količinu pora, dakle volumena tla koji ne čine čvrste čestice, opisuju kao relativni volumen, na dva načina:

relativni porozitet, n , (*porosity*) omjer je volumena pora u elementu tla i ukupnog volumena tog elementa tla,

$$n = V_p / V$$

koeficijent pora, e , (*void ratio*) omjer je volumena pora i volumena čvrstih čestica.

$$e = V_p / V_s$$

Ove dvije definicije, kao i relacija između n i e jasno se vide iz ilustracija u nastavku (Slika 2-6):

$$n = e / (1 + e)$$

$$e = n / (1 - n)$$

Relativni porozitet pogodan je za izračunavanje težina jediničnih volumena, a koeficijent pora pogodan je za analize promjene volumena – za procjenu slijeganja i slično – jer se promjene volumena tla događaju prije svega na račun promjene volumena pora, pri čemu volumen čvrstih čestica ostaje gotovo stalan. Relativnom porozitetu teoretske granice su između 0 (što bi bilo tlo bez pora) i 1 (što bi bilo tlo bez čvrstih čestica). Koeficijentu pora donja je granica iznad 0 (što bi bilo tlo bez pora), a gornja je granica određena rahlošću koje dano tlo može ostvariti.

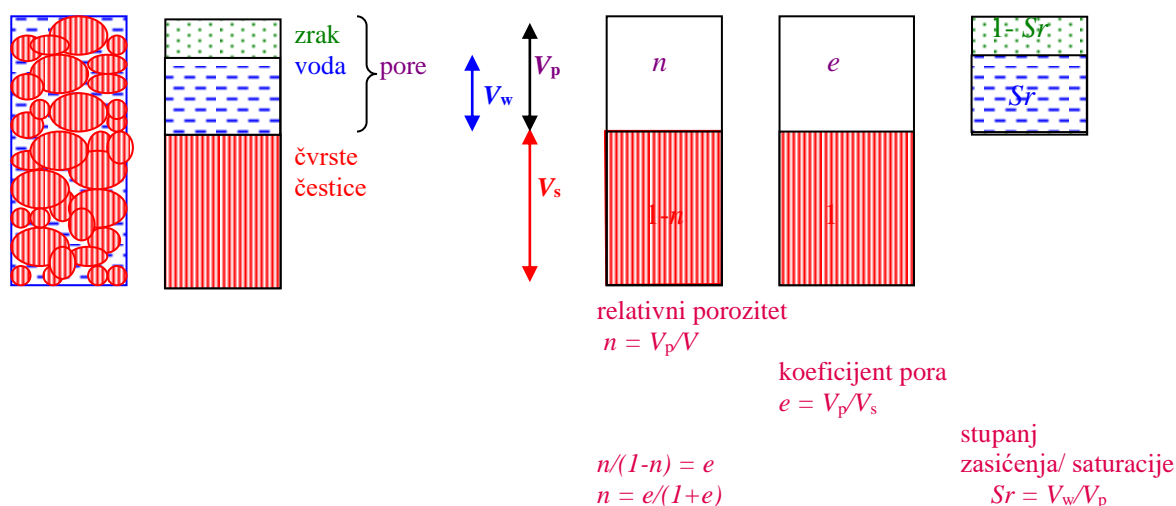
Relativni volumeni, tj. poroznost ili relativni porozitet i koeficijent pora mjere su rahlosti ili zbijenosti nekog tla. I stišljivost i čvrstoća i propusnost bitno su povezani s ovim parametrima. U nastavku mogu se naći zadaci u kojima se prati promjena koeficijenta pora sa zbijanjem ili slijeganjem nekog tla.

Stupanj zasićenosti ili stupanj saturacije tla, S_r , (*degree of saturation*), je omjer volumena vode i volumena pora u tlu

$$S_r = V_w / V_p$$

Pri sušenju ili porastu količine vode, ako je raspored čvrstih čestica nepromijenjen, mijenja se stupanj zasićenosti od 0 ili 0% za suho tlo, do 1 ili 100% za ako su pore posve ispunjene vodom.

Slika 2-6. Shematski prikaz relativnih volumena.



Kod procjene slijeganja trebat će nam opterećenje u tlu, pa zato i težina tla. Računat ćemo u pravilu s masom i težinom jediničnog volumena tla. Najčešće nas zanima prirodno stanje u kojem nalazimo tlo (koje ispitujemo baveći se neporemećenim uzorcima) ili stanje u koje ćemo dovesti tlo građenjem ili drugačijim procesom. Ponekad uspoređujemo samo čvrste čestice u tlu i govorimo o suhoj masi ili težini misleći na ukupni volumen tla – a to ćemo razlikovati od specifične mase ili težine tla koja se odnosi samo na čvrste čestice. Radi lakšeg razumijevanja u nastavku su prikazane usporedne skice, a zatim su dani i zadaci.

