УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA
РУДАРСКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF MINING
1997

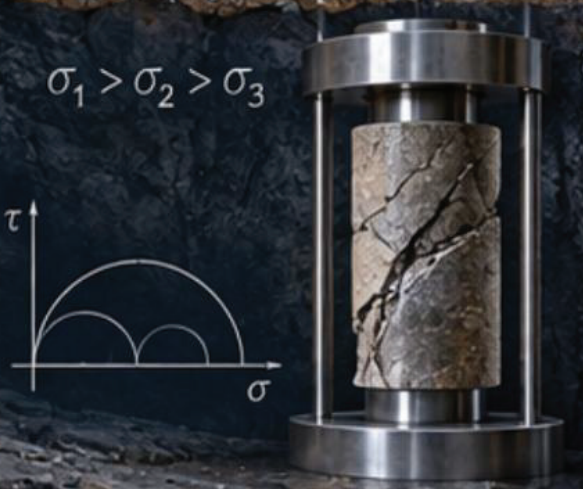
Jelena Trivan • Srđan Kostić

Praktikum iz Mehanike stijena i tla

TEORIJA • EKSPERIMENT • PRIMJENA

GEOMATERIJALI
NAPONI I DEFORMACIJE
STABILNOST
PODZEMNI ISKOPI
GEOTEHNIČKE ANALIZE





Prijedor / Beograd, 2026

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA
РУДАРСКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF MINING

Jelena Trivan, Srđan Kostić

Praktikum iz Mehanike stijena i tla

Prijedor/Beograd, 2026.

PREDGOVOR

Praktikum iz Mehanike stijena i tla namijenjen je prvenstveno studentima Rudarskog fakulteta Prijedor Univerziteta u Banjoj Luci kao prateći nastavni materijal za vježbe iz oblasti mehanike tla i mehanike stijena. Koncipiran je tako da poveže osnovne teorijske pojmove sa postupcima laboratorijskih i terenskih ispitivanja, proračunima i inženjerskim tumačenjem dobijenih rezultata.

Sadržaj praktikuma organizovan je kroz deset vježbi koje obuhvataju granulometrijski sastav, plastičnost i konsistenciju tla, zbijanje i CBR, geostatičke napone, stišljivost i konsolidaciju, smičuću čvrstoću tla, čvrstoću i deformabilnost stijena i stijenskih masa, kao i primarna i sekundarna naponska stanja u stijenskim masama. Svaka vježba povezuje teorijski uvod sa osnovnim podacima, radnim dijagramima, zadacima i riješenim primjerima.

Cilj praktikuma nije samo usvajanje postupaka proračuna, već razvijanje sposobnosti da se rezultat ispitivanja pravilno protumači, da se prepoznaju pretpostavke i ograničenja pojedinih metoda i da se laboratorijski ili terenski podatak poveže sa realnim geološkim i inženjerskim uslovima. Zbog toga su uz formule i postupke posebno naglašeni način prikaza rezultata, jedinice, uslovi ispitivanja i granice primjene pojedinih relacija.

Praktikum je pripremljen kao radni nastavni materijal koji studentima treba da olakša praćenje vježbi, samostalnu obradu podataka i pripremu za provjeru znanja. Istovremeno, može poslužiti kao sažet podsjetnik na osnovne metode i pojmove koji se kasnije primjenjuju u geotehničkoj i rudarskoj praksi.

Autori zahvaljuju studentima i kolegama čija su pitanja i iskustva iz nastave doprinijeli jasnijem oblikovanju pojedinih primjera i zadataka. Sve eventualne sugestije za buduća izdanja biće korisne za dalje unapređenje praktikuma.

Prijedor/Beograd, 2026.
Autori

SADRŽAJ

Vježba br.1 Granulometrijski sastav tla i uticaj mraza na tlo 1
1.1 Granulometrijski sastav tla 1
1.1.1 Karakteristični prečnici i koeficijenti gradacije 2
1.1.2 Klasifikacija na osnovu granulometrijskog sastava 3
1.2 Određivanje granulometrijskog sastava u laboratoriji 4
1.2.1 Priprema uzorka 4
1.2.2 Prosijavanje – suvi i mokri postupak 5
1.2.3 Hidrometrijska analiza 5
1.3 Mrazoosjetljivost tla 6
1.3.1 Granulometrijski kriterijumi za preliminarnu ocjenu 7
1.4 Osnovni podaci 11
1.5 Hidrometrijska analiza 12
1.6 Radni dijagrami za klasifikaciju i procjenu mrazoosjetljivosti 13
1.7 Zadatak 15
1.8 Riješeni primjer 16
Vježba br.2 Plastičnost i konsistencija tla - granice tečenja, plastičnosti i skupljanja 19
2.1 Plastičnost i stanja konsistencije tla 19
2.1.1 Indeksi izvedeni iz granica konsistencije 20
2.2 Određivanje granice tečenja i granice plastičnosti 20
2.2.1 Kasagrandeova metoda 21
2.2.2 Metoda padajućeg konusa 22
2.2.3 Granica plastičnosti 22
2.3 Granica skupljanja 22
2.4 Klasifikacija na osnovu plastičnosti 23
2.5 Osnovni podaci 28
2.6 Proračun sadržaja vode 28
2.7 Zadatak 29
2.8 Riješeni primjer 29
Vježba br.3 Zbijanje tla i kalifornijski indeks nosivosti (CBR) 33
3.1 Zbijanje tla 33
3.1.1 Standardni i modifikovani Proktorov opit 33
3.1.2 Osnovni proračun 34
3.1.3 Kontrola zbijenosti na terenu 35
3.2 Kalifornijski indeks nosivosti (CBR) 36
3.3 Osnovni podaci za Proktorov opit 41
3.4 Osnovni podaci za CBR opit 41
3.5 Zadatak 42
3.6 Riješeni primjer 42
Vježba br.4 Geostatički naponi (naponi u tlu) 47
4.1 Ukupni, neutralni i efektivni naponi 47
4.1.1 Horizontalni napon u stanju mirovanja 47
4.2 Slojevito tlo i pijezometarski nivoi 48
4.3 Dopunski naponi od spoljašnjeg opterećenja 48
4.3.1 Pretpostavke i granice primjene 48
4.4 Putanja napona u pojednostavljenom p-q prikazu 49
4.4.1 Fizičko značenje efektivnog napona i raspodjela opterećenja u poroznoj sredini 49
4.4.2 Nivo podzemne vode, kapilarna zona i nezasićeno tlo 50
4.4.3 Koeficijent pritiska u mirovanju K_0 i istorija naprezanja 51
4.4.4 Priraštaj napona ispod raspodijeljenih površinskih opterećenja 52
4.4.5 Sila filtracije, hidraulički gradijent i efektivni napon 53
4.4.6 Putanja napona, drenirani i nedrenirani odgovor 54
4.5 Redoslijed proračuna 55
4.6 Osnovni podaci 59

4.6.1 Zadatak 1 ... 59
4.6.2 Zadatak 2 ... 59
4.7 Zadatak ... 60
4.8 Riješeni primjer ... 61
Vježba br.5 Stišljivost tla i jednodimenzionalna konsolidacija - edometarski opit ... 63
5.1 Stišljivost tla ... 63
5.1.1 Edometar i princip opita ... 63
5.1.2 Osnovne veličine i obrada rezultata ... 64
5.2 Jednodimenzionalna konsolidacija ... 65
5.2.1 Logaritamska metoda - Kasagrande ... 66
5.2.2 Metoda kvadratnog korijena vremena - Tejlor ... 66
5.3 Kompresiona kriva i napon prekonsolidacije ... 66
5.4 Osnovni podaci ... 70
5.5 Radni dijagrami ... 72
5.6 Zadatak ... 73
5.7 Riješeni primjer ... 74
Vježba br.6 Smičuća čvrstoća tla - direktno smicanje, triaksijalni CU i jednoaksijalni opit ... 77
6.1 Smičuća čvrstoća tla ... 77
6.2 Opit direktnog smicanja ... 77
6.2.1 Vršna i rezidualna čvrstoća ... 78
6.3 Triaksijalni CU opit ... 79
6.3.1 Napon u ravni loma ... 81
6.4 Jednoaksijalni opit ... 81
6.5 Osnovni podaci za direktno smicanje ... 85
6.6 Osnovni podaci za triaksijalni CU opit ... 86
6.7 Osnovni podaci za jednoaksijalni opit ... 86
6.8 Radni dijagrami ... 87
6.9 Zadatak ... 88
6.10 Riješeni primjer ... 89
Vježba br.7 Čvrstoća stijena na pritisak, zatezanje i smicanje ... 93
7.1 Čvrstoća intaktne stijene i stijenske mase ... 93
7.2 Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak (UCS) ... 93
7.2.1 Indeks tačkastog opterećenja kao indirektna procjena UCS ... 94
7.2.2 Uticaj vode i ciklusa smrzavanje–odmrzavanje ... 95
7.3 Čvrstoća stijene na zatezanje ... 95
7.4 Smičuća čvrstoća i Mohr–Kulonov kriterijum ... 96
7.4.1 Didaktička procijena c i φ iz pritiska i zatezanja ... 97
7.4.2 Direktno smicanje duž diskontinuiteta ... 97
7.5 Orijentaciona klasifikacija intaktne stijene prema UCS ... 98
7.6 Osnovni podaci za studentski zadatak ... 102
7.7 Zadatak ... 103
7.8 Riješeni primjer ... 105
Vježba br.8.Deformabilnost čvrstih stijenskih masa ... 107
8.1 Pojam deformabilnosti stijenske mase ... 107
8.1.1 Istovremena i naknadna deformacija ... 107
8.2 Terenska ispitivanja deformabilnosti ... 108
8.3 Moduli deformacije i elastičnosti ... 109
8.4 Dinamički modul iz brzina P i S talasa ... 109
8.4.1 Statička i dinamička deformabilnost stijenske mase ... 109
8.4.2 Uticaj diskontinuiteta, anizotropije i efekta razmjere ... 111
8.4.3 Nelinearnost, zatvaranje pukotina i zavisnost od naponskog nivoa ... 112
8.4.4 Vremenski zavisne deformacije i uticaj vode ... 113
8.4.5 Izbor reprezentativnog modula i kontrola kvaliteta rezultata ... 114
8.5 Obrada rezultata opita hidrauličkog jastuka ... 114
8.6 Osnovni podaci ... 117

8.7 Radni dijagrami ... 121
8.8 Zadatak ... 122
8.9 Riješeni primjer ... 122
Vježba 9. Primarna naponska stanja u stijenskim masama ... 125
9.1 In situ i primarno naponsko stanje ... 125
9.2 Vertikalna komponenta napona ... 125
9.3 Horizontalni naponi: modeli i ograničenja ... 126
9.4 Uticaj erozije i rasterećenja ... 126
9.5 Određivanje in situ napona ... 127
9.5.1 Prostorna priroda naponskog polja i reprezentativnost mjerenja ... 127
9.5.2 Glavni naponi, orijentacija i odnos horizontalnih komponenti ... 128
9.5.3 Overcoring metode i princip oslobađanja napona ... 128
9.5.4 Hidrauličko frakturiranje i HTPF ... 129
9.5.5 Indirektni pokazatelji naponskog stanja u bušotinama ... 129
9.5.6 Geološki i seizmološki indikatori regionalnog napona ... 130
9.5.7 Uticaj topografije, dolina i geološke strukture ... 130
9.5.8 Zaostali, tektonski i termički naponi ... 131
9.5.9 Nesigurnost, rasipanje i kontrola kvaliteta mjerenja ... 131
9.5.10 Inžinjerski značaj primarnog naponskog stanja ... 132
9.6 Redoslijed proračuna ... 132
9.7 Osnovni podaci ... 136
9.7.1 Zadatak 1 ... 136
9.7.2 Zadatak 2 ... 136
9.8 Zadatak ... 137
9.9 Riješeni primjer ... 137
Vježba 10. Sekundarna naponska stanja u stijenskim masama ... 139
10.1 Preraspodjela napona oko podzemnog iskopa ... 139
10.2 Kiršovo rješenje za kružni otvor ... 139
10.3 Elastična, plastična i oštećena zona ... 140
10.4 Seizmička brzina kao indikator promjena stijenske mase ... 140
10.4.1 Mehanizam preraspodjele napona i deformacija oko iskopa ... 141
10.4.2 Uticaj odnosa glavnih napona i oblika podzemnog otvora ... 142
10.4.3 Uloga diskontinuiteta, anizotropije i zone oštećene iskopom ... 143
10.4.4 Elastoplastično ponašanje i interakcija stijenske mase sa podgradom ... 144
10.4.5 Seizmički pokazatelji naponsko-deformacionog stanja i ograničenja tumačenja ... 145
10.4.6 Praktična interpretacija sekundarnog naponskog stanja ... 146
10.5 Obrada radijalnih profila ... 147
10.6 Osnovni podaci ... 150
10.7 Radni dijagram ... 151
10.8 Zadatak ... 152
10.9 Riješeni primjer ... 152

VJEŽBA BR. 1

Granulometrijski sastav tla i uticaj mraza na tlo

1.1 Granulometrijski sastav tla

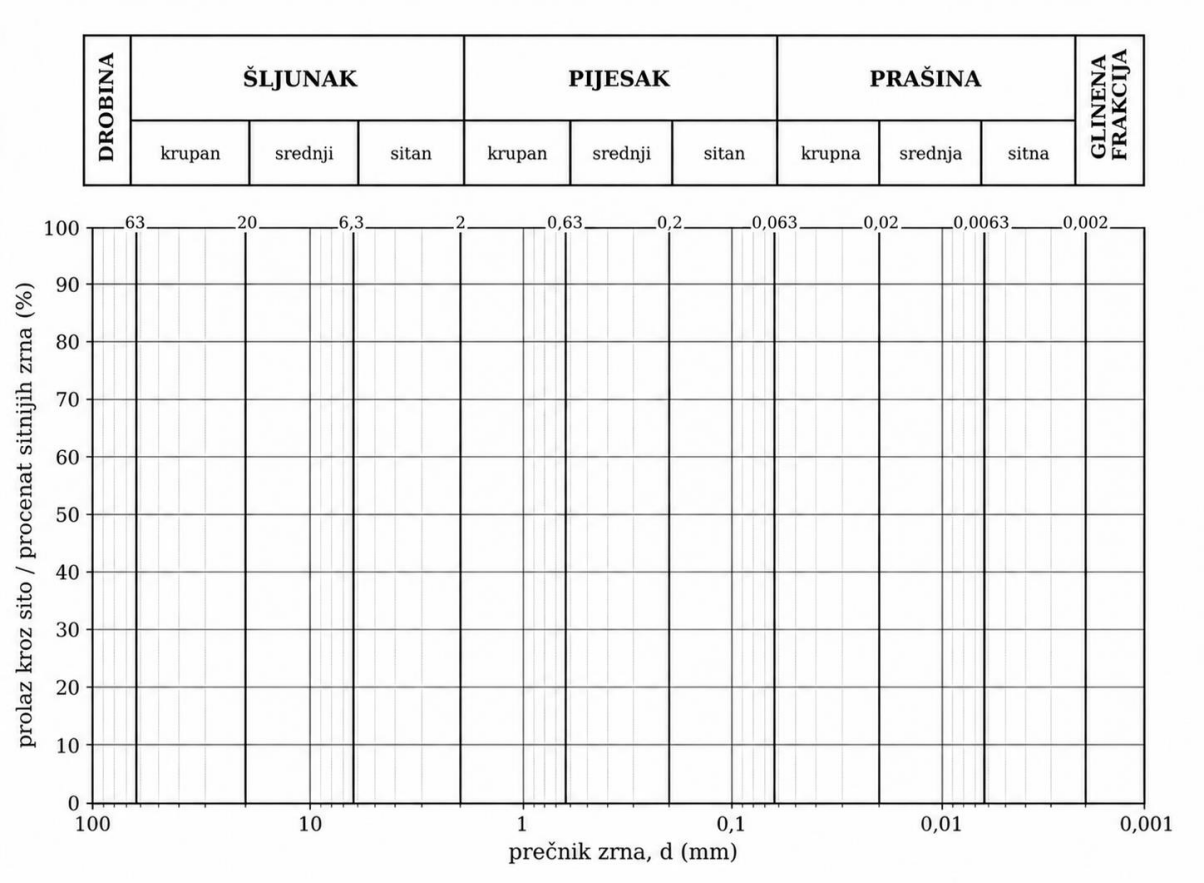
Tlo je sastavljeno od čvrstih čestica različite veličine, oblika i mineralnog sastava. Raspodjela čestica prema veličini opisuje se granulometrijskim sastavom, koji predstavlja jedan od osnovnih podataka za identifikaciju i preliminarnu klasifikaciju tla. Granulometrijski sastav je posebno značajan za procjenu zbijanja, filtracionih osobina, kapilarnog ponašanja i pogodnosti materijala za ugradnju, ali se inžinjersko ponašanje ne može pouzdano ocijeniti samo na osnovu veličine zrna [Kostić, Vasović i Kuzmanović, 2023; Knappett i Craig, 2020].

Rezultati granulometrijske analize najčešće se prikazuju granulometrijskom krivom. Na logaritamskoj apscisi nanosi se prečnik zrna d, dok ordinata predstavlja kumulativni procenat čestica sitnijih od izabrane veličine. Takav način prikaza omogućava da se iz iste krive očitaju udjeli glavnih frakcija, karakteristični prečnici i oblik raspodjele veličine zrna [ISO, 2016].

Tabela 1.1. Granice veličinskih frakcija usvojene u vježbi

Frakcija	Opseg d (mm)	Podfrakcije	Granice podfrakcija (mm)
Šljunak	63 – 2	krupan / srednji / sitan	63–20 / 20–6,3 / 6,3–2
Pijesak	2 – 0,063	krupan / srednji / sitan	2–0,63 / 0,63–0,2 / 0,2–0,063
Prašina	0,063 – 0,002	krupna / srednja / sitna	0,063–0,02 / 0,02–0,0063 / 0,0063–0,002
Glinena frakcija	< 0,002	—	< 0,002

U ovoj vježbi granice frakcija su usklađene sa savremenom ISO terminologijom. Granica od 2 mm razdvaja šljunak i pijesak, a 0,063 mm pijesak i prašinu. Čestice manje od 0,002 mm označavaju se kao glinena frakcija. Važno je naglasiti da veličina zrna sama po sebi ne određuje mineralogiju niti plastičnost tla; zato formalna klasifikacija sitnozrnih tala zahtijeva i dodatne pokazatelje, naročito granice konzistencije [ISO, 2017a; ISO, 2017b].



Slika 1.1. Radni dijagram granulometrijskog sastava tla sa označenim granicama frakcija.