Da bismo odredili gustoću tla u laboratoriju, vadimo i donosimo neporemećeni uzorak, važemo ga i mjerimo dimenzije, te računamo volumen. Sušenjem uzorka – na normirani način (uobičajeno na 105 stupnjeva C tijekom 24 sata) – dobivamo uzorak koji zovemo suhim (iako dio vlage može biti zadržan). Masu ili težinu osušenog (suhog) uzorka još uvijek uspoređujemo s početnim volumenom uzorka i govorimo o suhoj masi ili težini ili jediničnoj težini. Ako nas zanimaju upravo čvrste čestice, da bismo im odredili volumen čvrstih čestica treba izvesti mjerenje u piknometru. Razlikujemo, dakle, tri različite gustoće ili jedinične težine:

Gustoća tla, ρ , (*density, bulk density*) je masa jedinice volumena tla u danom stanju:

$$\rho = m / V$$

Suha gustoća tla, ρ_d , (*dry density*) je masa čvrstih čestica u jedinici volumena tla:

$$\rho_d = m_d / V = m_s / V$$

Gustoća čvrstih čestica ili specifična masa, ρ_s , (*specific gravity of solid particles*) je masa čvrstih čestica u jedinici volumena čvrstih čestica:

$$\rho_s = m_s / V_s$$

Jedinična težina¹ tla, γ , (unit weight) je težina jedinice volumena tla u danom stanju.

$$\gamma = G/V = \rho g,$$

gdje g je gravitacija, akceleracija sile teže.

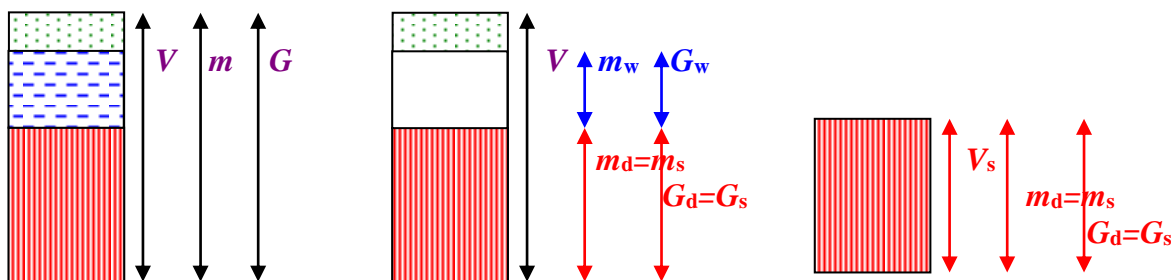
Suha jedinična težina tla, γ_d , (dry unit weight) je težina jedinice volumena suhog tla – računajući na izvorni volumen;

$$\gamma_d = G_d/V = \rho_d g,$$

Jedinična težina čvrstih čestica, ili specifična težina, γ_s , (specific weight) je težina čvrstih čestica u jedinici volumena čvrstih čestica:

$$\gamma_s = G_s/V_s = \rho_s g.$$

Slika 2-7. Shematski prikaz masa i težina po jedinici volumena



uzorak u prirodnom stanju

gustoća
 $\rho = m/V$
 jedinična težina
 $\gamma = G/V$

osušeni uzorak

suha gustoća
 $\rho_d = m_d/V$
 suha jedinična težina
 $\gamma_d = G_d/V$

čvrste čestice (u piknometru)

gustoća čvrstih čestica
 $\rho_s = m_s/V_s = m_d/V_s$
 specifična težina (čvrstih čestica)
 $\gamma_s = G_s/V_s$

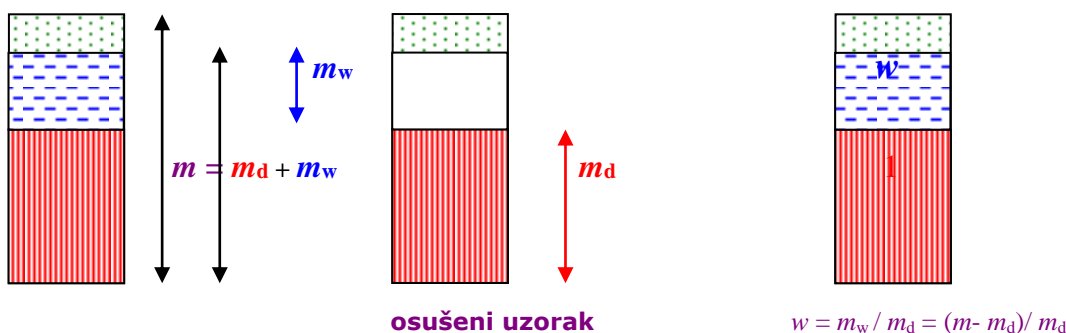
Važnu ulogu u ponašanju tla, pogotovo sitnozrnog, ima količina vode u tlu. Uobičajena mjera količine vode u tlu je vlažnost tla koja se definira kao omjer masa

vlažnost, w , (water content) je omjer mase vode i mase čvrstih čestica tj. suhog dijela tla u elementu tla:

$$w = m_w/m_d = m_w/m_s$$

Pri sušenju ili porastu količine vlage, mijenja se masa vode, a masa čvrstih čestica nekog elementa tla – dakle masa suhog dijela uzorka – ostaje stalna, pa je zato izabrana za mjeru (nazivnik) vlažnosti. Tako donja granica za veličinu vlažnosti je 0 ili 0% za suho tlo, a gornja je granica određena količinom vode koju određeno tlo može primiti – ovisno o svojstvima čvrstih čestica.