1.1.1 Karakteristični prečnici i koeficijenti gradacije

Sa granulometrijske krive određuju se karakteristični prečnici D_{10}, D_{30} i D_{60}, koji odgovaraju prečnicima pri kojima je 10 %, 30 % i 60 % uzorka sitnije od posmatrane veličine. D_{10} se često naziva efektivnim prečnikom i koristi se kao orijentacioni pokazatelj kod procjene filtracionog ponašanja krupnozrnih tala. Širina raspodjele veličina zrna može se opisati koeficijentom uniformnosti C_u, dok se oblik centralnog dijela krive opisuje koeficijentom zakrivljenosti C_c [Das i Sobhan, 2018; ASTM International, 2025b].

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ako je $C_u \prec 5$, tlo se smatra ravnomjernog sastava, odnosno neravnomjerno granulisano; u tlu preovlađuje jedna frakcija. Ako je $5 \prec C_u \prec 15$, za tlo kažemo da je umjereno neravnomjernog sastava, odnosno umjereno granulisano, a ako je $C_u \succ 15$, za tlo kažemo da je neravnomjernog sastava, odnosno ravnomjerno granulisano i u takvom tlu ne preovlađuje jedna frakcija, već je više frakcija približno podjednako zastupljeno.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

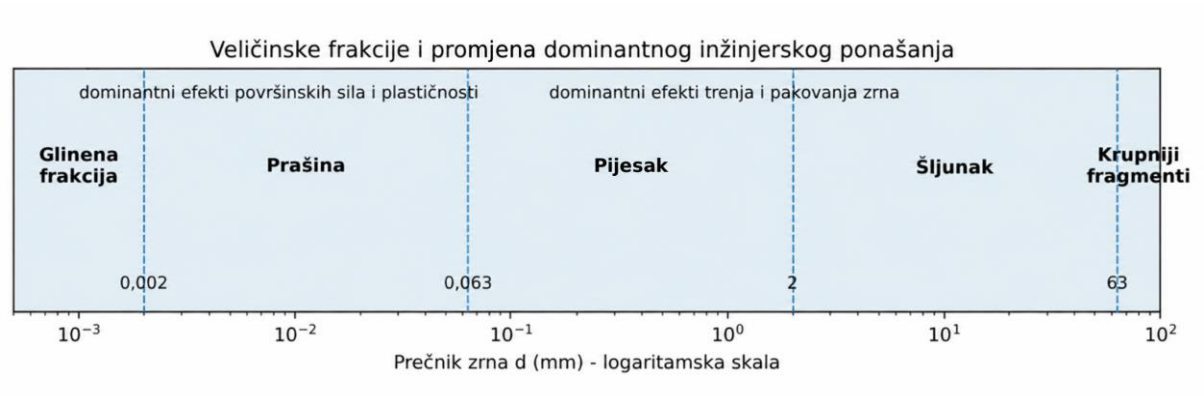
Vrednosti C_u i C_c tumače se u okviru izabranog klasifikacionog sistema. Nije opravdano koristiti jedan univerzalni prag za sva tla. Kod krupnozrnih tala ovi koeficijenti mogu pomoći pri ocjeni da li je materijal usko ili široko gradiran, dok kod sitnozrnih tala dominiraju i druge osobine, kao što su plastičnost, struktura i mineralni sastav [ASTM International, 2025b].

1.1.2 Klasifikacija na osnovu granulometrijskog sastava

Granulometrijska kriva omogućava određivanje procentualnog učešća šljunka, pijeska, prašine i glinene frakcije. Identifikacija i opis tla treba da se zasnivaju na pravilima ISO 14688-1, dok ISO 14688-2 daje principe klasifikacije za geotehničke potrebe. U ovoj vježbi tradicionalni trougli dijagram pijesak–prašina–glina zadržava se kao didaktičko pomagalo. Prije ucrtavanja u trougli dijagram šljunkovita frakcija se izuzima, a preostale tri frakcije normalizuju na zbir od 100 %.

Granulometrijski sastav je indeksna karakteristika koja snažno utiče na način pakovanja zrna i zapreminu pora. Široko gradirana krupnozrna tla mogu, uz odgovarajuće zbijanje, dostići veću gustinu jer sitnija zrna popunjavaju pore između krupnijih. Nasuprot tome, usko gradirana tla imaju uži raspon veličina zrna i često veći udio međuzrnskih pora. Ovakvo tumačenje je kvalitativno: mehanička svojstva zavise i od oblika zrna, mineralogije, zbijenosti, strukture i naponskog stanja.

Posebno je važan udio sitne frakcije. Relativno mali procenat prašine ili gline može bitno promi8jeniti vodopropustljivost, kapilarno podizanje, mrazoosjetljivost i način zbijanja. Zato se granulometrija ne koristi izolovano za ocjenu plastičnosti i čvrstoće sitnozrnih tala; za njih su potrebni i dodatni indeksni pokazatelji, prije svega granice konsistencije.



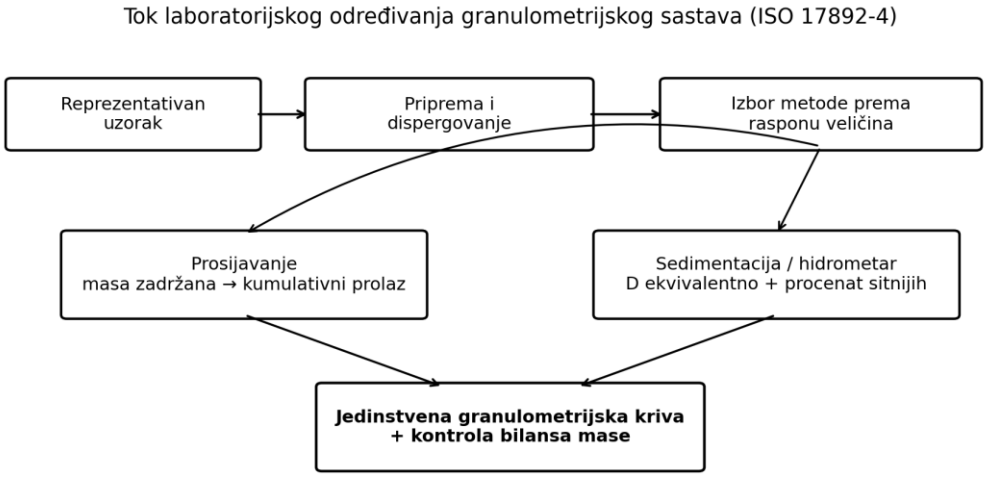
Slika 1.1a. Veličinske frakcije i šematski prikaz promjene dominantnog inžinjerskog ponašanja. Autorska nastavna šema prema [ISO 14688 i ISO 17892-4].

1.2 Određivanje granulometrijskog sastava u laboratoriji

Prema ISO 17892-4, raspodjela veličine čestica određuje se prosijavanjem, sedimentacijom ili kombinacijom obje metode. Izbor postupka zavisi od raspona veličina zrna i količine sitne frakcije. Kod mješovitih tala uobičajeno je da se krupniji dio ispituje prosijavanjem, a sitniji sedimentacionom metodom, nakon čega se oba rezultata povezuju u jedinstvenu granulometrijsku krivu [ISO, 2016].

Prosijavanje daje masu zadržanu na sitima i kumulativni procenat prolaza, hidrometrijska analiza daje ekvivalentni prečnik i procenat sitnijih čestica, a kod mješovitih tala oba postupka se povezuju u jedinstvenu granulometrijsku krivu.

Kod kombinovane analize ključno je da se dio rezultata dobijen prosijavanjem i dio dobijen sedimentacijom svedu na istu početnu masu uzorka. Kontrola bilansa mase je osnovna provjera kvaliteta. Sedimentacioni prečnik je ekvivalentni prečnik izveden iz brzine taloženja i zato zavisi od pretpostavki o obliku i gustini čestica; on nije neposredno geometrijsko mjerenje svake čestice.



Slika 1.1b. Tok određivanja granulometrijskog sastava kombinovanjem prosijavanja i sedimentacije. Autorska nastavna šema prema [ISO 17892-4].

1.2.1 Priprema uzorka

Uzorak mora biti reprezentativan za ispitivani materijal. Prije ispitivanja uklanjaju se neželjeni strani sastojci, uzorak se suši prema propisanoj proceduri i rastresaju se grudvice bez drobljenja osnovnih mineralnih zrna. Posebna pažnja potrebna je kod koherentnih tala: cilj pripreme je razdvajanje agregata, a ne usitnjavanje pojedinačnih čestica. Početna suva masa uzorka i sve mase dobijene tokom postupka moraju biti evidentirane, jer je bilans mase osnovna kontrola kvaliteta ispitivanja [ISO, 2016].

1.2.2 Prosijavanje – suvi i mokri postupak

Kod suvog prosijavanja uzorak se postavlja na garnituru sita poređanih od najvećeg ka najmanjem otvoru, sa poklopcem na vrhu i prijemnom posudom na dnu. Prosijavanje se izvodi ručno ili mehaničkim vibriranjem, sve dok dodatno prosijavanje više ne mijenja značajno masu zadržanu na pojedinim sitima. Poslije završetka mjeri se masa zadržana na svakom situ, određuje kumulativna zadržana masa i računa procenat prolaza u odnosu na početnu suvu masu uzorka [ASTM International, 2025a].



Slika 1.2. Garnitura sita na vibracionom stolu i izgled otvora sita [Kostić,Vasović,Kuzmanović 2023].

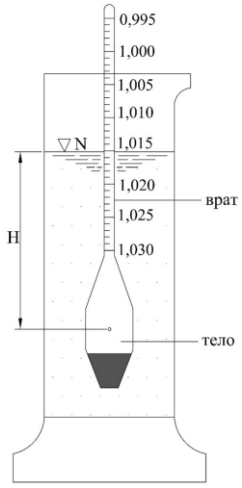
Mokro prosijavanje primjenjuje se kada sitne čestice prijanjaju za krupnija zrna ili grade agregate koji se suvim postupkom ne mogu razdvojiti. Materijal se disperguje u vodi i ispira preko odgovarajućeg sita tako da sitna frakcija prođe, a krupnija ostane na situ. Nakon ispiranja, zadržani materijal se suši i ponovo mjeri. Kod oba postupka zbir izmjerenih frakcija mora biti saglasan sa početnom masom u granicama dopuštenog laboratorijskog odstupanja [ISO, 2016; ASTM International, 2025a].

1.2.3 Hidrometrijska analiza

Hidrometrijska analiza zasniva se na sedimentaciji čestica u tečnosti. Veće i teže čestice talože se brže, a sitnije sporije. U idealizovanom obliku Stoksov zakon povezuje brzinu taloženja s prečnikom sferne čestice, razlikom gustine čestice i vode i dinamičkom viskoznošću tečnosti. Zbog toga se u proračunu dobija ekvivalentni prečnik čestice, odnosno prečnik zamišljene sferne čestice koja bi se taložila istom brzinom kao stvarna čestica tla [ISO, 2016; ASTM International, 2021].

$$v = \frac{g \cdot (\rho_s \rho_w) \cdot D^2}{18\mu}.$$

Prije početka mjerenja, sitna frakcija se disperguje u vodi, a suspenzija homogenizuje. Nakon prestanka miješanja, mjeri se vrijeme taloženja i očitava hidrometar. Pri obradi se primjenjuju korekcije instrumenta, meniskusa, temperature, dispergenta i efektivne dubine očitavanja. Pošto čestice tla nisu savršeno sferne i mogu imati različit oblik i mineralnu gustinu, sedimentacioni rezultat predstavlja ekvivalentnu, a ne direktno geometrijsku raspodjelu veličina. Tačan način korekcije mora odgovarati kalibraciji konkretnog hidrometra i proceduri laboratorije [ISO, 2016; ASTM International, 2021].



Slika 1.3. Aerometar za ispitivanje granulometrijskog sastava tla u menzuri sa tečnom masom [Kostić,Vasović,Kuzmanović 2023].

1.3 Mrazoosjetljivost tla

Mrazno izdizanje nastaje kada se u zoni smrzavanja formiraju i rastu ledena sočiva. Za značajno izdizanje potrebno je istovremeno prisustvo mrazoosjetljivog tla, dovoljno niske temperature i izvora vode koji omogućava dotok prema frontu smrzavanja. Prašinaste frakcije su često posebno značajne jer mogu obezbijediti kapilarni transport vode, dok su čisti šljunkovi i krupni pijeskovi obično manje skloni razvoju ledenih sočiva. Ipak, granulometrija je samo jedan od činilaca; vlažnost, nivo podzemne vode, zbijenost i trajanje smrzavanja takođe bitno utiču na ponašanje tla [Andersland i Ladanyi, 2004; Christopher, Schwartz i Boudreau, 2006].

Mehanizam mraznog izdizanja nije isto što i prosto povećanje zapremine vode pri zamrzavanju. Najveće deformacije nastaju kada se prema frontu smrzavanja kapilarno doprema nova voda i formiraju ledena sočiva. Zbog toga procjena mrazoosjetljivosti mora istovremeno razmatrati:

- (1) granulometriju i strukturu tla,

- (2) raspoloživ izvor vode i mogućnost kapilarnog dotoka i
- (3) trajanje i intenzitet negativnih temperatura.

Granulometrijski kriterijumi u ovoj vježbi služe samo kao početni indikatori.

1.3.1 Granulometrijski kriterijumi za preliminarnu ocjenu

U nastavnoj vježbi zadržani su Kasagrandeov, Ruklijev i Šajblov kriterijum, koji su prisutni u starijoj regionalnoj literaturi i omogućavaju grafičku, indikatorsku procjenu mrazoosjetljivosti. Kasagrandeov kriterijum povezuje koeficijent uniformnosti C_u sa udjelom čestica sitnijih od 0,02 mm. Ruklijev kriterijum razmatra odnos krupne frakcije D > 2 mm i udjela čestica D < 0,02 mm u frakciji 0–2 mm, dok Šajblov dijagram direktno povezuje procenat sitnijih zrna sa karakterističnim prečnikom. Rezultate treba prikazati kao preliminarnu ocjenu, uz napomenu da konačna procjena zahitjeva razmatranje vode, temperaturnog režima i drugih svojstava tla.

-Granulometrija kao opis strukture poroznog materijala

Granulometrijski sastav nije samo statistički opis veličine zrna, već jedan od osnovnih pokazatelja načina na koji se čestice mogu prostorno rasporediti. U krupnozrnom tlu kontaktna mreža između zrna prenosi najveći dio opterećenja, dok pore između zrna određuju prostor u kome se nalazi voda i vazduh. Kada je raspon prečnika širok, sitnija zrna mogu popunjavati dio pora između krupnijih i tako povećati gustinu pakovanja. Kod usko gradiranog materijala zrna su slične veličine, pa struktura često ima veći i pravilnije raspoređen porni prostor. Zbog toga se iz oblika granulometrijske krive mogu izvesti kvalitativni zaključci o zbijanju, drenaži i osjetljivosti strukture na promjenu sadržaja vode, ali ne i potpuna prognoza mehaničkog ponašanja.

Važno je razlikovati udio pojedinih frakcija od njihove uloge u skeletu tla. Mala količina sitne frakcije može biti smještena u porama između zrna pijeska ili šljunka i tada prvenstveno mijenja vodopropustljivost. Ako se količina sitnih čestica poveća do nivoa pri kome one razdvajaju krupna zrna i preuzimaju značajan dio kontakata, dominantni mehanizam ponašanja se mijenja. Tada kapilarne sile, plastičnost i mineralogija sitne frakcije postaju važnije od geometrije krupnih zrna. U praktičnoj klasifikaciji zato je korisno posmatrati granulometrijsku krivu zajedno sa granicama konsistencije, prirodnom vlažnošću i zbijenošću, naročito kod mješovitih tala.

Karakteristični prečnici D_{10}, D_{30} i D_{60} predstavljaju tačke na kumulativnoj krivoj, a ne stvarne prosječne prečnike svih zrna. Njihova inžinjerska vrijednost proizlazi iz toga što opisuju

različite dijelove raspodjele. D_{10} je posebno osjetljiv na sitniji dio krupnozrnog skeleta i često se koristi kao orijentacioni pokazatelj za filtracione odnose. Koeficijenti uniformnosti i zakrivljenosti daju sažet opis širine i oblika krive, ali dvije različite raspodjele mogu imati slične koeficijente. Zbog toga se pri tumačenju uvijek treba vratiti na cijelu granulometrijsku krivu, provjeriti eventualne prekide u gradaciji i povezati ih sa geološkim porijeklom i načinom nastanka materijala.

Reprezentativnost uzorka i fizička osnova laboratorijskog mjerenja

Pouzdanost granulometrijske analize počinje prije samog prosijavanja ili sedimentacije. Uzorak mora predstavljati materijal iz koga je uzet, što je posebno zahtjevno kod šljunkovitih i veoma heterogenih naslaga. Ako se iz velike količine materijala izdvoji premala masa, postoji opasnost da nekoliko krupnih zrna nesrazmjerno promijeni rezultat. Zbog toga se laboratorijska masa uzorka bira u odnosu na najveće zrno i očekivanu heterogenost. Pri redukciji uzorka cilj je očuvati isti odnos frakcija, a ne samo dobiti pogodnu količinu materijala. Greške u reprezentativnosti ne mogu se kasnije popraviti preciznijim vaganjem ili složenijim proračunom.

Prosijavanje je geometrijska metoda razdvajanja: zrno prolazi kroz otvor sita ako njegova orijentacija i karakteristične dimenzije to omogućavaju. Zbog toga oblik zrna utiče na rezultat. Izdužene i pločaste čestice mogu prolaziti kroz sito u određenoj orijentaciji iako im je jedna dimenzija znatno veća od nominalnog otvora. Dodatno, vlažne sitne čestice mogu se lijepiti za krupnija zrna, pa suvo prosijavanje tada precjenjuje krupniji dio raspodjele. Mokri postupak i odgovarajuće dispergovanje služe da se razdvoje agregati bez drobljenja primarnih mineralnih zrna, jer bi drobljenje vještački povećalo udio sitne frakcije.

Sedimentaciona analiza ima drugačiju fizičku osnovu. Ona ne mjeri geometrijski prečnik svake čestice, nego iz brzine taloženja određuje ekvivalentni prečnik zamišljene sferne čestice. Stoksov zakon podrazumijeva laminarno kretanje, poznatu viskoznost tečnosti, određenu gustinu čestica i zanemarljivu međusobnu interakciju čestica. U realnoj suspenziji odstupanja nastaju zbog nesfernog oblika zrna, različite mineralne gustine, flokulacije i promjene temperature. Zato korekcije hidrometra, meniskusa i temperature nisu formalnost, već dio fizičkog modela kojim se očitavanje prevodi u procijenjenu raspodjelu veličina.