Slika 2-8. vlažnost je omjer mase vode i mase čvrstih čestica



Odnosi između gustoće, suhe gustoće i gustoće čvrstih čestica, te jedinične težine, suhe jedinične težine i specifične težine čvrstih čestica mogu se jednostavno izvesti iz navedenih definicija. V. zadatke u nastavku.

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_d(1-n) + \rho_w(n)Sr; & \gamma &= \gamma_d(1-n) + \gamma_w(n)Sr; \\ \rho &= \rho_d(1+w); & \gamma &= \gamma_d(1+w); \\ \rho_d &= \rho_s(1-n); & \gamma_d &= \gamma_s(1-n). \end{aligned}$$

¹ Ponegdje se u hrvatskim tekstovima ova veličina zove zapremninskom – bolje bi bilo zapremninskom – težinom ili volumskom težinom.

2.9 Minimalni i maksimalni koeficijent pora, relativna gustoća.

Rahlost tla – ili zbijenost – jasno je povezana s čvrstoćom i stišljivošću tla. Kao mjera rahlosti nekoherentnih tala koristi se koeficijent pora u prirodnom stanju u usporedbi s dva koeficijenta pora određena na normirani način, to su takozvani maksimalni i minimalni koeficijenti pora, pri čemu to ne moraju biti doista najveća i najmanja vrijednost koeficijenta pora, nego su referentne vrijednosti koje se dobiju na normirani način:

Maksimalni koeficijent pora, e_{max} , odredi se sipanjem suhog uzorka tla pomoću normiranog lijevka u posudu normirane veličine, tako da se lijevak napuni tlom, spusti na dno posude i lagano podiže dok nije cijela posuda ispunjena. Ravnim nožem odreže se višak tla tako da se ukupni volumen usipanog tla može dobiti kao volumen posude. Iz težine toga dijela uzorka te specifične težine tla, dobije se odgovarajući koeficijent pora. Unatoč imenu, ovo stanje ne mora odgovarati najvećem mogućem volumenu pora toga tla. Postoje postupci ili načini sedimentacije tla u prirodi koji omogućavaju i puno rahlije strukture. Međutim, e_{max} predstavlja dobru mjeru rahlosti.

Minimalni koeficijent pora, e_{min} , odredi se sipanjem suhog uzorka tla u posudu određene veličine, u slojevima, te potresanjem posude nakon sipanja svakog novog sloja, dok se ne dobije najzbijenije stanje. Iako se mjerenje vodi tako da se dobije što zbijenije stanje, moguće su i veće zbijenosti, pogotovo pri većim opterećenjima.

Relativna gustoća, D_r , ili I_D (*relative density*) uspoređuje koeficijent pora u danom stanju sa ove dvije referentne vrijednosti, maksimalnim i minimalnim koeficijentom pora danog tla:

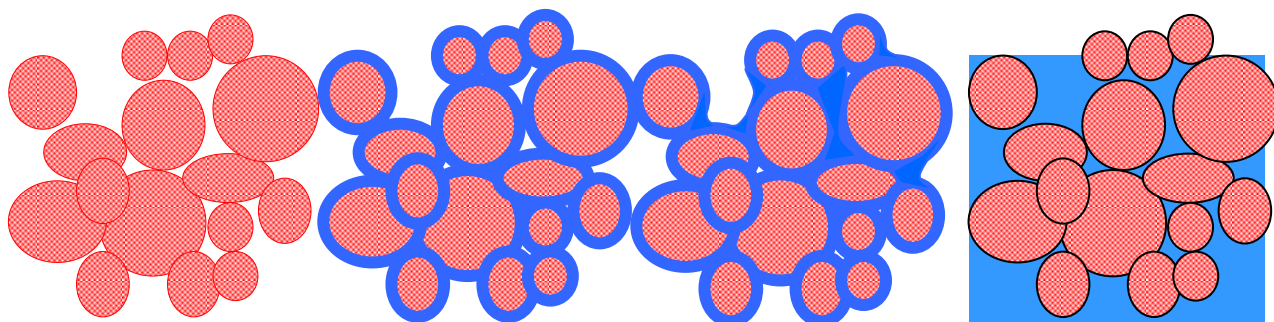
$$D_r = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min})$$

Relativna gustoća vrlo se često koristi kao mjera zbijenosti krupnozrnog tla.