Sitna frakcija, propustljivost i kapilarno ponašanje

Uticaj sitne frakcije na inžinjersko ponašanje često je nesrazmjerno veći od njenog masenog udjela. Pore koje kontrolišu protok vode nisu nužno određene najvećim zrnima, već najužim prolazima između čestica. Kada se u pjeskovitom ili šljunkovitom skeletu pojavi prašina ili glina, ti prolazi mogu postati mnogo manji, pa koeficijent filtracije opada za više redova veličine. Zbog toga tlo sa sličnim procentom šljunka i pijeska može imati veoma različito drenažno ponašanje u zavisnosti od količine i tipa sitnih čestica. U praksi se granulometrija zato koristi kao polazni pokazatelj, a filtraciona svojstva se po potrebi provjeravaju direktnim ispitivanjem.

Kapilarno podizanje takođe zavisi od veličine i kontinuiteta pora. U vrlo krupnom materijalu pore su velike i kapilarni uspon je mali, dok u prašinastom tlu sitne povezane pore mogu omogućiti znatno veći uspon vode. Međutim, visina kapilarnog podizanja i brzina dotoka nisu isto. Vrlo sitne pore mogu održavati veliki kapilarni pritisak, ali voda kroz njih teče sporo. Za mrazno izdizanje posebno je nepovoljna kombinacija pora koje stvaraju dovoljan usis i istovremeno omogućavaju dotok vode prema frontu smrzavanja. Zbog toga su prašinasta tla često kritičnija od čistih glina ili čistih krupnih pijeskova.

Kod glinene frakcije veličina čestice nije dovoljan opis. Minerali gline imaju veliku specifičnu površinu i površinski električni naboj, pa interakcija sa vodom zavisi od mineralogije i hemijskog sastava porne vode. Dvije zemlje sa sličnim procentom čestica manjih od 0,002 mm mogu imati veoma različitu plastičnost, bubrenje i propustljivost. Granulometrija zato daje geometrijski okvir, dok Aterbergove granice i drugi indeksi daju dopunski uvid u aktivnost sitne frakcije. Ova razlika je važna pri izboru materijala za nasipe, filtre, tampon slojeve i zaptivne jezgre.

Fizički mehanizam mraznog izdizanja

Mrazno izdizanje je proces spregnutog prenosa toplote i vode. Kada temperatura u tlu padne ispod tačke smrzavanja, ne zamrzava se nužno sva porna voda odjednom. U sitnim porama i uz površine mineralnih čestica dio vode može ostati nezamrznut i pri temperaturama ispod 0 °C. Na frontu smrzavanja nastaje termodinamički potencijal koji privlači vodu iz nezamrznute zone. Ako postoji hidraulička veza sa izvorom vode, voda migrira prema hladnijoj zoni, zamrzava se i gradi slojeve odnosno ledena sočiva. Upravo ovaj dodatni dotok vode omogućava deformacije znatno veće od prostog zapreminskog širenja vode pri prelasku u led.

Za razvoj ledenih sočiva potrebna su tri elementa: dovoljno niske temperature tokom dovoljno dugog vremena, tlo sa pogodnom strukturom pora i raspoloživ izvor vode. Ako jedan od ova tri uslova izostane, mrazno izdizanje može biti malo iako granulometrijski kriterijum označava tlo kao potencijalno osjetljivo. Na primjer, isti prašinasti materijal može biti kritičan u usjeku sa visokom podzemnom vodom, a relativno stabilan u dobro dreniranom nasipu. Zbog toga se granulometrijski dijagrami tumače kao preliminarni indikatori, a ne kao potpuna procjena rizika.

Nakon odmrzavanja, problem nije završen. Ledena sočiva se tope, povećava se sadržaj vode, a prethodno razmaknuta zrna privremeno formiraju rastresitiju strukturu. Posljedica može biti pad nosivosti, pojava kolotraga ili neravnomjerno slijeganje kolovozne konstrukcije. Inžinjerske mjere zato obuhvataju ne samo izbor manje mrazoosjetljivog materijala, već i prekid kapilarnog dotoka, drenažu, zamjenu tla, termičku izolaciju ili povećanje debljine zaštitnog sloja. Izbor mjere zavisi od klimatskih uslova, dubine smrzavanja, režima vode i zahtijevane pouzdanosti objekta.

Inžinjersko tumačenje granulometrijske krive i kontrola nesigurnosti

Granulometrijska kriva je najkorisnija kada se tumači zajedno sa namjenom materijala. Za nasipe se posmatra mogućnost zbijanja i stabilnost skeleta; za drenažne slojeve traži se dovoljna propustljivost; za filtre je važna kompatibilnost sa susjednim tlom kako bi se spriječilo ispiranje sitnih čestica; za kolovozne slojeve razmatraju se nosivost, mrazoosjetljivost i promjena ponašanja pri vlaženju. Zbog toga ista granulometrija ne dobija isti inžinjerski značaj u svim konstrukcijama. Projektni zaključak treba da poveže raspodjelu veličina sa funkcijom sloja i očekivanim hidrauličkim i mehaničkim opterećenjem.

Pri obradi rezultata korisno je provjeriti kontinuitet krive i bilans mase. Neobjašnjiv skok između dijela dobijenog prosijavanjem i dijela dobijenog hidrometrom može ukazivati na grešku u redukciji mase, nedovoljno dispergovanje ili pogrešnu korekciju sedimentacionog rezultata. Slično tome, zbir zadržanih masa koji se značajno razlikuje od početne mase ukazuje na gubitak materijala ili vlagu koja nije pravilno uzeta u obzir. Takve kontrole su važnije od prikazivanja velikog broja decimala, jer rezultat može biti numerički precizan, a fizički pogrešan.

Nesigurnost se može smanjiti ponovljenim uzorkovanjem i poređenjem sa geološkim opisom. Prirodne naslage često pokazuju prostornu promjenljivost, pa jedna kriva ne mora opisivati

cijeli sloj. U praksi se zato traži skup reprezentativnih analiza i posmatra raspon rezultata. Ako se projektna odluka nalazi blizu granice klasifikacionog ili mraznog kriterijuma, opravdano je koristiti dodatna ispitivanja umjesto da se zaključak zasniva na jednoj graničnoj vrijednosti. Takav pristup povezuje laboratorijski rezultat sa stvarnim inžinjerskim rizikom i sprečava preveliko oslanjanje na pojednostavljene dijagrame.

1.4 Osnovni podaci

U nastavku su dati korigovani podaci za prosijavanje i hidrometrijsku analizu. Podaci su usklađeni tako da bilans mase bude zatvoren i da se mogu neposredno koristiti za računsku i grafičku obradu.

Tabela 1.2. Osnovni podaci za proračun

Veličina	Vrijednost
Ukupna masa uzorka, m_s	1000,0 g
Masa prosijane frakcije, m_1	720,0 g
Frakcija < 0,1 mm, $m_2 = m_s - m_1$	280,0 g
Faktor redukcije, m_2 / m_s	0,280
Masa za hidrometrijsku analizu, m_A	40,0 g
Specifična gustina čvrstih čestica, G_s	2,68
Korekcija areometra, C_A	+1,40
Korekcija meniskusa, C_M	+0,50
Korekcija sredstva za dispergovanje, C_K	−0,70
Ukupna korekcija, $C = C_A + C_M + C_K$	+1,20
Konstanta za proračun	K ≈ 3,99

Masa zadržana na situ 15 mm usvojena je kao 7,0 g, čime zbir svih zadržanih masa odgovara masi prosijane frakcije m_1 = 720,0 g.

Tabela 1.3. Korigovani rezultati prosijavanja

Otvor sita (mm)	Masa zadržana (g)	Kumulativno zadržano (g)	Prošlo kroz sito (g)	Prolaz (%)
30	0,0	0,0	1000,0	100,00
20	20,0	20,0	980,0	98,00
15	7,0	27,0	973,0	97,30
10	53,0	80,0	920,0	92,00
5	120,0	200,0	800,0	80,00
2	170,0	370,0	630,0	63,00
1	110,8	480,8	519,2	51,92
0,6	88,7	569,5	430,5	43,05
0,2	80,5	650,0	350,0	35,00
0,1	70,0	720,0	280,0	28,00

1.5 Hidrometrijska analiza

Za hidrometrijsku analizu u ovom nastavnom primjeru koristi se redoslijed proračuna

$$R_c = R + C + C_t,\ P_h = K \cdot R_c\ i\ P_{uk} = Ph\ \left(m^2 / ms\right),$$

gdje je: R_C - konačno korigovano očitavanje, P_h -procenat sitnijih čestica u hidrometrijskom uzorku, a P_{uk} -procenat sitnijih čestica sveden na ukupnu masu uzorka.

Tabela 1.4. Ulazni podaci hidrometrijske analize

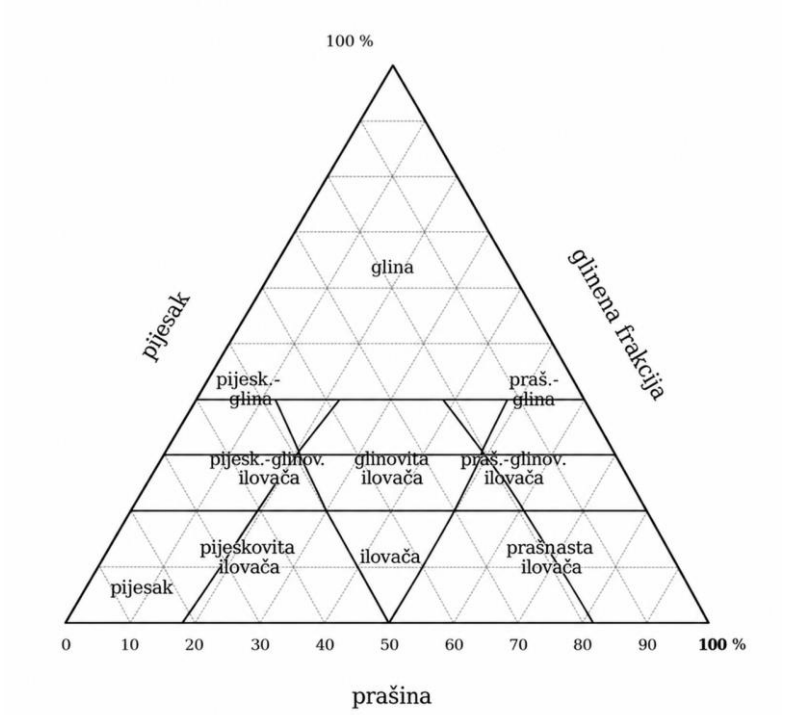
Vrijeme taloženja	Očitavanje R	Temperatura (°C)	C_t	Ekvivalentni prečnik D (mm)
30 s	15,0	19,0	−0,2	0,082
1 min	12,8	19,0	−0,2	0,051
2 min	10,0	19,0	−0,2	0,0365
5 min	7,3	19,0	−0,2	0,0238
15 min	4,6	19,0	−0,2	0,0140
45 min	3,1	19,3	−0,1	0,0082
2 h	2,2	19,8	0,0	0,0051
5 h	0,7	20,8	+0,1	0,00318
24 h	−0,3	19,8	0,0	0,00148

Tabela 1.5. Proračunati rezultati hidrometrijske analize

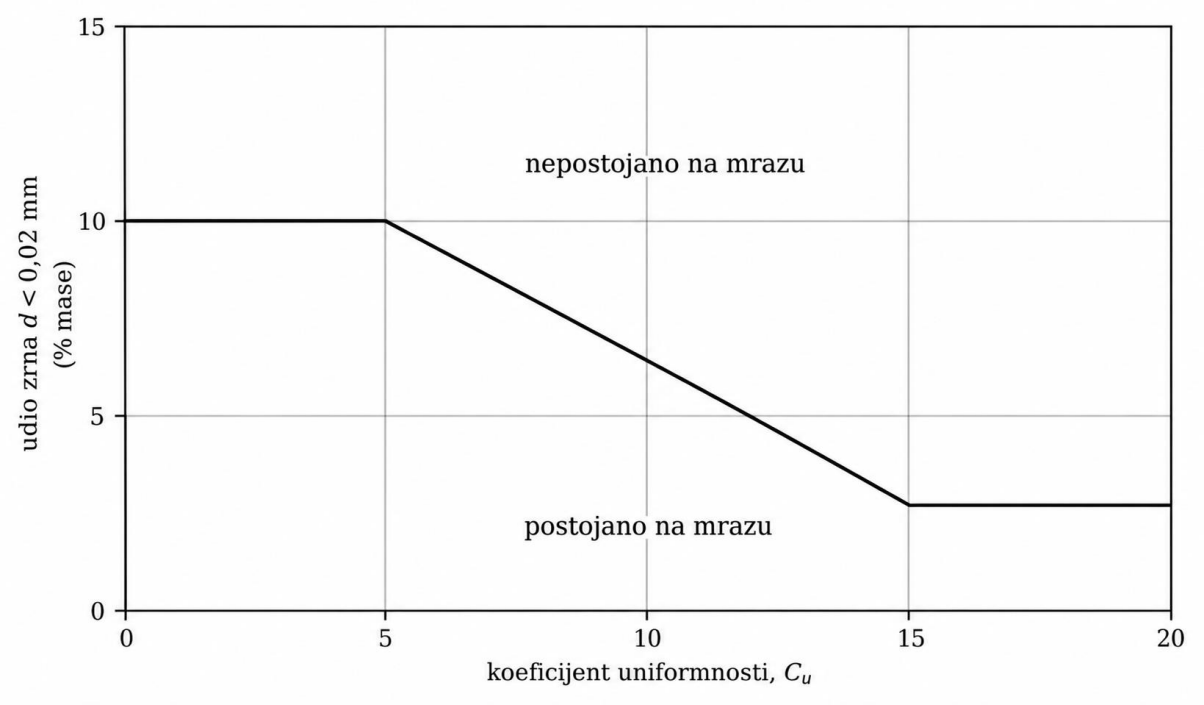
Vrijeme	$R+C$	R_c	P_h (%)	P_{uk} (%))	$D(mm)$
30 s	16,2	16,0	63,84	17,88	0,082
1 min	14,0	13,8	55,06	15,42	0,051
2 min	11,2	11,0	43,89	12,29	0,0365
5 min	8,5	8,3	33,12	9,27	0,0238
15 min	5,8	5,6	22,34	6,26	0,0140
45 min	4,3	4,2	16,76	4,69	0,0082
2 h	3,4	3,4	13,57	3,80	0,0051
5 h	1,9	2,0	7,98	2,23	0,00318
24 h	0,9	0,9	3,59	1,01	0,00148

1.6 Radni dijagrami za klasifikaciju i procjenu mrazoosjetljivosti

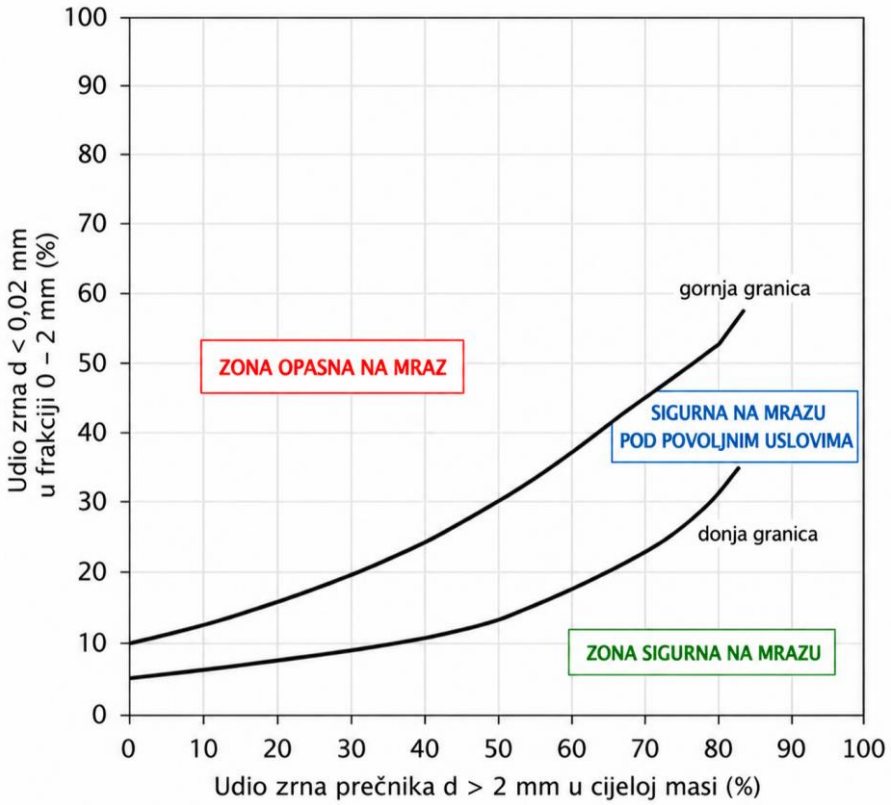
Dijagrami u nastavku koriste se za grafičku obradu i dopunsku interpretaciju rezultata. Trougli dijagram koristi samo frakcije pijeska, prašine i glinene frakcije, pa se njihove vrijednosti prije ucrtavanja normalizuju na 100 %. Dijagrami mrazoosjetljivosti se koriste isključivo kao indikatorski kriterijumi.



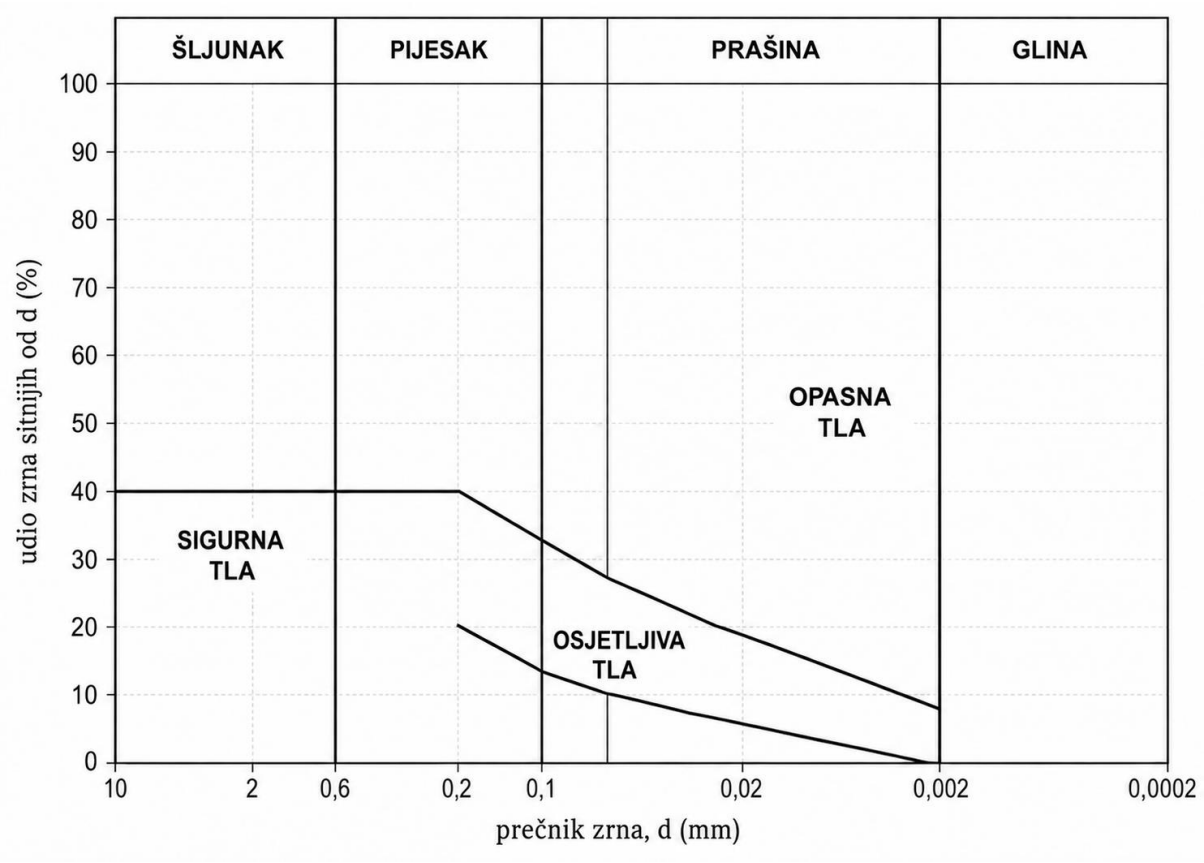
Slika 1.4. Trougli dijagram za prikaz odnosa pijeska, prašine i glinene frakcije.



Slika 1.5. Kasagrandeov kriterijum za indikatorsku procjenu mrazoosetljivosti.



Slika 1.6. Ruklijev kriterijum za indikatorsku procjenu mrazoosjetljivosti.



Slika 1.7. Šajblov kriterijum za indikatorsku procjenu mrazoosjetljivosti.

1.7 Zadatak

– Na osnovu podataka iz Tabela 1.2–1.5 nacrtati granulometrijsku krivu na Slici 1.1.

– Odrediti udjele šljunka, pijeska, prašine i glinene frakcije prema usvojenim granicama veličine zrna.

– Na osnovu granulometrijske krive očitati D_{10}, D_{30} i D_{60}, a zatim izračunati koeficijent uniformnosti C_u, i koeficijent zakrivljenosti C_c.

– Izvršiti dopunski prikaz sastava tla u trouglom dijagramu nakon normalizacije frakcija pijeska, prašine i glinene frakcije.

– Izvršiti indikatorsku procjenu mrazoosjetljivosti prema Kasagrandeovom, Ruklijevom i Šajblovom kriterijumu.

– U zaključku komentarisati ograničenja procjene zasnovane samo na granulometrijskom sastavu i posebno navesti značaj dotoka vode i temperaturnog režima.

1.8 Riješeni primjer

Zadati su sljedeći kumulativni procenti sitnijih čestica:

d (mm)	10	5	2	1	0,5	0,2	0,063	0,020	0,0063	0,002
P (%)	100	95	85	60	45	30	20	10	5	2

Korak 1 - udjeli osnovnih frakcija

Šljunak (> 2 mm) = 100 – P(2 mm) = 100 - 85 = 15 %.

Pijesak (2-0,063 mm) = P (2) – P(0,063) = 85 - 20 = 65 %.

Prašina (0,063-0,002 mm) = P(0,063) – P(0,002) = 20 - 2 = 18 %.

Glinena frakcija (< 0,002 mm) = P(0,002) = 2 %.

Dominantna frakcija je pijesak, uz 15 % šljunka i 20 % ukupne sitne frakcije. Formalni naziv prema ISO 14688 zahitjeva primjenu pravila identifikacije i ne svodi se samo na izbor najvećeg procenta.

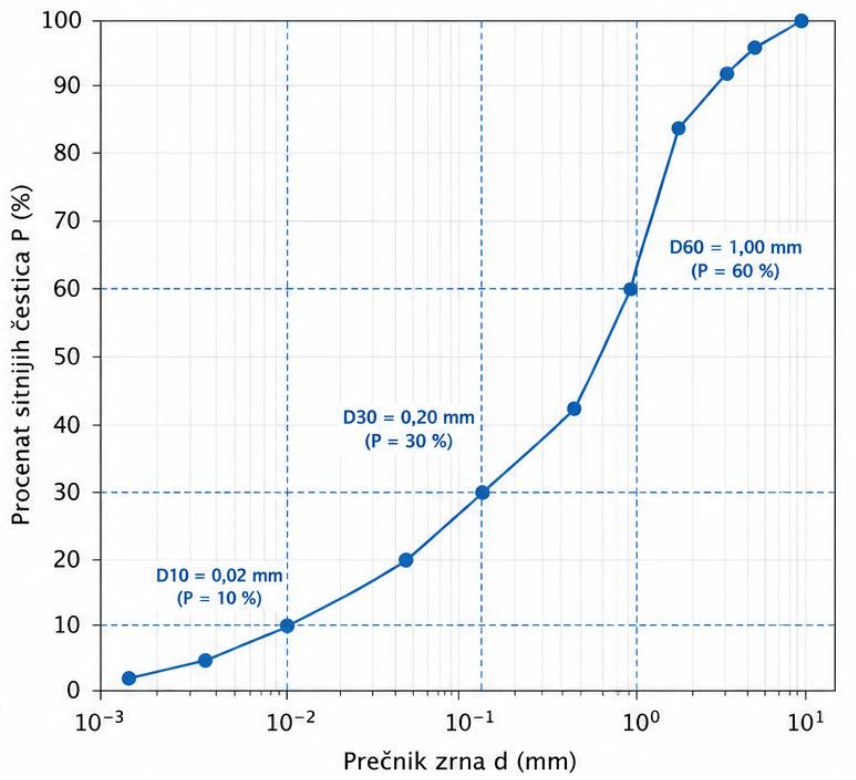
Korak 2 - karakteristični prečnici i gradacija

Sa krive se direktno očitava: D_{10} = 0,020 mm, D_{30} = 0,20 mm i D_{60} = 1,00 mm.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1,00}{0,020} = 50.$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} = \frac{0,20^2}{\left(0,020 \cdot 1,00\right)} = 2,0.$$

Velika vrijednost C_c pokazuje širok raspon veličina zrna, dok C_c = 2,0 ukazuje na kontinualno razvijen centralni dio krive u smislu uobičajene interpretacije krupnozrnih tala.



Slika 1.8. Granulometrijska kriva za riješeni primjer sa označenim D_{10}, D_{30} i D_{60}.

Korak 3 - normalizacija za trougli dijagram

Pošto se šljunak izuzima, zbir pijeska + prašine + gline iznosi 65 + 18 + 2 = 85 %. Normalizovane vrijednosti su: pijesak 65/85 = 76,5 %, prašina 18/85 = 21,2 % i glina 2/85 = 2,4 %. Ove vrijednosti se ucrtavaju u trougli dijagram.

Korak 4 - indikatorska mrazoosjetljivost

Udio čestica sitnijih od 0,02 mm iznosi 10 %. Po nastavnom Kasagrandeovom kriterijumu korišćenom u vježbi, za C_u > 15 već nekoliko procenata ove frakcije ukazuje na moguću mrazoosjetljivost. Zato se uzorak ocjenjuje kao potencijalno mrazoosjetljiv, ali samo ako postoje i dovoljan dotok vode i odgovarajući temperaturni režim.

Zaključak: uzorak je pretežno pjeskovit, široko gradiran i sadrži dovoljno sitne frakcije da zahtjeva provjeru mrazoosjetljivosti. Granulometrija daje važan početni opis, ali ne predstavlja potpunu klasifikaciju niti samostalnu prognozu ponašanja tla.

Literatura:

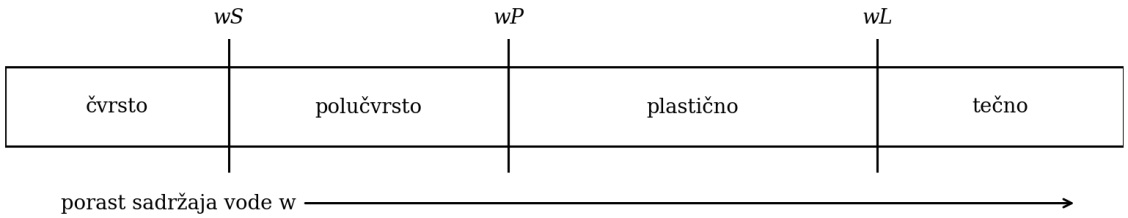
1. Andersland, O. B., Ladanyi, B. (2004) Frozen Ground Engineering. 2nd ed. John Wiley & Sons, Hoboken.
2. ASTM International (2021) ASTM D7928-21: Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA.
3. ASTM International (2025a) ASTM D6913/D6913M-17(2025): Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA.
4. ASTM International (2025b) ASTM D2487-17(2025): Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. Christopher, B. R., Schwartz, C. W., Boudreau, R. (2006) Geotechnical Aspects of Pavements. Federal Highway Administration, Washington, DC.
6. Das, B. M., Sobhan, K. (2018) Principles of Geotechnical Engineering. 9th ed. Cengage Learning, Boston.
7. ISO (2016) ISO 17892-4:2016 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 4: Determination of particle size distribution. International Organization for Standardization, Geneva.
8. ISO (2017a) ISO 14688-1:2017 Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description. International Organization for Standardization, Geneva.
9. ISO (2017b) ISO 14688-2:2017 Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 2: Principles for a classification. International Organization for Standardization, Geneva.
10. Knappett, J. A., Craig, R. F. (2020) Craig's Soil Mechanics. 9th ed. CRC Press, Boca Raton.
11. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.

VJEŽBA BR. 2

Plastičnost i konsistencija tla - granice tečenja, plastičnosti i skupljanja

2.1 Plastičnost i stanja konsistencije tla

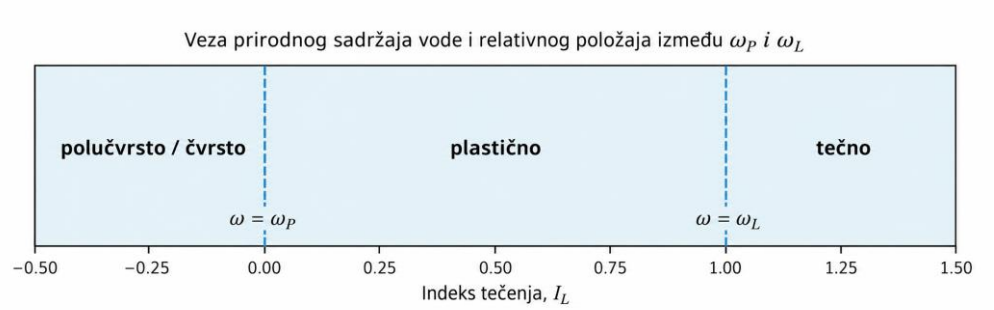
Konsistencija sitnozrnog tla opisuje njegovo stanje u zavisnosti od sadržaja vode. Sa promjenom sadržaja vode mijenjaju se obradivost, deformabilnost i čvrstoća tla. Aterbergove granice predstavljaju karakteristične sadržaje vode pri prelasku između stanja konsistencije. U savremenoj geotehničkoj praksi granica tečenja i granica plastičnosti određuju se standardizovanim laboratorijskim postupcima, dok se granica skupljanja razmatra kao dopunski pokazatelj promjene zapremine pri sušenju [SRPS EN ISO 17892-12:2018; ASTM International, 2025a].



Slika 2.1. Šematski prikaz stanja konsistencije i karakterističnih granica sadržaja vode.

Granica tečenja ω_L je sadržaj vode pri kome tlo prelazi između tečnog i plastičnog stanja, a granica plastičnosti ω_P sadržaj vode pri kome tlo pri daljem sušenju prestaje da bude plastično. Granica skupljanja ω_S označava približan sadržaj vode ispod koga dalje sušenje više ne dovodi do značajnog smanjenja zapremine uzorka. Vrijednosti ovih granica zavise od mineralnog sastava, udjela sitnih čestica, organske materije i načina pripreme uzorka.

Aterbergove granice su indeksne, a ne fundamentalne mehaničke konstante. Njihova vrijednost zavisi od načina pripreme uzorka, istorije sušenja, homogenizacije, brzine i načina izvođenja opita i procjene operatera. Zato su najkorisnije za poređenje tala, klasifikaciju i orijentaciono povezivanje sa stišljivošću, bubrenjem i promjenom čvrstoće sa sadržajem vode. Za projektne proračune ove korelacije ne zamjenjuju direktna ispitivanja mehaničkih svojstava.



Slika 2.1a. Indeks tečenja kao relativni položaj prirodnog sadržaja vode između granice plastičnosti i granice tečenja.

2.1.1 Indeksi izvedeni iz granica konsistencije

Za inžinjersko tumačenje često se koriste indeks plastičnosti, indeks tečenja i indeks konsistencije:

$$I_p = \omega_L - \omega_p$$

$$I_L = \left(\omega - \omega_P\right) / I_P$$

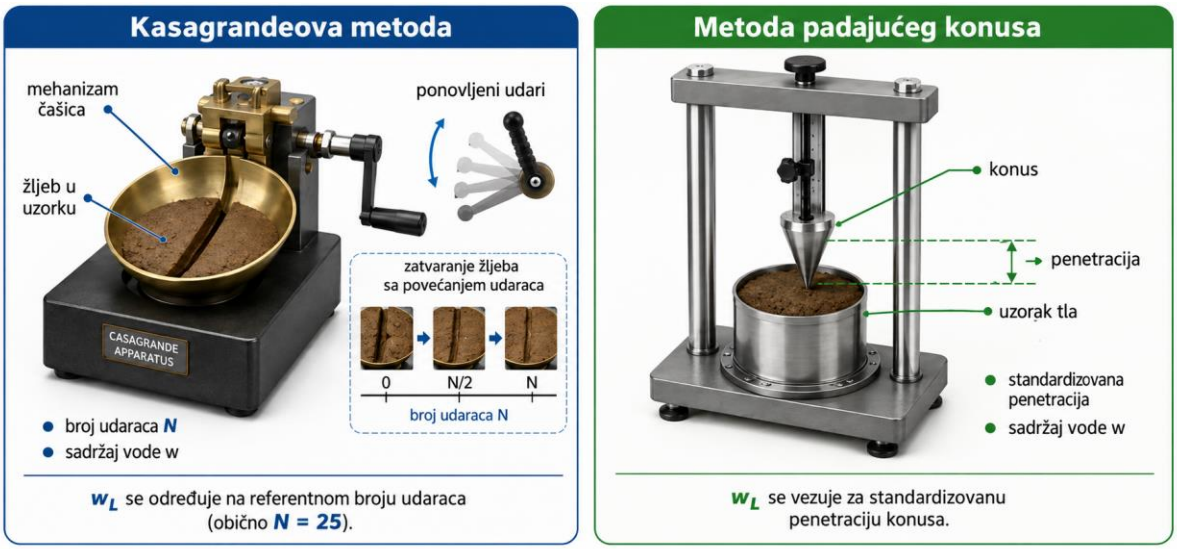
$$I_c = \left(\omega_L - \omega\right) / I_p = 1 - I_L$$

Indeks plastičnosti I_P predstavlja raspon sadržaja vode u kome se tlo ponaša plastično. Indeks tečenja I_L i indeks konsistencije I_C zavise i od prirodnog sadržaja vode ω, pa služe za opis trenutnog stanja tla. Njihovo tumačenje treba povezati sa geološkim porijeklom uzorka, strukturom i drugim geotehničkim parametrima; sami indeksi nisu dovoljni za projektantsku ocjenu ponašanja tla [Knappett i Craig, 2020; Das i Sobhan, 2018].

2.2 Određivanje granice tečenja i granice plastičnosti

SRPS EN ISO 17892-12:2018 propisuje određivanje granice tečenja i granice plastičnosti tla i ostaje važeća osnova uz objavljene izmjene A1:2022 i A2:2023. Za granicu tečenja standard obuhvata metodu padajućeg konusa i Kasagrandeovu metodu. Rezultat mora uvijek biti naveden zajedno sa korišćenom metodom, jer različite metode ne daju nužno identične indeksne vrijednosti.

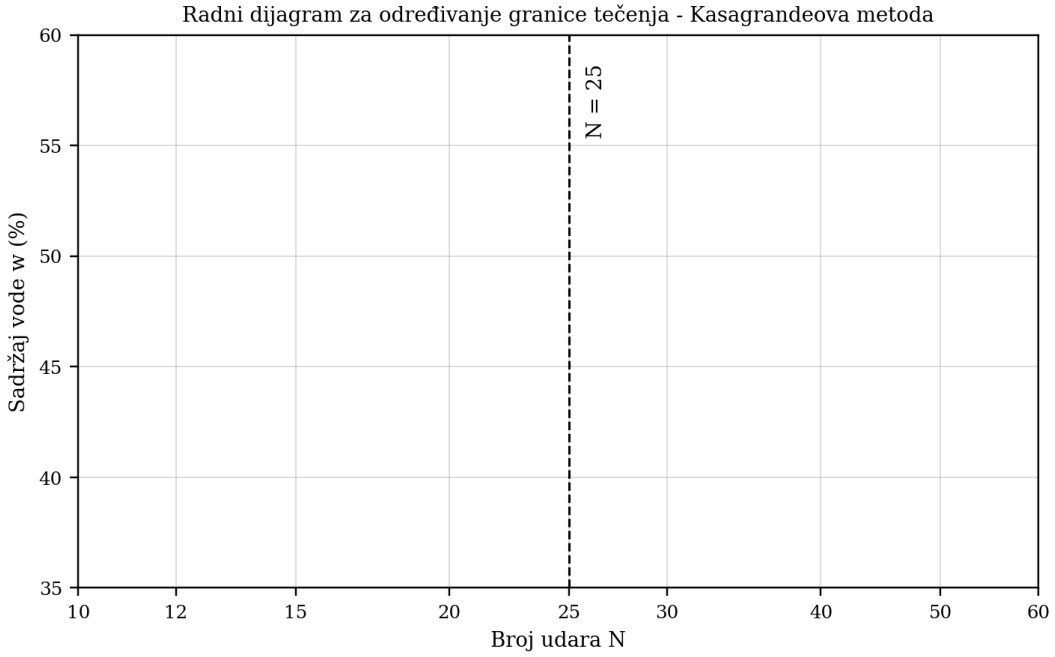
Kod Kasagrandeove metode rezultat se dobija iz linije tečenja ω-log N, dok se kod padajućeg konusa posmatra penetracija standardizovanog konusa u homogenizovanu pastu. Obje metode određuju istu konceptualnu granicu između tečnog i plastičnog stanja, ali koriste različit fizički kriterijum. Zbog toga u izvještaju nije dovoljno napisati samo ω_L; treba navesti i metodu.