2.10 Voda u tlu.

Osim u posebnim uvjetima, voda je redovito prisutna u tlu. Čvrste čestice tla – budući da su zrna, zrnca, pločice i listići – čine strukturu između kojih su pore, međusobno povezane. Pore funkcioniraju kao vrlo razvedeni sustav spojenih posuda, te govorimo o *podzemnoj* i *kapilarnoj* vodi. Međutim, i iznad ovog područja, *adheziona* voda obavija čvrste čestice tla. Posebno je značajna prisutnost vode na česticama gline, budući da su za minerale gline slojevi vode vezani električnim silama, a prisutni su i vanjski slabije vezani slojevi vode. Pokazuje se da zato materijali koji sadrže dovoljno gline vrlo bitno ovise o količini vode i vlažnost značajno utječe na ponašanje glina.

Što se tiče podzemne vode, pokazuje se da su tlakovi u vodi od najvećeg značaja za naprezanja u skeletu tla, u čvrstim česticama, i, dakle, za slijeganje, ... slom u tlu, klizanje i slično. Na žalost, voda u graditeljstvu uzrokuje najveće štete, i zahtijeva najveće troškove dođe li do neželjenih posljedica. U slijedećim poglavljima posebno se obrađuje utjecaj vode.



2.11 Granice plastičnosti. Dijagram plastičnosti.

Da ponašanje sitnozrnih tala bitno ovisi o njihovoj vlažnosti, svi dobro znamo iz svakodnevnog života: blato i mulj termini su kojima opisujemo stanje glinovitog tla u kome je vlažnost vrlo visoka – uslijed kiše, na dnu jezera ili slično. Nakon što kiše prestanu, a voda oteče i posuši se, ... tlo se vrati u čvršće stanje. Dakle, čvrstoća i slična svojstva sitnozrnog tla mijenjaju se sa stanjem sitnozrnog tla – od čvrstog do žitkog – odnosno sa vlažnosti, a da pri tome čvrste čestice tla ostaju nepromijenjene – tek se donekle mijenja njihov raspored, struktura tla. Zato je zanimljivo znati kako danu vlažnost tla, u nađenom stanju, tako i vlažnost pri kojoj određeno tlo prelazi iz čvrstog stanja prema tekućem i slično. Da bi se na jedinstveni način odredio prijelaz iz stanja u stanje, izvode se jednostavna normirana ispitivanja kojima se određuju **Atterbergove² granice** tj. **granice plastičnosti**. Kako je pri tome bitna količina vode, i Atterbergove granice se definiraju kao vlažnost u tim graničnim stanjima, pri čemu je vlažnost, kako je definirano, omjer mase vode i mase čvrstih čestica u nekom tlu: $w = m_w/m_d$.

Na normirane načine, za dano sitnozrno tlo, tj. za date čvrste čestice, određuju se tri **granice plastičnosti**, (*plastic limits*), granice između četiri **konzistentna stanja** (*states*):

čvrsto stanje (*solid state*) u kojemu je vlažnost manja od **granice stezanja**, w_s (*shrinkage limit*)

$$w < w_s$$

polučvrsto stanje (*semi-solid state*) u kojemu je vlažnost između granice stezanja i **granice plastičnosti**, w_p (*plastic limit*)

$$w_s < w < w_p$$

plastično stanje (*plastic state*) za koje je vlažnost između granice plastičnosti i **granice tečenja**, w_L (*liquid limit*)

$$w_p < w < w_L$$

žitko ili **tekuće** stanje (*liquid state*) za koje je vlažnost iznad granice tečenja,

$$w_L < w.$$

Granice plastičnosti određuju se na normirane načine, pri čemu nisu sve svjetske norme jednake, iako je usklađivanje posebno izraženo posljednjih godina. Budući da se u ovim ispitivanjima vlažnost tla mijenja, a struktura donekle mijenja, Atterbergove granice pokazuju svojstva čvrstih čestica danog tla. Atterbergove granice se zato koriste i u klasifikaciji sitnozrnih tala. Za opis stanja sitnozrnog tla, prirodna vlažnost uspoređuje se sa granicama plastičnosti i određuje se konzistentno stanje.

Granica tečenja, w_L (*liquid limit*)

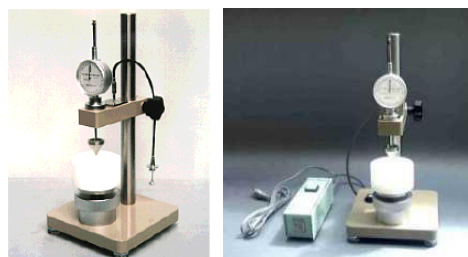
Danas se kod nas najčešće koristi aparat³ sa posudicom (*Casagrande³ liquid limit apparatus*) normiranog kalotastog oblika u koji se razmaže nešto ispitivanog uzorka u stanju bliskom granici tečenja. Na standardizirani način izreže se središnji dio razmazanog tla, tako da između preostala dva dijela ostane normirani razmak. Zdjelica se potresa i broje se udarci potrebni za spajanje dva dijela. Uzorak se potom važe, suši i opet važe, te se tako izmjerenoj vlažnosti pridruži odgovarajući broj udaraca. U međuvremenu, ponovi se ispitivanje s nešto vlažnijim ili suhljim tlom, te se – iz parova vrijednosti dobivene vlažnosti i odgovarajućeg broja udaraca – traži ona vlažnost pri kojoj je broj udaraca upravo 25.



Slika 2-9. Casagrandeov uređaj u laboratorijima Instituta IGH, fotografirao ing. Ivan Šoprek

Sve se češće koristi drugačije ispitivanje, u kome se konus spušta u zdjelicu sa razmazanim tlom, sve na normirani način i sa definiranim dimenzijama i težinama. (*fall-cone*)

Slika 2-10. Uređaji tvrtke SEIKENSHA
<http://www.seikensha.com>



² Albert Atterberg (1846-1916), švedski kemičar, bavio se agronomijom, uveo 1910. i 1911. pet granica od kojih danas koristimo 3

³ Arthur Casagrande (1902 – 1981), zaslužni geotehničar, v. dijagram plastičnosti u nastavku

Granica plastičnosti, w_p (plastic limit)

Ispitivano tlo se – u plastičnom stanju – valja u valjčice 3 mm promjera na podlozi koja ne upija vodu. Tijekom valjanja valjčici se suše, tj. vlažnost se smanjuje. Graničnim se stanjem smatra ono u kome valjčici počnu pucati, te se u tome stanju valjčici važu, suše i opet važu, da bi se odredila odgovarajuća vlažnost, tj. granica plastičnosti.

Slika 2-11. Valjčici tla na granici plastičnosti u laboratorijima Instituta IGH, desno: valjčici na granici plastičnosti u posudici u kojoj će se sušiti (fotografirao ing. Ivan Šoprek)



Granica stezanja, w_s (shrinkage limit) Ispitivano tlo se važe, polagano suši, te ponovo važe. I prije i poslije sušenja, također, mjeri se volumen testiranog uzorka. Granicom stezanja smatra se vlažnost u stanju najmanjeg volumena postignutog sušenjem, ako je tlo potpuno zasićeno (što se računa iz volumena pora i rezultata vaganja).

Indeks plastičnosti, I_p (plasticity index, PI)

Pokazuje se da se mnoga svojstva tla dadu smisleno usporediti sa razlikom granice tečenja i granicom plastičnosti, kako se definira indeks plastičnosti (tj. mjera količine vode potrebne da bi tlo prešlo iz polučvrstog u tekuće stanje):

$$I_p = w_L - w_p$$

Čvrstoća i druga svojstva tla vezana su na granice plastičnosti (w_s , w_p , w_L), pa se mnoga bitna svojstva tla vrlo dobro mogu usporediti s odnosom između ovih graničnih vrijednosti vlažnosti za neko tlo, te danom stvarnom vlažnosti. Pokazuje se da na granici tečenja tlo ima čvrstoću od oko 1 do 2 kPa, a na granici plastičnosti oko 100 do 200 kPa. Indeks plastičnosti predstavlja razliku u vlažnosti između ta dva stanja. Zorni način prikaza ovih graničnih vrijednosti daje dijagram plastičnosti koji se koristi i za klasifikaciju sitnozrnih tala.

Karakteristične vrijednosti granica plastičnosti i indeksa plastičnosti za uobičajene minerale gline prikazane su u tablici:

	w_s	w_p	w_L	I_p
kaolinit	oko 25%	oko 30%	oko 50%	oko 20%
ilit	oko 15%	oko 50%	oko 100%	oko 50%
montmorilonit	oko 10%	oko 70%	oko 140% do 700%	oko 70% do 600%

U geotehnici je zanimljiva primjena montmorilonita koji se koristi pripremljen u suspenziji koju zovemo **bentonitna isplaka (bentonite suspension)** – za pridržanje vertikalnih iskopa tj. tijekom izvedbe zagatnih stijena ili bušenja. **Tiksotropno svojstvo (thixotropy)** bentonitne isplake sastoji se u tome da se glina velike vlažnosti može transportirati kao tekućina, te iznosi iskopani materijal, ali dok – u bušotini ili usjeku – miruje, ne ulazi u pore okolnog tla, nego se, kao gel, zadržava u iskopanom prostoru, stvarajući opnu na granici prema preostalom tlu.

Dijagram plastičnosti (plasticity chart) prikazuje, za neko tlo, tj. za neku nakupinu čvrstih čestica – bez obzira na danu vlažnost ili strukturu, vezu između granice tečenja, w_L , koja je prikazana na apscisi, te indeksa plastičnosti, I_P , koji je prikazan na ordinati.