Slika 2.2a. Šematsko poređenje Kasagrandeove metode i metode padajućeg konusa prema principima ISO 17892-12.

2.2.1 Kasagrandeova metoda

Pripremljena pasta od sitnozrnog materijala ugrađuje se u činijicu Kasagrandeovog aparata, površina se poravna i odgovarajućim nožem formira žlijeb. Činijica se podiže i pada na standardizovano postolje, a registruje se broj udara potreban da se žlijeb zatvori na propisan način. Postupak se ponavlja za više sadržaja vode. Na semilogaritamskom dijagramu broj udara N nanosi se na logaritamsku apscisu, a sadržaj vode ω na ordinatu; granica tečenja očitava se na liniji tečenja za N = 25 udara.



Slika 2.2. Radni dijagram za određivanje granice tečenja Kasagrandeovom metodom.

2.2.2 Metoda padajućeg konusa

Kod metode padajućeg konusa homogena pasta se ugrađuje u posudu, površina se poravna, a standardizovani konus se oslobađa da prodire u uzorak tokom propisanog vremena. Postupak se ponavlja pri više sadržaja vode i uspostavlja se veza između penetracije konusa i sadržaja vode. Referentna penetracija i detalji opreme zavise od standardizovanog sklopa koji se koristi, pa se u zapisniku moraju navesti masa i geometrija konusa i primijenjena procedura [SRPS EN ISO 17892-12:2018].

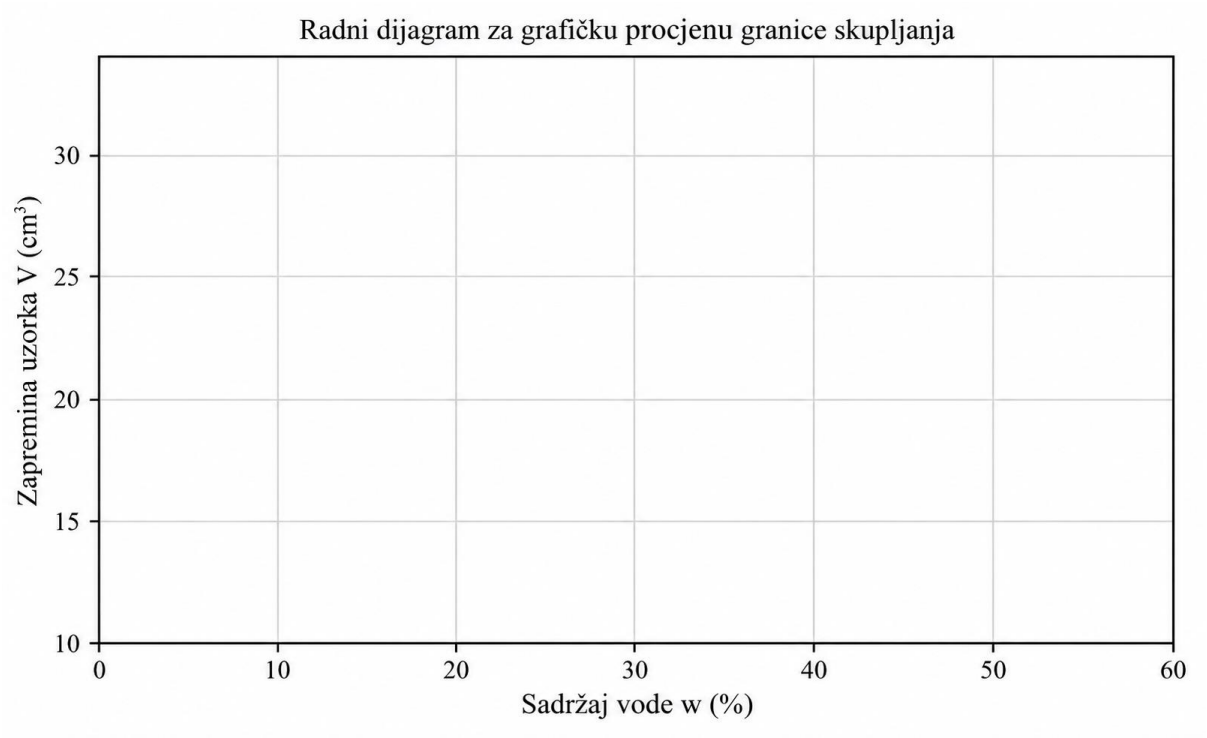
2.2.3 Granica plastičnosti

Granica plastičnosti se određuje ručnim valjanjem dijela pripremljenog uzorka u niti, približno 3 mm prečnika. Postupak sušenja, skupljanja i ponovnog valjanja se nastavlja do trenutka kada se nit pri tom prečniku počne lomiti i mrviti. Sadržaj vode uzorka u tom stanju predstavlja granicu plastičnosti ω_p. Ispitivanje se izvodi u više ponavljanja, a rezultat se određuje iz međusobno saglasnih vrijednosti.

2.3 Granica skupljanja

Granica skupljanja nije obuhvaćena aktuelnim SRPS EN ISO 17892-12, koji se odnosi na granice tečenja i plastičnosti. U ovoj vježbi zadržana je kao dopunski, didaktički pokazatelj. Savremeni ASTM D4943-25 određuje faktore skupljanja kohezivnih tala metodom potapanja u vodu; raniji postupci sa živom više nisu odgovarajuća nastavna referenca zbog bezbjednosnih i standardizacionih razloga. U datom primjeru granica skupljanja procjenjuje se grafički iz zavisnosti zapremine uzorka od sadržaja vode.

U savremenoj laboratorijskoj praksi treba razlikovati cilj mjerenja od istorijskog postupka. Stari postupci sa živom imaju očigledna bezbjednosna i ekološka ograničenja; zato se, kada je granica skupljanja potrebna, primjenjuju postupci propisani važećim standardom ili laboratorijskom procedurom koji izbjegavaju nepotrebnu izloženost opasnim materijama. U ovoj vježbi grafički prikaz služi kao didaktička ilustracija veze sadržaja vode i promjene zapremine.

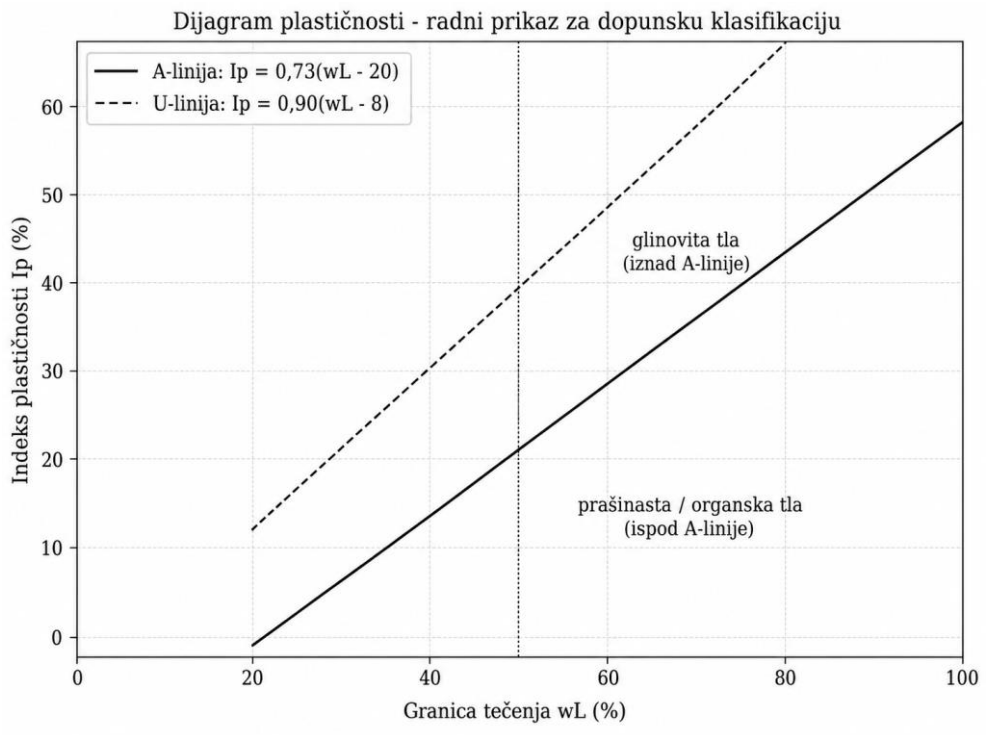


Slika 2.3. Radni dijagram za grafičku procjenu granice skupljanja.

2.4 Klasifikacija na osnovu plastičnosti

Granice konsistencije koriste se kao dio identifikacije i klasifikacije sitnozrnih tala. ISO 14688-1 i ISO 14688-2 daju savremene principe identifikacije i klasifikacije, dok se Kasagrandeov dijagram plastičnosti često koristi kao dopunski prikaz u sistemima kao što je USCS. Na dijagramu se nanose ω_L i I_P, a A-linija $I_P = 0{,}73(\omega_L - 20)$ razdvaja oblasti u kojima dominira glinovito ili prašinasto ponašanje. Oznake i granice polja zavise od izabranog klasifikacionog sistema, zbog čega u izvještaju treba navesti sistem prema kome je zaključak izveden [ASTM International, 2025b; ISO, 2017a; ISO, 2017b].

Dijagram plastičnosti je naročito koristan jer istovremeno koristi ω_L i I_P. Položaj iznad ili ispod A-linije pomaže da se razlikuje glinoviti od prašinastog karaktera, dok vertikalne granice plastičnosti zavise od konkretnog klasifikacionog sistema. Regionalna podjela sa oznakom CI nije identična USCS-u, koji koristi samo CL i CH; zato klasifikaciju u izvještaju treba vezati za tačno navedeni sistem.



Slika 2.4. Dijagram plastičnosti za dopunsku klasifikaciju sitnozrnog tla.

Mikrostrukturna osnova plastičnosti sitnozrnih tala

Plastičnost sitnozrnog tla nastaje kao posljedica zajedničkog djelovanja veoma sitnih čestica, njihove velike specifične površine i vode vezane uz mineralne površine. Kod minerala gline površinski električni naboj privlači jone i polarne molekule vode, pa se oko čestica formiraju slojevi vode čija se svojstva razlikuju od slobodne vode u većim porama. Kada se sadržaj vode mijenja, mijenjaju se rastojanja između čestica, jačina površinskih interakcija i mogućnost njihovog međusobnog klizanja. Zbog toga sitnozrna tla mogu prelaziti iz krutog u polučvrsto, plastično i tečno stanje bez promjene mineralnog sastava.

Vrsta glinenog minerala ima veliki uticaj na širinu plastičnog područja. Minerali sa većom aktivnom površinom i izraženijom sposobnošću vezivanja vode obično daju više granice tečenja i veći indeks plastičnosti. Nasuprot tome, prašinasta tla sa malim udjelom aktivnih glinenih minerala mogu sadržavati veliki procenat sitnih čestica, a ipak imati relativno malu plastičnost. Zato granulometrijska klasifikacija i klasifikacija po plastičnosti opisuju različite aspekte materijala: prva govori o veličini čestica, a druga posredno o njihovoj površinskoj aktivnosti i interakciji sa vodom.

Na stanje konsistencije utiče i struktura tla. Prirodno tlo može sadržati agregate, orijentisane čestice, organske materije ili soli u pornoj vodi. Remoldovanje tokom pripreme uzorka

djelimično uništava prirodnu strukturu i standardizuje stanje, što je korisno za poređenje materijala, ali znači da Aterbergove granice ne opisuju direktno netaknutu čvrstoću uzorka u terenu. One su indeksni parametri. Njihova najveća vrijednost je u klasifikaciji, poređenju i prepoznavanju potencijalno problematičnih ponašanja kao što su velika stišljivost, bubrenje ili osjetljivost na promjenu vlažnosti.

Granice konsistencije i izvedeni indeksi kao koordinatni sistem stanja

Granica plastičnosti i granica tečenja mogu se posmatrati kao dvije referentne tačke na osi sadržaja vode. Ispod granice plastičnosti tlo više ne može da se deformiše u velike oblike bez pojave pukotina i mrvljenja, dok iznad granice tečenja otpor smicanju postaje veoma mali i materijal pokazuje ponašanje blisko viskoznoj pasti. Između te dvije granice nalazi se plastično područje u kome je moguće znatno preoblikovanje bez trenutnog loma. Indeks plastičnosti predstavlja širinu tog područja i zbog toga je koristan kao mjera osjetljivosti ponašanja na promjenu sadržaja vode.

Indeks tečenja I_L uvodi prirodni sadržaj vode u odnos sa granicama plastičnosti i tečenja. Kada je I_L blizu nule, prirodna vlažnost je blizu granice plastičnosti; kada je blizu jedinice, stanje je blizu granice tečenja. Vrijednosti izvan intervala od 0 do 1 nisu matematički problem: $I_L < 0$ znači da je prirodni sadržaj vode manji od granice plastičnosti, a $I_L > 0$ da je veći od granice tečenja. Indeks konsistencije $I_C = 1 - I_L$ daje isti podatak u obrnutom obliku. Ovi indeksi olakšavaju poređenje uzoraka sa različitim apsolutnim granicama.

Važno je, međutim, ne poistovjetiti indeks tečenja sa direktnom mjerom čvrstoće. Postoje empirijske veze između konsistencije i nedrenirane smičuće čvrstoće, ali one zavise od mineralogije, strukture, osjetljivosti i istorije naprezanja. Dva tla sa istim I_L mogu imati različitu čvrstoću ako se razlikuju u strukturi ili preopterećenju. Zbog toga se indeksi koriste za opis i preliminarnu procjenu, dok projektne vrijednosti čvrstoće i stišljivosti zahtijevaju odgovarajuća mehanička ispitivanja.

Metodološka osjetljivost granice tečenja i granice plastičnosti

Kasagrandeova metoda i metoda padajućeg konusa imaju isti cilj, ali fizički definišu granicu tečenja na različit način. U Kasagrandeovoj činijici prati se zatvaranje žlijeba pod serijom standardizovanih udara, pa na rezultat utiču oblik žlijeba, brzina okretanja ručice, tvrdoća

podloge i procjena trenutka zatvaranja. Kod padajućeg konusa mjeri se penetracija pod dejstvom težine konusa tokom propisanog vremena, što smanjuje dio operaterske procjene, ali zahtijeva preciznu kontrolu geometrije, mase konusa, vremena penetracije i homogenosti paste. Zbog toga je uz rezultat nužno navesti korišćenu metodu.

Priprema uzorka može promijeniti izmjerene granice jednako koliko i sam instrument. Nedovoljna homogenizacija stvara lokalno različite sadržaje vode, dok pretjerano sušenje nekih glina može izazvati promjene strukture koje se ne obnavljaju potpuno ponovnim vlaženjem. Uklanjanje krupnije frakcije takođe znači da rezultat opisuje ispitivanu sitniju frakciju, a ne nužno cijeli prirodni materijal. Laboratorijski zapis zato treba da sadrži podatke o prethodnom sušenju, načinu miješanja, vremenu kondicioniranja i eventualnom uklanjanju čestica iznad propisane veličine.

Granica plastičnosti je posebno osjetljiva na tehniku valjanja. Brzina, pritisak prstiju, upijanje vlage sa podloge i procjena momenta mrvljenja mogu dovesti do rasipanja rezultata. Zato se izvodi više ponavljanja, a međusobna saglasnost rezultata je dio kontrole kvaliteta. Ako su ponavljanja veoma različita, bolji postupak nije računanje prosjeka po svaku cijenu, nego provjera pripreme uzorka i ponavljanje opita. Indeksna ispitivanja su jednostavna, ali njihova vrijednost zavisi od disciplinovane standardizacije postupka.

Skupljanje, bubrenje i desikacione promjene

Pri sušenju zasićenog sitnozrnog uzorka najprije se smanjuju i sadržaj vode i zapremina. Dok su pore gotovo potpuno ispunjene vodom, uklanjanje vode povećava kapilarni pritisak i približava čestice. U određenom trenutku dalji gubitak vode više ne prati odgovarajuće smanjenje ukupne zapremine, pa se približno definiše granica skupljanja. Ispod te vrijednosti vazduh sve više ulazi u pore, a uzorak nastavlja da gubi masu uz znatno manje zapreminsko skupljanje. Ovaj proces je značajan za površinske slojeve tla koji prolaze kroz sezonsko kvašenje i sušenje.

Skupljanje nije nužno homogeno. Ako je površina uzorka izložena bržem sušenju od unutrašnjosti, razvijaju se gradijenti usisnog napona i zatezne deformacije koje mogu dovesti do pukotina. U prirodi desikacione pukotine povećavaju prividnu propustljivost i mijenjaju način na koji voda ulazi u glineni sloj. Pri ponovnom vlaženju neke gline bubre, ali put povratka ne mora biti isti kao put sušenja. Takva histereza je posljedica promjena mikrostrukture i

rasporeda pora. Zato se ponašanje pri skupljanju i bubrenju ne može potpuno opisati jednom indeksnom granicom.

Inžinjerski značaj ovih procesa je veliki kod plitkih temelja, nasipa, kanala i kolovoznih konstrukcija. Sezonske promjene vlažnosti mogu uzrokovati diferencijalna pomjeranja, a pukotine mogu stvoriti preferencijalne puteve procjeđivanja. Granica skupljanja u nastavnoj vježbi pomaže da se razumije prelaz između zapreminski osjetljivog i manje osjetljivog područja, ali za procjenu ekspanzivnosti tla često su potrebni dodatni podaci: mineralogija, prirodna gustina, nivo napona i direktni opiti bubrenja ili skupljanja.

Klasifikacija po plastičnosti i njena inžinjerska ograničenja

Dijagram plastičnosti organizuje veliki broj mogućih tala u pregledan odnos između granice tečenja i indeksa plastičnosti. A-linija razdvaja oblasti u kojima je plastično ponašanje tipičnije za glinovite, odnosno prašinaste materijale. Međutim, položaj tačke na dijagramu ne određuje mineralni sastav sa potpunom sigurnošću. Organska tla, mješavine različitih minerala i materijali sa netipičnom strukturom mogu odstupati od uobičajenih obrazaca. Zato klasifikaciona oznaka predstavlja praktičnu grupu sličnog ponašanja, a ne zamjenu za geološki opis i detaljnu karakterizaciju.

Granice konsistencije se često koriste u empirijskim korelacijama sa stišljivošću, aktivnošću, potencijalom bubrenja ili nedreniranom čvrstoćom. Takve korelacije mogu biti korisne u ranoj fazi istraživanja, kada još nema dovoljnog broja mehaničkih ispitivanja. Njihova pouzdanost je najveća kada su razvijene za geološki i mineralogijski slične materijale. Primjena opšte korelacije na potpuno drugačiji tip tla može dati uvjerljiv broj, ali lošu procjenu. Zbog toga korelacioni rezultat treba posmatrati kao kontrolni ili orijentacioni podatak, ne kao jedinu projektnu osnovu.