Slika 2-12. Dijagram plastičnosti

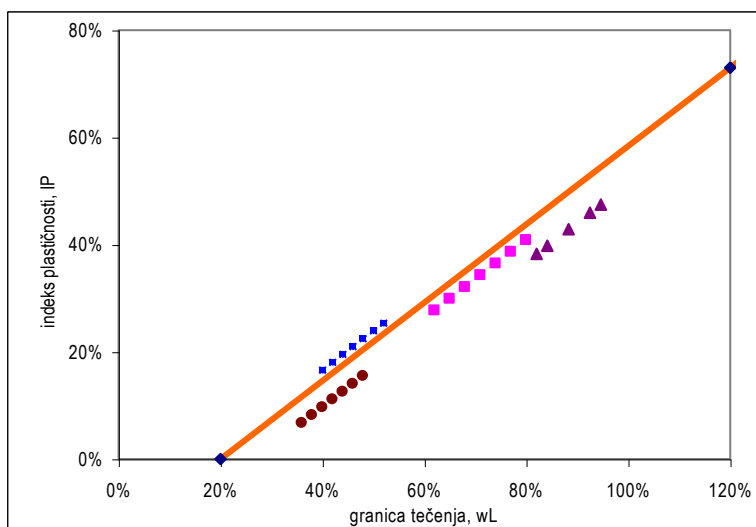
Pokazuje se da tlima zajedničkog porijekla odnosno sličnog sastava u dijagramu plastičnosti obično pripada dio pravca u dijagramu plastičnosti, te da su za razne slučajeve ti pravci gotovo paralelni. Pri tome, povećavanje indeksa plastičnosti, pokazuje se, povezano je sa većom količinom minerala gline, te većom kohezijom. Zato je Arthur Casagrande definirao graničnu, A-liniju:

A-linija (A-line) u dijagramu plastičnosti definira se sa

$$I_P = 0,73 (w_L - 20\%),$$

gdje su I_P i w_L izraženi u postocima.

Dijagram plastičnosti i A-linija, zbog važne veze sa ponašanjem tla, koriste se pri klasifikaciji sitnozrnih tala.



S povećanjem indeksa plastičnosti ili smanjenjem granice tečenja, raste suha čvrstoća, tj. otpor gnječenju suhih grudica tla, a smanjuje se propusnost tla. Stišljivost raste sa smanjenjem indeksa plastičnosti ili povećanjem granice tečenja.

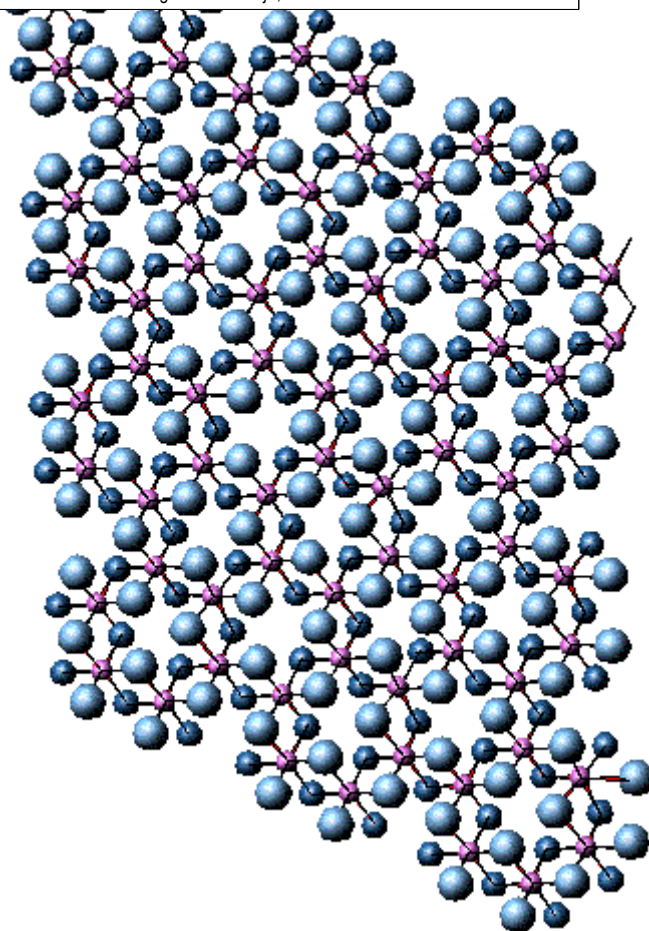
2.12 Aktivnost gline.

Skempton⁴ je definirao **aktivnost gline (activity)** kao omjer indeksa plastičnosti i težinskog postotka čestica gline:

$$\text{aktivnost gline} =$$

$$= I_P / (\text{težinski postotak čestica manjih od } 2\mu\text{m})$$

Slika 2-13. Shema minerala gline, reproduciranje je dopustio autor, Robert Harter, PhD