Dobra interpretacija povezuje nekoliko nivoa podataka: granulometriju, granice konsistencije, prirodni sadržaj vode, gustinu, geološko porijeklo i rezultate mehaničkih opita. Ako se, na primjer, uzorak nalazi blizu granice između dvije klasifikacione zone, preciznost na jednu decimalu nema stvarni inžinjerski značaj. Važnije je procijeniti raspon mogućeg ponašanja i provjeriti da li se zaključak mijenja zbog prirodne varijabilnosti. Takav pristup pretvara Aterbergove granice iz formalnog laboratorijskog broja u koristan alat za planiranje daljih ispitivanja i razumijevanje terenskog ponašanja.

2.5 Osnovni podaci

Za nastavnu obradu koristi se uzorak gline br. 3. Prirodni sadržaj vode je ω = 22 %. Podaci su objedinjeni i korigovani tako da proračun bude unutrašnje konzistentan.

Tabela 2.1. Podaci za grafičku procjenu granice skupljanja

w (%)	**52**	**34**	**21**	**14**	**11**	**7**
V (cm^3)	30	26	22	16	14	14

Tabela 2.2. Podaci za granicu tečenja - Kasagrandeova metoda

Veličina	**I**	**II**	**III**
Broj udara N	52	24	12
Oznaka tare	13	14	15
Masa vlažnog uzorka + tara, A (g)	20,52	28,81	22,92
Masa suvog uzorka + tara, B (g)	16,43	23,84	18,89
Masa tare, C (g)	7,02	13,06	10,46

Tabela 2.3. Podaci za određivanje granice plastičnosti

Veličina	**I**	**II**	**III**
Oznaka tare	27	33	62
Masa vlažnog uzorka + tara, A (g)	39,72	42,11	42,88
Masa suvog uzorka + tara, B (g)	35,81	37,53	38,18
Masa tare, C (g)	20,66	20,92	20,74

2.6 Proračun sadržaja vode

Za svako mjerenje sa tarom sadržaj vode računa se iz mase vode i mase suvog tla:

$$\omega = \frac{(A-B)}{B-C} \cdot 100\ \%.$$

Dobijene vrijednosti za tri tačke granice tečenja ucrtavaju se u semilogaritamski dijagram, dok se granica plastičnosti određuje kao srednja vrijednost međusobno saglasnih ponavljanja. Za granicu skupljanja se koristi radni dijagram $V - \omega$ i određuje približan prelom između dijela u kome zapremina opada i dijela u kome dalje sušenje više ne mijenja zapreminu.

2.7 Zadatak

- Izračunati sadržaj vode za sva mjerenja u Tabelama 2.2 i 2.3.
- Na Slici 2.2 nacrtati liniju tečenja i očitati granicu tečenja ω_L za N = 25 udara.
- Odrediti granicu plastičnosti ω_P kao srednju vrijednost odgovarajućih ponavljanja.
- Na Slici 2.3 grafički procijeniti granicu skupljanja ω_S.
- Izračunati I_P, I_L i I_C za prirodni sadržaj vode ω = 22 % i opisati stanje konsistencije uzorka.
- Na Slici 2.4 ucrtati tačku (ω_L, I_P) i dati dopunsku klasifikaciju prema izabranom dijagramu plastičnosti; navesti klasifikacioni sistem.
- U zaključku komentarisati ograničenja klasifikacije zasnovane samo na granicama konsistencije.

2.8 Riješeni primjer

Primjer je ilustrativan i koristi drugi skup podataka od zadatka iz Tabela 2.1-2.3. Pokazuje obradu granice tečenja, granice plastičnosti, granice skupljanja, indeksa konsistencije i dijagrama plastičnosti.

Za granicu tečenja dobijena su tri para (N, ω): (12, 52 %), (24, 46 %) i (40, 40 %). Za granicu plastičnosti tri ponavljanja daju 25,8 %, 26,2 % i 26,0 %. Prirodni sadržaj vode je ω = 32 %.

Za grafičku procjenu granice skupljanja usvojeno je $\omega_S \approx 18$ %.

Korak 1 - granica tečenja

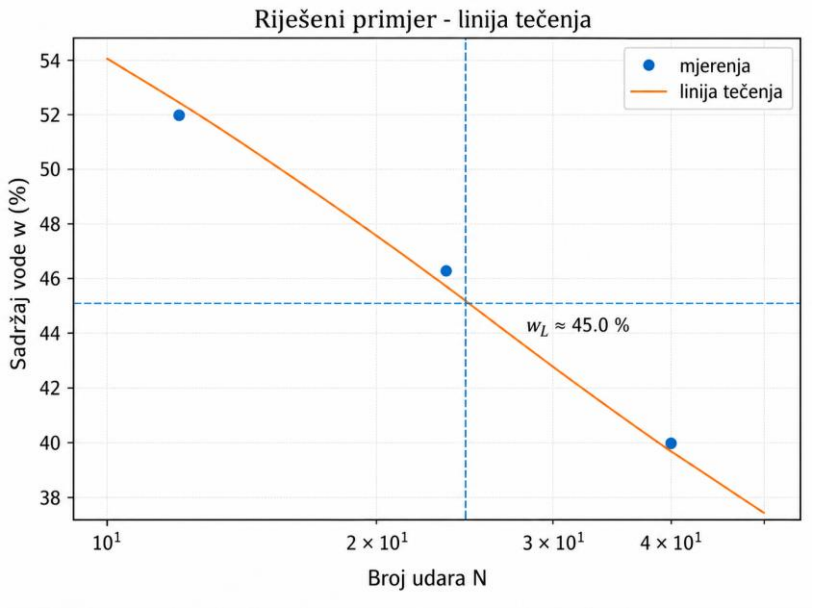
N	**12**	**24**	**40**
ω (%)	52,0	46,0	40,0

U semilogaritamskom koordinatnom sistemu aproksimira se prava $\omega = a \cdot log10N + b$.

Za date tačke dobijeno je približno:

$$\omega = -22,78 \cdot \log 10N + 76,83$$

Za $N = 25$; $\omega_L = -22,78 \cdot \log 10(25) + 76,83 \approx 45,0$ %



Slika 2.5. Linija tečenja i očitavanje ω_L za riješeni primjer.

Korak 2 - granica plastičnosti i izvedeni indeksi

$$\omega_P = \frac{(25,8 + 26,2 + 26,0)}{3} = 26,0\,\%.$$

$$I_P = \omega_L - \omega_P = 45,0 - 26,0 = 19,0\,\%.$$

$$I_L = \frac{(\omega - \omega_P)}{I_P} = \frac{(32,0 - 26,0)}{19} = 0,32.$$

$$I_C = 1 - I_L = 0,68.$$

Pošto je $0 < I_L < 1$, prirodni sadržaj vode se nalazi u plastičnom području, bliže granici plastičnosti nego granici tečenja.

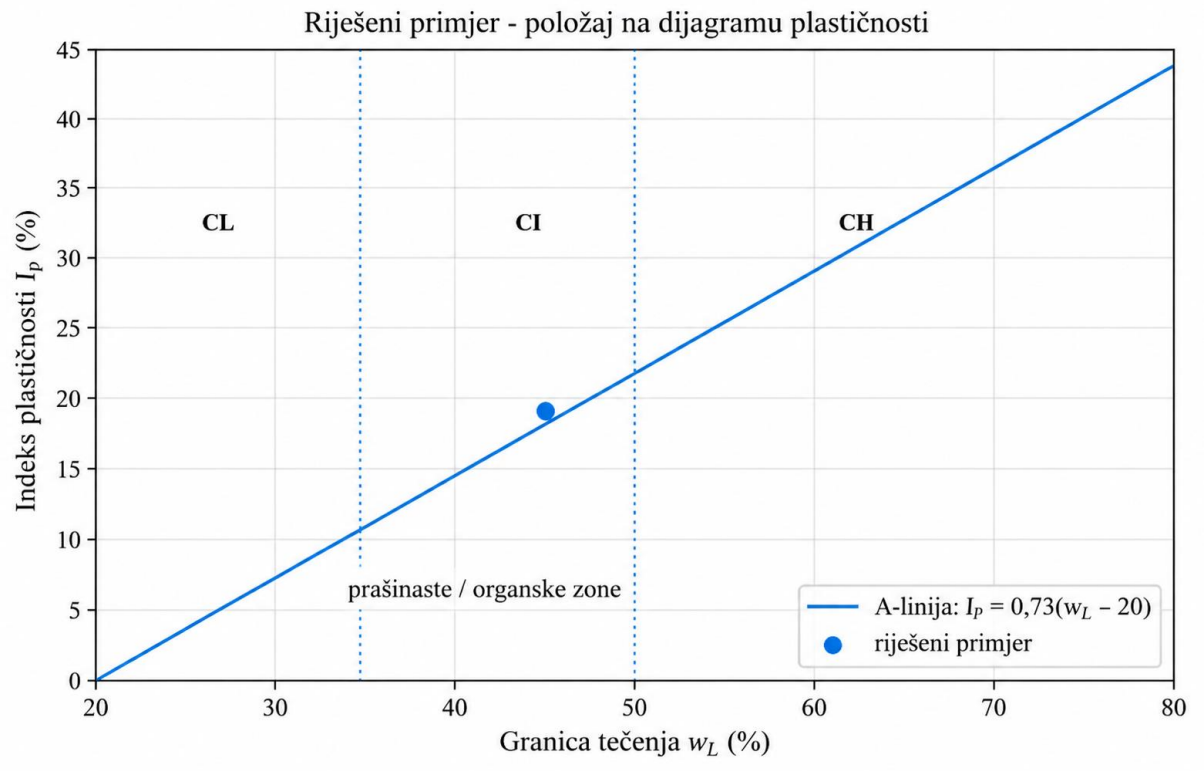
Korak 3 - granica skupljanja

Sa ilustrativne krive zapremina-sadržaj vode tačka prelaska sa promjenljive na približno konstantnu zapreminu daje $\omega_S \approx 18$ %. U realnom izvještaju treba navesti standard/metodu kojom je ω_S određen.

Korak 4 - dijagram plastičnosti

Za ω_L = 45,0 % A-linija ima vrijednost I_P, A = 0,73(45 - 20) = 18,25 %. Pošto je I_P = 19,0 % malo iznad A-linije, uzorak ima glinoviti karakter na dijagramu. U didaktičkoj regionalnoj

podjeli CL-CI-CH nalazi se u srednjem opsegu i označava se kao CI; u USCS-u, koji nema kategoriju CI, ista tačka pripada zoni CL.



Slika 2.6. Položaj riješenog primjera na didaktičkom dijagramu plastičnosti.

Zaključak: $\omega_L \approx 45\ \%$, $\omega_P = 26\ \%$, $I_P \approx 19\ \%$, $I_L \approx 0{,}32$ i $I_C \approx 0{,}68$. Uzorak je u prirodnom stanju unutar plastičnog područja i pokazuje glinoviti karakter. Rezultat klasifikacije mora biti naveden zajedno sa izabranim klasifikacionim sistemom.

Literatura:

1. ASTM International (2025a) ASTM D4943-25: Standard Test Method for Shrinkage Factors of Cohesive Soils by the Water Submersion Method. ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. ASTM International (2025b) ASTM D2487-17(2025): Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA.
3. Das, B. M., Sobhan, K. (2018) Principles of Geotechnical Engineering. 9th ed. Cengage Learning, Boston.
4. ISO (2017a) ISO 14688-1:2017 Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description. International Organization for Standardization, Geneva.

5. ISO (2017b) ISO 14688-2:2017 Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 2: Principles for a classification. International Organization for Standardization, Geneva.
6. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.
7. Knappett, J. A., Craig, R. F. (2020) Craig's Soil Mechanics. 9th ed. CRC Press, Boca Raton.
8. SRPS EN ISO 17892-12:2018 Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - Deo 12: Određivanje granica tečenja i plastičnosti tla, sa A1:2022 i A2:2023.

VJEŽBA BR. 3

Zbijanje tla i kalifornijski indeks nosivosti (CBR)

3.1 Zbijanje tla

Zbijanje je mehanički postupak kojim se smanjuje zapremina vazdušnih pora u tlu i povećava njegova suva zapreminska masa, odnosno suva zapreminska težina. U zemljanim radovima zbijanjem se nastoji postići propisana nosivost, smanjiti stišljivost i deformacije i, u zavisnosti od materijala, uticati na propustljivost. Efekat zbijanja zavisi od sadržaja vode, energije zbijanja, granulometrijskog sastava i vrste tla [Das i Sobhan, 2018; Knappett i Craig, 2020].

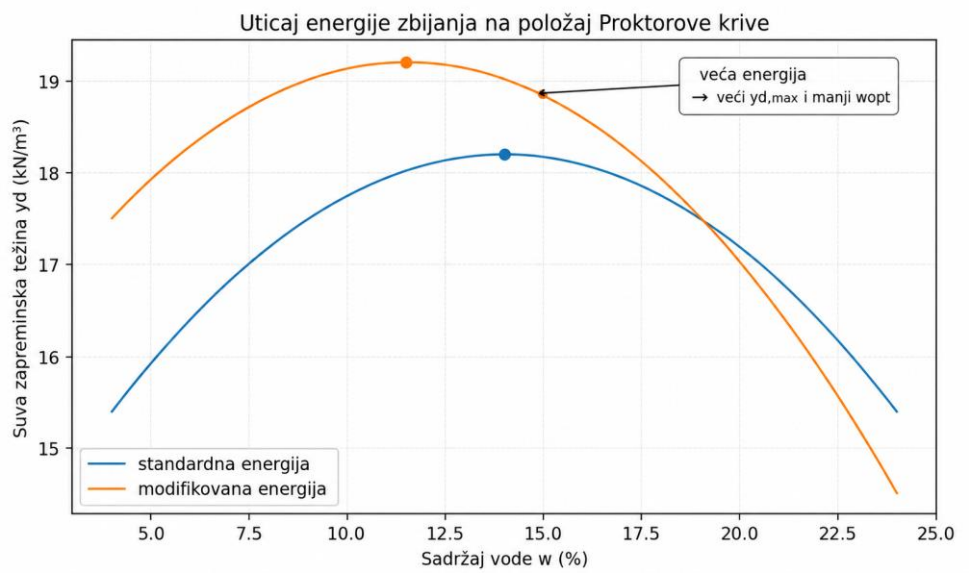
Laboratorijski Proktorov opit određuje odnos između sadržaja vode ω i suve zapreminske mase ili suve zapreminske težine pri definisanoj energiji zbijanja. Maksimum Proktorove krive daje maksimalnu suvu zapreminsku težinu $\gamma_{d\max}$ i odgovarajući optimalni sadržaj vode ω_{opt}. Te vrijednosti predstavljaju laboratorijsku referencu za kontrolu zbijenosti na terenu, a ne univerzalne osobine tla nezavisne od postupka ispitivanja.

Na suvoj strani Proktorove krive mala količina vode nije dovoljna da olakša preuređivanje zrna, pa trenje između čestica ograničava zbijanje. Dodavanjem vode smanjuje se otpor preuređivanju i suva zapreminska masa raste. Poslije optimalnog sadržaja vode dodatna voda zauzima sve veći dio pora i, pri istoj energiji, suva zapreminska masa opada. Struktura tla na suvoj i vlažnoj strani optimuma može biti različita, što utiče na propustljivost, deformabilnost i čvrstoću.

Povećanje energije zbijanja tipično pomjera maksimum Proktorove krive naviše i ulijevo: $\gamma_{d\max}$ raste, a ω_{opt} se smanjuje. Taj trend je razlog zbog koga rezultati standardnog i modifikovanog Proktorovog opita nisu međusobno zamjenljivi. U specifikaciji se mora navesti koja je energija referentna za kontrolu zbijenosti.

3.1.1 Standardni i modifikovani Proktorov opit

Za tla se u međunarodnoj praksi često koriste ASTM D698 za standardnu i ASTM D1557 za modifikovanu energiju zbijanja. Standardni postupak koristi energiju približno 600 kN·m/m³, dok modifikovani postupak koristi približno 2700 kN·m/m³. Oprema, broj slojeva, broj udaraca, prečnik kalupa i dopuštena krupnoća zrna zavise od izabrane metode unutar standarda, pa ih treba navesti u laboratorijskom zapisniku [ASTM International, 2021a; ASTM International, 2021b].



Slika 3.1a. Šematski uticaj energije zbijanja na Proktorovu krivu. Autorski nastavni dijagram zasnovan na principima ASTM D698 i ASTM D1557.

SRPS EN 13286-2:2012 uređuje Proktorovo zbijanje nevezanih i hidrauličkim vezivom vezanih mješavina za putogradnju i građevinske radove i trenutno je potvrđen kao važeći. Njegov deklarisani obuhvat odnosi se na takve mješavine, a ne predstavlja univerzalni standard za sva prirodna tla u zemljanim radovima. Zato se u konkretnom projektu metoda zbijanja bira prema vrsti materijala, tehničkim uslovima i primjenljivom standardu.

Tabela 3.1. Poređenje dvije tipične energije zbijanja

Postupak	Referentni standard	Energija zbijanja	Tipični cilj
Standardni Proktor	ASTM D698-12(2021)	oko 600 kN·m/m³	referentna kriva za umjerenu energiju
Modifikovani Proktor	ASTM D1557-12(2021)	oko 2700 kN·m/m³	referentna kriva za veću energiju

3.1.2 Osnovni proračun

Ako su poznate masa vlažnog i masa suvog uzorka, sadržaj vode se računa kao:

$$\omega = \frac{m_\omega - m_d}{m_d} \cdot 100\%.$$

Za uzorak poznate zapremine V , suva zapreminska masa i suva zapreminska težina su:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V},$$

$$\gamma_d = \rho_d \cdot g \ .$$

Kada je poznata specifična težina čvrstih čestica, može se nacrtati i teorijska linija bez vazdušnih pora (stepen zasićenja S = 100 %), koja predstavlja fizičku gornju granicu za dati sadržaj vode:

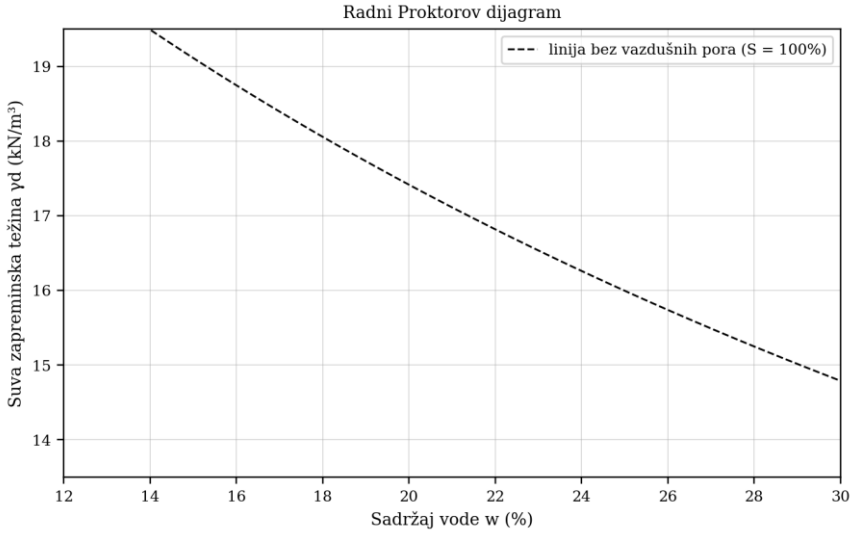
$$\gamma_{dZAV} = \frac{G_S \cdot \gamma_\omega}{(1+\omega \cdot G_s)}$$

gdje je:

$G_S = \frac{\gamma_s}{\gamma_\omega}$, a ω se u izrazu koristi kao decimalni broj.