2.13 Popis citirane i preporučljive literature:

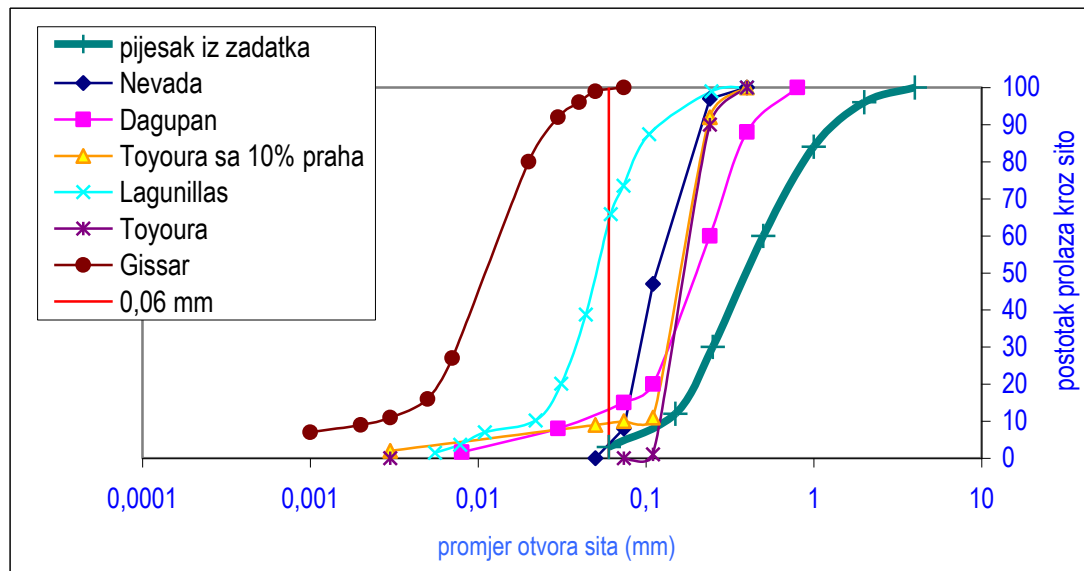
1. Nonveiller, E., 1990, *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, Zagreb, 853 str.
2. Lambe, T.W., Whitman, R.V., 1969, *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 553 str.
3. Mitchell, J.K., 1976, *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 422 str.
4. Tajder, M., Herak, M., 1972, *Petrologija i geologija*, Školska knjiga, Zagreb, 356 str.
5. Harter, R., *Building of the Phyllosilicates*, <http://pubpages.unh.edu/~harter/crystal.htm>

⁴ Alec Westley Skempton (2014-2001), zaslužni geotehničar

2.14 Zadaci

1 Granulometrijski sastav

Uzorak pijeska suhe težine	$G =$	10 N								
prosijan je na seriji sita veličina otvora	$D_i =$	4	2,00	1,00	0,50	0,25	0,15	0,06	0,00 mm	
Nakon sisanja izvagane su količine materijala zaostale na pojedinim sitima										
	$\Delta G_i =$		0,40	1,20	2,40	3,00	1,80	0,90	0,30 N	
što znači da je zrna dijametra većeg od D_i										
	bilo $\Sigma \Delta G_i =$		0,40	1,60	4,00	7,00	8,80	9,70	10,00 N	
tj. da je, izraženo u postotcima težine,										
	zrna dijametra manjeg od D_i									
	$(1 - \Sigma \Delta G_i / G) =$	100	96	84	60	30	12	3	0 %	
što zovemo										
	postotak prolaza kroz sito									



2 Gustoća tla

Pri mjerenju prirodne gustoće trebamo masu uzorka sačuvane mase i strukture, te volumen uzorka – koji izračunamo iz dijametra i visine ili slično. Vlažnost uzorka i daljnje podatke dobit ćemo vaganjem nakon sušenja uzorka.

Iako pri sušenju ne čuvamo više strukturu uzorka, hoćemo sačuvati za vaganje cijeli uzorak, dakle uzorak treba smjestiti u posudicu dovoljno veliku da pri odlamanju uzorka ne dođe do gubljenja čestica i dovoljno malu da joj masa/težina mogu biti određene dovoljno precizno.

Ovdje su dana četiri primjera vaganja i računanja – u četiri stupca. Student može samostalno probati doći do traženih veličina. Crveno upisani brojevi dobivaju se vaganjem i mjerenjem, plavo upisani dobivaju se računom.

oznaka posudice		15	12	22	111
važi se:					
masa (prirodno) vlažnog uzorka sa posudicom	$m_{bruto} =$	111,1 g	234,5	123,4	666,6
volumen uzorka	$V =$	55,55 cm ³	123,45	55,55	333,33
masa osušenog uzorka sa posudicom	$m_{d\ bruto} =$	99,9 g	210,0	99,9	555,5
masa posudice	$m_{tara} =$	15,5 g	12,3	22,2	111,1
prenosi se:					
gustoća čvrstih čestica (iz piknometra)	$\rho_s =$	2,67 g/cm ³	2,67	2,67	2,67
gustoća vode	$\rho_w =$	1,00 g/cm ³	1,00	1,00	1,00
računa se:					
masa uzorka	$m =$	95,6 g	222,2	101,2	555,5
masa osušenog uzorka	$m_d =$	84,4 g	197,7	77,7	444,4
gustoća uzorka	$\rho =$	1,72 g/cm ³	1,80	1,82	1,67
suha gustoća	$\rho_d =$	1,52 g/cm ³	1,60	1,40	1,33
masa vode	$m_w =$	11,2 g	24,5	23,5	111,1
vlažnost	$w =$	0,133	0,124	0,303	0,250
	$=$	13%	12%	30%	25%
volumen čvrstih čestica	$V_s =$	31,6 cm ³	74,0	29,1	166,4
volumen pora	$V_p =$	23,9 cm ³	49,4	26,5	166,9
relativni porozitet	$n =$	0,43	0,40	0,48	0,50
koeficijent pora	$e =$	0,76	0,67	0,91	1,00
volumen vode	$V_w =$	11,2 cm ³	24,5	23,5	111,1
stupanj saturacije/ zasićenja	$S_r =$	0,47	0,50	0,89	0,67
	$S_r =$	47%	50%	89%	67%
gustoća uzorka	$\rho = \rho_s (1-n) + \rho_w n$	1,72	1,80	1,82	1,67
suha gustoća	$\rho_d = \rho_s (1-n)$	1,52	1,60	1,40	1,33

3 Piknometar

Volumen uzorka računa se iz dijametra i visine izrezanog valjka ili slično. Izmjeriti volumen čvrstih čestica u uzorku zahtijeva ozbiljnije napore: treba odstraniti mjehuriće zraka koji se najčešće nađu u porama tla. U tu svrhu koristimo se piknometrom.

oznaka piknometra	33	44	55
važe se:			
masa piknometra	$m_{\text{piknometra}} = 33,33 \text{ g}$	44,11	55,66
masa piknometra ispunjenog destiliranom vodom sobne temperature	$m_{\text{piknometra s vodom}} = 133,33 \text{ g}$	144,11	166,77
nakon kuhanja uzorka tako da izađu svi mjehurići vezani uz čvrste čestice i nakon hlađenja na sobnu temperaturu:			
masa piknometra sa uzorkom i vodom	$m_{\text{piknometra sa uzorkom i vodom}} = 188,88 \text{ g}$	199,99	222,22
nakon sušenja uzorka:			
masa piknometra sa suhim uzorkom	$m_{\text{piknometra sa suhim uzorkom}} = 122,22 \text{ g}$	133,33	144,44
računa se:			
masa uzorka kao masa piknometra sa uzorkom - masa piknometra	$m_{\text{uzorka}} = 88,89 \text{ g}$	89,22	88,78
masa vode koju u piknometru s vodom ne zauzima uzorak	$m_{\text{piknometra s vodom}} - (m_{\text{piknometra s uzorkom i vodom}} - m_{\text{uzorka}}) = 33,34 \text{ g}$	33,34	33,33
gustoća vode	$\rho_w = 1,00 \text{ g/cm}^3$	1,00	1,00
volumen te vode, kao masa dijeljena sa gustoćom vode	33,34 cm ³	33,34	33,33
specifična masa čvrstih čestica			
kao omjer mase i volumena čvrstih čestica	$\rho_s = 2,67 \text{ g/cm}^3$	2,68	2,66
srednja vrijednost više mjerenja:			
specifična masa čvrstih čestica	$\rho_s = 2,67 \text{ g/cm}^3$	2,67	2,67

4

Odredite suhu jediničnu težinu, porozitet i koeficijent pora

jedinična težina tla je	$\gamma =$	20,0 kN/m ³
specifična težina čvrstih čestica je	$\gamma_s =$	27,0 kN/m ³
početna vlažnost je	$w =$	18 %
	$\gamma_w =$	10 kN/m ³
$\gamma = \gamma_d (1 + w)$ dakle	$\gamma =$	20 kN/m ³
	$\gamma_d = \gamma / (1 + w) =$	16,9 kN/m ³
$\gamma_d = \gamma_s (1 - n)$ dakle	$n = 1 - \gamma_d / \gamma_s =$	0,37
$e/1 = n / (1 - n)$ dakle	$e = n / (1 - n) =$	0,59
$\gamma = \gamma_s (1 - n) + \gamma_w n$ Sr =		
težina vode u jediničnom volumenu	$\gamma - \gamma_d =$	3,1 kN/m ³
što je, dakle, jednako	$\gamma_w n$ Sr =	3,1 kN/m ³
težina vode u jediničnom volumenu ako je tlo posve saturirano	$\gamma_w n =$	3,7 kN/m ³
stupanj saturacije ili stupanj zasićenja	Sr =	0,82

5

Kako će se promijeniti jedinična težina promatranog sloja tla ako se, uslijed podizanja razine podzemne vode, potpuno saturira?

$\gamma = \gamma_s (1 - n) + \gamma_w n$ Sr =	ako Sr =	1
	$\gamma_w =$	10 kN/m ³
	$\gamma_2 =$	22,6 kN/m ³

6

Kako će se promijeniti jedinična težina promatranog sloja tla ako se, zbijanjem, koeficijent pora smanji

	sa	$e_1 =$	0,59
	na	$e_2 =$	0,40
	početna gustoća je	$\rho_{d1} =$	1,69 t/m ³
$\rho_d = \rho_s (1 - n)$		$n_1 =$	0,37
$n = e / (1 + e)$		$n_2 =$	0,29
$\rho_s = \rho_d / (1 - n)$			
		$\rho_{d2} = \rho_{d1} (1 - n_2) / (1 - n_1) =$	1,93 t/m ³