Eksperimentalna Proktorova kriva mora ostati ispod ove teorijske linije.

Linija bez vazdušnih pora predstavlja teorijsku gornju granicu pri 100 % zasićenju i nultom sadržaju vazduha. Eksperimentalna tačka iznad ove linije fizički nije moguća i ukazuje na grešku u masi, zapremini, sadržaju vode ili specifičnoj gustini zrna. Rastojanje eksperimentalne krive od ove linije daje kvalitativan uvid u preostali sadržaj vazduha.



Slika 3.1. Radni Proktorov dijagram sa teorijskom linijom bez vazdušnih pora.

3.1.3 Kontrola zbijenosti na terenu

Relativna zbijenost u smislu kontrole zemljanih radova često se izražava kao odnos terenski određene suve zapreminske mase ili težine i laboratorijske maksimalne vrijednosti za propisani Proktorov postupak:

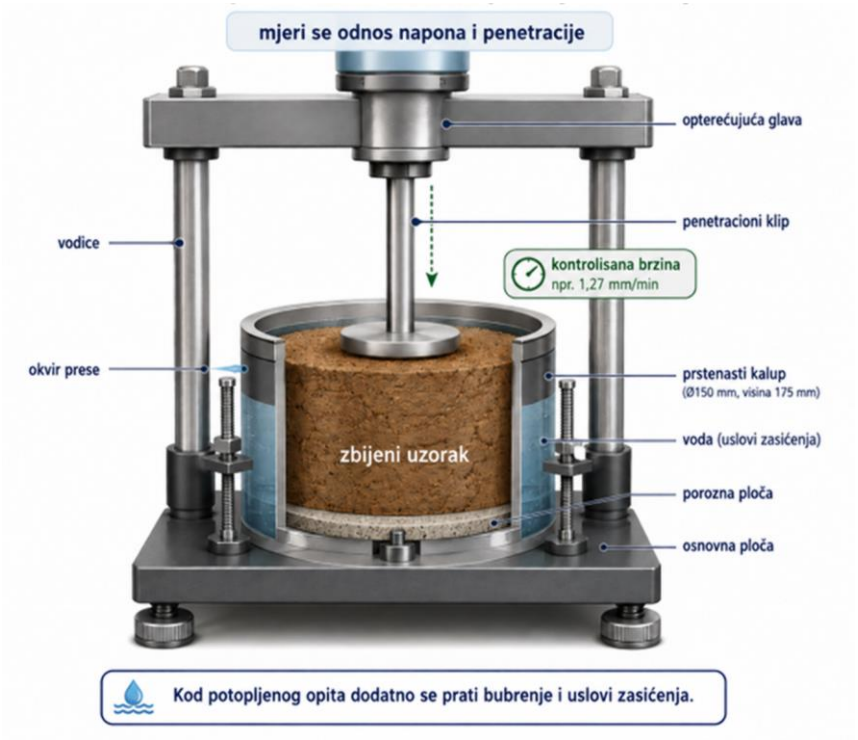
$$R_C = \frac{\gamma_{d\,teren}}{\gamma_{d\,\max}} \cdot 100\,\%.$$

Zahtjevana vrijednost R_C određuje se tehničkim uslovima projekta. Nije opravdano primjenjivati jednu univerzalnu graničnu vrijednost bez navođenja sloja, materijala, energije zbijanja i projektne specifikacije.

3.2 Kalifornijski indeks nosivosti (CBR)

CBR je penetracioni indeks koji karakteriše relativnu nosivost laboratorijski zbijenog materijala u odnosu na standardni referentni materijal. Koristi se naročito pri ocjeni podtla, posteljice, tamponskih i nosećih slojeva u fleksibilnim kolovoznim konstrukcijama. CBR nije neposredna mjera stepena zbijenosti; vrijednost zavisi od gustine, sadržaja vode, zasićenja, granulacije i uslova pripreme uzorka [ASTM International, 2021c].

CBR je empirijski indeks nosivosti, a ne modul deformacije, kohezija niti direktna mjera zbijenosti. Na rezultat utiču granulometrija, sadržaj vode, ostvarena suva zapreminska masa, način pripreme uzorka, potapanje ili njegovanje, dodatno opterećenje na površini i oblik početnog dijela krive. Zato se CBR vrijednost uvijek tumači zajedno sa uslovima pripreme i ispitivanja.



Slika 3.2a. Šematski prikaz laboratorijskog CBR opita.

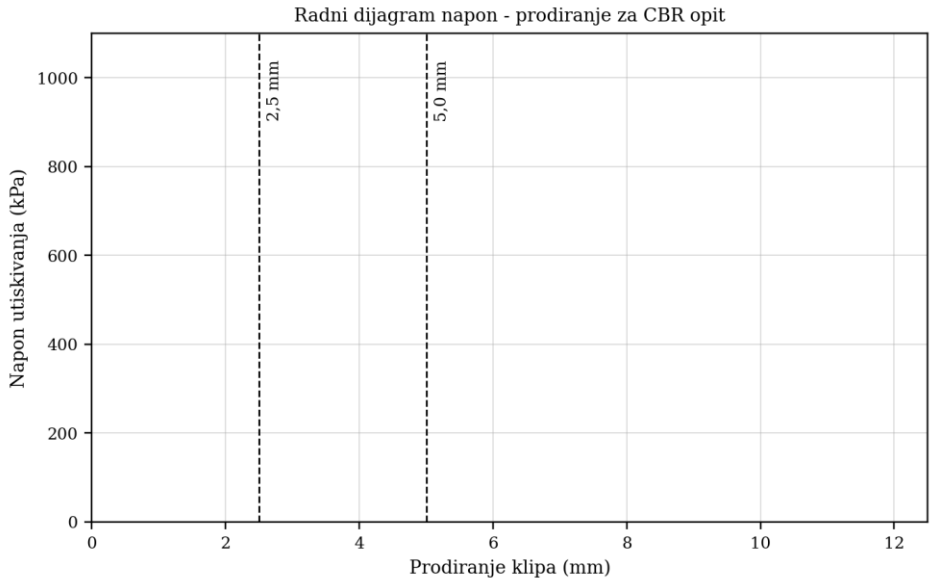
U ASTM D1883-21 uzorak se penetrira standardnim klipom, a iz korigovane krive napon - prodiranje očitavaju se naponi pri približno 2,5 mm i 5,1 mm prodiranja. Referentni naponi su 6,9 MPa i 10,3 MPa. Za svako prodiranje CBR se računa kao odnos napona ispitivanog uzorka i odgovarajućeg standardnog napona, pomnožen sa 100 %.

Ako početni dio krive pokazuje konkavnost naviše zbog nalijeganja klipa ili neravnine površine, prije očitavanja napona pri referentnim penetracijama vrši se korekcija koordinatnog početka u skladu sa standardom. Kod potopljenih uzoraka rezultat može biti znatno niži nego u neposrednom stanju, pa uslov potapanja mora biti jasno naveden.

$$CBR_{2,5} = \frac{\sigma 2,5}{6,9MPa} \cdot 100\%$$

$$CBR_{5,0} = \frac{\sigma 5,0}{10,3MPa} \cdot 100\%$$

Ako je kriva na početku konkavna naviše zbog neravnine površine ili nalijeganja klipa, porijeklo penetracije se koriguje prema propisanoj proceduri. Uobičajeno se izvještava rezultat pri 2,5 mm; kada je rezultat pri 5 mm značajno veći, standard predviđa dodatnu provjeru odnosno ponavljanje i odgovarajuće izvještavanje.



Slika 3.2. Radni dijagram napon - prodiranje za obradu CBR opita.

Za nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mješavine u putogradnji aktuelan je SRPS EN 13286-47:2022, koji obuhvata CBR, neposredni indeks nosivosti i linearno bubrenje. U laboratorijskom izvještaju treba navesti standard, stanje uzorka (potopljen/nepotopljen), način zbijanja i suvu zapreminsku masu uzorka.

Mehanizam zbijanja i fazni odnosi u tlu

Zbijanje je prvenstveno proces smanjenja zapremine vazduha u porama djelovanjem mehaničke energije. Za razliku od konsolidacije, kod koje se zapremina zasićenog tla smanjuje istiskivanjem vode tokom vremena, zbijanje se obično odvija brzo i najizraženije utiče na

vazdušnu fazu. Čvrste čestice se preuređuju u gušći sklop, dok se dio vazduha izbacuje iz pora. Koliko će preuređivanje biti uspješno zavisi od trenja između zrna, sadržaja vode, vrste tla i načina unosa energije. Zato ista količina energije ne daje isti efekat u pijesku, prašini i glini.

Sadržaj vode ima dvostruku ulogu. Na suvoj strani optimuma mala količina vode može podmazati kontakte i smanjiti otpor pomjeranju čestica, pa se za istu energiju postiže veća suva zapreminska masa. Kada se približi optimumu, struktura postaje gušća i vazduh se sve teže istiskuje. Dalje dodavanje vode zauzima dio pora i ograničava dodatno zbijanje, pa suva zapreminska masa počinje da opada. Zato Proktorova kriva nije samo empirijski luk, već rezultat konkurencije između lakšeg preuređivanja zrna i sve manjeg prostora za vazduh.

Fazni dijagram omogućava provjeru fizičke realnosti rezultata. Za poznatu specifičnu gustinu čvrstih čestica može se konstruisati linija nultog sadržaja vazduha, koja predstavlja teorijsko stanje potpune zasićenosti za dati sadržaj vode. Eksperimentalne tačke moraju ležati ispod te linije. Ako izmjerena suva gustina presiječe teorijsku granicu, greška je gotovo sigurno u masi, zapremini kalupa, sadržaju vode ili jedinicama. Ova jednostavna kontrola je veoma korisna jer povezuje laboratorijski proračun sa osnovnim zakonima održanja mase i zapremine.

Energija zbijanja, struktura i položaj Proktorove krive

Povećanje energije zbijanja daje česticama više mogućnosti da savladaju trenje i pređu u gušći raspored. Zbog toga modifikovani Proktorov opit tipično daje veću maksimalnu suvu zapreminsku masu i manji optimalni sadržaj vode u odnosu na standardni opit. Međutim, odnos nije samo pomjeranje jedne univerzalne krive. Kod koherentnih tala veća energija može promijeniti orijentaciju i agregaciju čestica, pa se mijenjaju propustljivost i deformabilnost. Rezultat zato uvijek pripada konkretnoj energiji i proceduri, a ne predstavlja apsolutnu osobinu tla.

Kod glinovitih tala struktura zbijena na suvoj strani optimuma često je više flokulisana, sa nepravilnim rasporedom agregata i većim porama između njih. Na vlažnoj strani čestice se lakše preorijentišu i struktura može postati disperznija. Dva uzorka sa sličnom suvom gustinom, ali zbijena na različitim stranama optimuma, zato mogu imati različitu propustljivost, bubrenje i čvrstoću. Ova činjenica je važna kod glinenih jezgara nasipa, zaptivnih slojeva i drugih konstrukcija kod kojih cilj nije samo postići minimalni procenat zbijenosti.

Granulometrija takođe određuje oblik Proktorove krive. Dobro gradirani krupnozrniji materijali često postižu visoke suve gustine jer se pore efikasno popunjavaju, dok veoma plastične gline imaju veći optimalni sadržaj vode i nižu maksimalnu suvu gustinu. Prisustvo krupnih zrna može zahtijevati korekcije ili izbor većeg kalupa. Ako veličina zrna postane prevelika u odnosu na dimenzije opreme, laboratorijski uzorak više nije reprezentativan, pa rezultat može pogrešno opisati materijal ugrađen na terenu.

Terensko zbijanje i izbor mehanizma djelovanja

Laboratorijski Proktorov opit daje referentnu vezu sadržaja vode i suve gustine, dok se na terenu energija unosi različitim mašinama. Statički valjci, vibracioni valjci, ježevi i pneumatski valjci ne djeluju istim mehanizmom. Vibracija je naročito efikasna kod krupnozrnih materijala jer smanjuje privremeni otpor trenja i omogućava zrnima da se preurede. Gnječenje i kneading efekat pogodniji su za koherentna tla. Zbog toga izbor opreme treba povezati sa tipom tla, debljinom sloja i ciljem zbijanja, a ne samo sa nominalnom masom valjka.

Kontrola vlažnosti na terenu jednako je važna kao broj prelaza mašine. Ako je tlo mnogo suvlje od optimuma, dodatni prolazi mogu dati mali efekat jer čestice ostaju zaključane trenjem. Ako je previše vlažno, energija može stvarati porni pritisak i lokalno gnječenje bez povećanja suve gustine. U praksi se materijal zato po potrebi vlaži, prosušuje i miješa prije konačnog zbijanja. Homogenost sadržaja vode unutar sloja važna je zato što lokalna odstupanja mogu ostati skrivena ako se mjeri samo nekoliko kontrolnih tačaka.

Stepen zbijenosti, izražen odnosom terenske suve gustine i laboratorijske maksimalne suve gustine, predstavlja praktičan kriterijum prihvatanja. Međutim, sama vrijednost ne opisuje sve. Potrebno je navesti na koju Proktorovu energiju se referenca odnosi, kojim postupkom je mjerena terenska gustina, kolika je vlažnost i da li je materijal uporediv sa laboratorijskim uzorkom. Kod heterogenih nasipa korisno je kombinovati gustinu sa dodatnim pokazateljima krutosti ili nosivosti, jer lokalne zone sa krupnim zrnima mogu otežati pouzdano određivanje zapreminske mase.

Fizičko značenje CBR opita

Kalifornijski indeks nosivosti zasniva se na otporu tla prema penetraciji standardnog klipa. Tokom opita registruje se odnos opterećenja i prodora, a izmjereno opterećenje pri propisanim penetracijama poredi se sa referentnim vrijednostima. CBR zato nije fundamentalna konstanta materijala, već indeks koji zavisi od pripreme, zbijenosti, sadržaja vode i uslova

kondicioniranja. Njegova velika praktična vrijednost proizlazi iz istorijske veze sa dimenzionisanjem kolovoznih konstrukcija i mogućnosti relativno jednostavnog poređenja različitih zemljanih materijala.

Oblik krive opterećenje–penetracija sadrži više informacija od jedne CBR vrijednosti. Početna konkavnost može ukazivati na neravninu površine, loš kontakt klipa ili početno ulegnuće, pa se u standardnoj obradi po potrebi primjenjuje korekcija početka krive. Nagli porast otpora može biti povezan sa zbijenim skeletom ili prisustvom krupnijih zrna. Ako se rezultat pri dvije referentne penetracije razlikuje od uobičajenog obrasca, potrebno je provjeriti proceduru i pravilo standarda koje se primjenjuje. Mehaničko tumačenje uvijek treba povezati sa načinom pripreme uzorka.

Natopljeni CBR pokušava da simulira nepovoljno stanje povećane vlažnosti i mogućeg bubrenja. Kod sitnozrnih i osjetljivih materijala višednevno potapanje može znatno smanjiti nosivost u odnosu na neposredno ispitani uzorak. Zato razlika između natopljenog i nenatopljenog rezultata daje informaciju o osjetljivosti na vodu. Pri tome uslovi na terenu mogu biti i povoljniji i nepovoljniji od laboratorijskog režima. CBR treba tumačiti kao standardizovani indeks za poređenje, a ne kao direktnu simulaciju svakog mogućeg terenskog stanja.

Veza zbijenosti, nosivosti i projektne kontrole

Veća suva gustina često povećava krutost i nosivost tla, ali odnos nije linearan niti univerzalan. Kod koherentnih tala sadržaj vode može imati presudan uticaj na CBR čak i kada je postignut isti stepen zbijenosti. Materijal zbijen blizu optimuma može imati dobru početnu nosivost, a zatim izgubiti dio otpornosti pri zasićenju. Zbog toga specifikacija koja sadrži samo zahtjev, na primjer minimalni procenat Proktorove gustine, ne mora biti dovoljna za slojeve kod kojih je ponašanje veoma osjetljivo na vodu.

Projektna kontrola treba da posmatra sistem: kvalitet materijala, granulometriju, plastičnost, vlažnost, debljinu sloja, energiju zbijanja i odvodnjavanje. CBR je posebno koristan kao integrisani indeks posljedica više navedenih faktora, ali može pokazivati znatno rasipanje. Zbog toga je važno planirati dovoljan broj ponavljanja i prepoznati da pojedinačno visoka vrijednost ne opisuje nužno cijelu trasu ili pozajmište. Prostorna varijabilnost često je veća od laboratorijske preciznosti jedne probe.

U savremenoj praksi CBR se ponekad dopunjuje mjerenjima modula ili dinamičke krutosti na terenu, naročito kada je cilj brza kontrola velikih površina. Takva mjerenja ne treba automatski prevoditi u CBR jednom univerzalnom korelacijom, jer veza zavisi od tipa tla i stanja vlažnosti. Najbolja primjena laboratorijskog Proktora i CBR-a je kao dio lanca kontrole: laboratorija definiše referentno ponašanje, terenska ispitivanja provjeravaju ostvareno stanje, a drenažni i konstruktivni detalji obezbjeđuju da se to stanje tokom eksploatacije ne pogorša.

3.3 Osnovni podaci za Proktorov opit

Za dati uzorak usvojena je zapreminska težina čvrstih čestica γ_S = 27 kN/m³ i zapremina cilindra V = 942 cm³. U pojednostavljenom nastavnom primjeru mase u Tabeli 3.2 tretiraju se kao masa vlažnog i masa potpuno osušenog istog uzorka u cilindru.

Tabela 3.2. Rezultati mjerenja mase uzorka za Proktorovu obradu

Opit	1	2	3	4	5	6
Masa vlažnog uzorka m_ω (g)	1967	1943	1775	1969	1951	1863
Masa suvog uzorka m_d (g)	1620	1610	1519	1601	1573	1479

Na osnovu ovih podataka student računa ω i γ_d za svaku tačku, nanosi ih na Sliku 3.1 i grafički određuje ω_{opt} i $\gamma_{d\max}$.

3.4 Osnovni podaci za CBR opit

CBR opit je izveden na uzorku u zasićenom stanju.

Tabela 3.3. Rezultati CBR penetracije

Veličina	1	2	3	4	5	6	7
Prodiranje (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Napon (kPa)	0	97	167	229	282	332	384
Prodiranje (mm)	4,0	5,0	6,0	7,5	9,0	10,0	12,5
Napon (kPa)	437	531	600	731	804	860	975

Tabela 3.4. Referentni naponi za obračun CBR prema ASTM D1883-21

Prodiranje	Referentni napon	Ekvivalentno
2,5 mm	6,9 MPa	6900 kPa
5,1 mm (približno 5,0 mm u radnoj tabeli)	10,3 MPa	10300 kPa

3.5 Zadatak

- Za svih šest Proktorovih tačaka izračunati sadržaj vode ω i suvu zapreminsku težinu γ_d.
- Na Slici 3.1 nacrtati Proktorovu krivu i grafički odrediti optimalni sadržaj vode ω_{opt} i maksimalnu suvu zapreminsku težinu $\gamma_{d\max}$.
- Provjeriti da sve eksperimentalne tačke ostaju ispod linije bez vazdušnih pora.
- Na Slici 3.2 ucrtati podatke CBR opita i ocijeniti da li je potrebna korekcija početka krive.
- Očitati/uzeti napone pri 2,5 mm i 5,0 mm i izračunati CBR za obje penetracije korišćenjem odgovarajućih referentnih napona.
- Uporediti CBR2,5 i CBR5,0 i navesti kako bi se postupilo prema pravilu iz standarda ako je vrijednost pri 5 mm veća.
- U zaključku jasno razdvojiti pojam stepena zbijenosti od CBR indeksa nosivosti i navesti uslove ispitivanja koji utiču na CBR rezultat.

3.6 Riješeni primjer

Primjer koristi ilustrativne podatke različite od zadatka iz Tabela 3.2-3.4. Prvo se određuju ω_{opt} *i* $\gamma_{d\max}$ *., zatim se pokazuje kontrola relativne zbijenosti i proračun CBR.*

A) Proktorov opit

Zapremina kalupa je V = 1000 cm³. Za pet tačaka poznati su sadržaj vode i masa vlažnog tla u kalupu:

w (%)	6	9	12	15	18
m vlažno (g)	1850	1970	2070	2120	2110

Za svaku tačku najprije se računa vlažna zapreminska masa $\rho = \frac{m}{V}$, a zatim suva zapreminska masa $\rho_d = \frac{\rho}{(1+\omega)}$. Na primjer, za ω = 12 %:

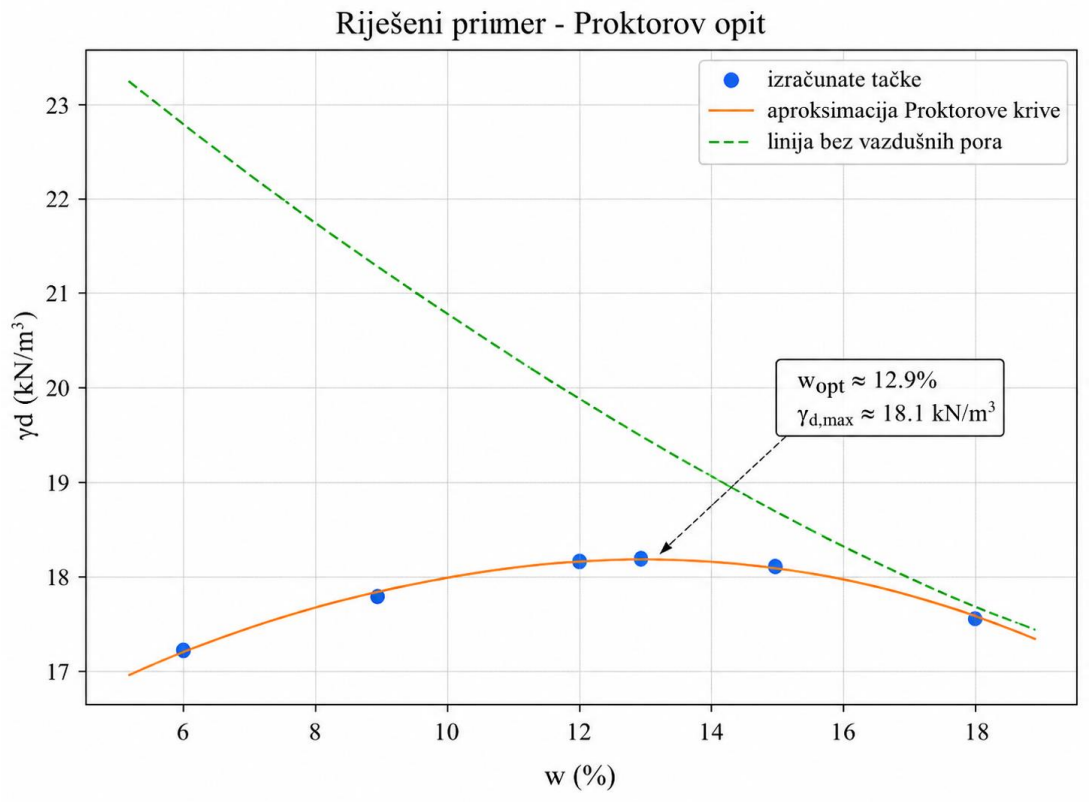
$$\rho = \frac{2070\,g}{1000\,cm^3} = 2,070\,Mg/m^3$$

$$\rho_d = \frac{2,070}{1,12} = 1,848 Mg/m^3$$

$$\gamma_d = \rho_d \cdot g = 1,848 \cdot 9,81 = 18,13 kN/m^3.$$

w (%)	ρ_d (Mg/m³)	γ_d (kN/m³)
6	1,745	17,12
9	1,807	17,73
12	1,848	18,13
15	1,843	18,08
18	1,788	17,54

Aproksimacijom glatke krive kroz tačke dobija se približno $\omega_{opt} \approx 12{,}9$ % i $\gamma_{d\,\max} \approx 18{,}1$ kN/m³. U laboratorijskom izvještaju maksimum se obično određuje grafički ili odgovarajućom kontrolisanom aproksimacijom, uz provjeru da eksperimentalne tačke ostanu ispod linije bez vazdušnih pora.



Slika 3.3. Proktorova kriva i linija bez vazdušnih pora za riješeni primjer (Gs = 2,70).

Ako je na terenu izmjereno $\gamma_{d\,teren}$ = 17,5 kN/m³, relativna zbijenost prema ovom laboratorijskom maksimumu iznosi:

$$R_C = \frac{17{,}5}{18{,}1} \cdot 100\,\% \approx 96{,}7\,\%$$

Da li je to prihvatljivo zavisi od tehničkih uslova projekta; procenat se ne ocjenjuje prema univerzalnom pragu.

B) CBR opit

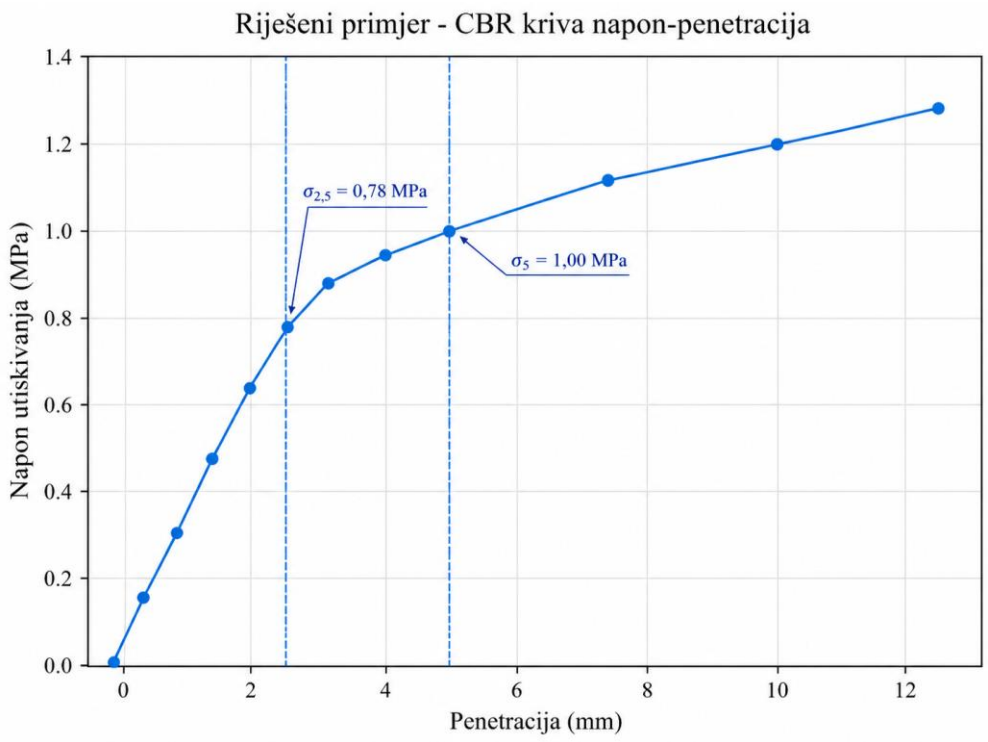
Sa korigovane krive napon-penetracija očitano je $\sigma_{2,5}$ = 0,78 MPa i $\sigma_{5,0}$ = 1,00 MPa.

$$CBR_{2,5} = \frac{0,78}{6,9MPa} \cdot 100\% = 11,3\%$$

$$CBR_{5,0} = \frac{1,00}{10,3MPa} \cdot 100\% = 9,7\%.$$

Pošto je vrijednost pri 2,5 mm veća od vrijednosti pri 5,0 mm, za ovaj ilustrativni slučaj mjerodavna je CBR ≈ 11,3 %. Da je vrijednost pri većoj penetraciji bila veća, postupilo bi se prema pravilu standarda i provjeri ponovljenim opitom.

Zaključak: Proktorov opit daje referentni odnos ω-γ_d i koristi se za kontrolu zbijanja, dok CBR daje poseban empirijski indeks nosivosti. Ta dva rezultata su povezana preko stanja materijala, ali nisu ista fizička veličina.



Slika 3.4. Kriva napon-penetracija za riješeni CBR primjer.

Literatura:

1. ASTM International (2021a) ASTM D698-12(2021): Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. ASTM International (2021b) ASTM D1557-12(2021): Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. ASTM International, West Conshohocken, PA.
3. ASTM International (2021c) ASTM D1883-21: Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
4. Das, B. M., Sobhan, K. (2018) Principles of Geotechnical Engineering. 9th ed. Cengage Learning, Boston.
5. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.
6. Knappett, J. A., Craig, R. F. (2020) Craig's Soil Mechanics. 9th ed. CRC Press, Boca Raton.
7. SRPS EN 13286-2:2012 Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mešavine - Deo 2: Metode ispitivanja za laboratorijsku referentnu zapreminsku masu i sadržaj vode - Zbijanje po Proktoru.
8. SRPS EN 13286-47:2022 Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mešavine - Deo 47: Metode ispitivanja za određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti, neposrednog indeksa nosivosti i linearnog bubrenja.

VJEŽBA BR. 4

Geostatički naponi (naponi u tlu)

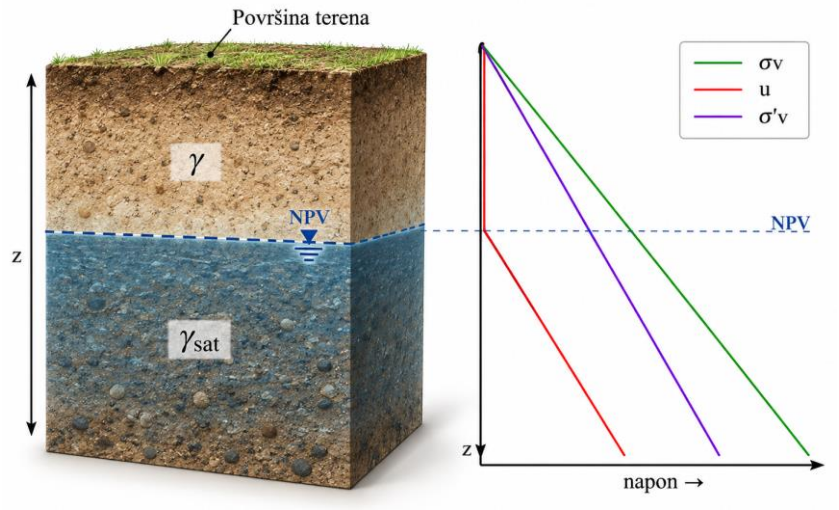
4.1 Ukupni, neutralni i efektivni naponi

Naponsko stanje u tlu nastaje od sopstvene težine, podzemne vode i spoljašnjih opterećenja. Za geotehničke proračune posebno je važna razlika između ukupnog napona, pornog pritiska i efektivnog napona, jer su čvrstoća, stišljivost i konsolidaciono ponašanje tla prvenstveno povezani sa efektivnim naponima (Terzaghi, Peck i Mesri, 1996; Knappett i Craig, 2020).

$$\sigma' = \sigma - u$$

Za horizontalan teren i slojevito tlo vertikalni ukupni napon dobija se sabiranjem težina svih slojeva iznad posmatrane tačke. U hidrostatičkom režimu porni pritisak ispod nivoa podzemne vode raste linearno sa dubinom ispod pijezometarskog nivoa. Iznad nivoa podzemne vode u elementarnim zadacima se često uzima $u \approx 0$, osim kada je potrebno eksplicitno razmatrati kapilarno zasićenje i matrični usis.

$$\sigma_{v(z)} = \sum \gamma_i \cdot h_i \quad u = \gamma_\omega \cdot h_\omega \quad \sigma_v^{'} = \sigma_v \cdot u$$



Slika 4.1. Šematski prikaz ukupnog napona, pornog pritiska i efektivnog vertikalnog napona u hidrostatičkom režimu. Autorska nastavna šema.

4.1.1 Horizontalni napon u stanju mirovanja

Ako nema bočne deformacije tla, efektivni horizontalni napon se u jednostavnom jednodimenzionalnom modelu izražava koeficijentom pritiska u stanju mirovanja K_0. Za normalno konsolidovana tla često se koristi Jakijeva aproksimacija $K_o \approx 1 - \sin\varphi'$, dok kod

prekonsolidovanih tala K_0 može biti znatno veći i zavisi od istorije napona. Ove relacije su empirijske aproksimacije, a ne univerzalni zakoni [Mayne i Kulhawy, 1982].

$$\sigma_h^{'} = K_o \cdot \sigma_v^{'} \quad \sigma_h = \sigma_h^{'} + u$$

Napomena: *Uvijek razlikovati efektivni i ukupni horizontalni napon. Porni pritisak u zasićenom tlu doprinosi ukupnom normalnom naponu u svim pravcima.*

4.2 Slojevito tlo i pijezometarski nivoi

Kod više slojeva zapreminska težina se mijenja po intervalima dubine. Ako su pojedini vodonosni slojevi hidraulički odvojeni slabopropusnim slojem, mogu imati različite pijezometarske nivoe. Tada se porni pritisak ne određuje jednom zajedničkom pravom kroz cijeli profil, već se za svaki hidraulički domen koristi odgovarajući pijezometarski nivo. Na granici preko slabopropusnog sloja moguć je skok pornog pritiska, dok ukupni vertikalni napon ostaje kontinuiran.

4.3 Dopunski naponi od spoljašnjeg opterećenja

Površinsko ili temeljno opterećenje proizvodi priraštaj napona u tlu. Za homogen, izotropan, linearno-elastičan poluprostor klasično Boussinesqovo rješenje za koncentrisanu vertikalnu silu Q daje vertikalni priraštaj napona u tački udaljenoj *r* od ose sile i na dubini *z*:

$$\Delta\sigma_z = \frac{\left(\frac{3Q}{2\pi}\right) \cdot z^3}{\left(r^2 + z^2\right)^{\left(\frac{5}{2}\right)}}$$

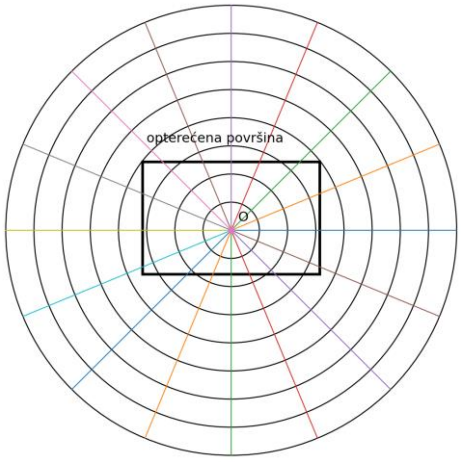
Za ravnomjerno opterećene površine proizvoljnog oblika praktičan grafički postupak je Newmarkov uticajni dijagram. Opterećena površina se nacrta u razmjeri za izabranu dubinu, preklopi sa nomogramom, prebroje se obuhvaćena polja N i izračuna $\Delta\sigma_z = q \cdot I \cdot N$, gdje je I uticajna vrijednost jednog polja. Danas se isti princip često zamjenjuje numeričkom integracijom ili geotehničkim softverom, ali je nomogram didaktički vrlo koristan za razumijevanje uticajne zone [Newmark, 1942; Das i Sobhan, 2018].

4.3.1 Pretpostavke i granice primjene

Klasična Boussinesqova i Newmarkova rješenja polaze od idealizacije tla kao homogenog, izotropnog i linearno-elastičnog poluprostora, uz mala pomjeranja i poznato spoljašnje opterećenje. Zato su naročito pogodna za nastavno razumijevanje raspodjele napona i za preliminarne proračune. Kod izrazito slojevitog, anizotropnog ili nelinearnog tla, kao i u blizini

krutih granica i iskopa, potrebna je pažljivija procjena i, po potrebi, napredniji proračunski model.

Priraštaj ukupnog napona od spoljašnjeg opterećenja ne treba poistovjećivati sa slijeganjem. Za procjenu deformacija potrebno je dodatno poznavati stišljivost i naponsku istoriju tla. U zasićenom tlu promjena efektivnog napona zavisi i od promjene pornog pritiska, pa se pri kratkotrajnom i dugotrajnom opterećenju mogu dobiti različiti odgovori.



Slika 4.2. Princip Newmarkovog uticajnog dijagrama i položaj opterećene površine u odnosu na centar proračuna.

4.4 Putanja napona u pojednostavljenom p-q prikazu

Za ravansko razmatranje sa vertikalnim i horizontalnim normalnim naponima korisno je uvesti srednji napon p i polurazliku q. Ako porni pritisak djeluje jednako u oba pravca, on mijenja p, ali se poništava u razlici napona, pa je $q' = q$.

$$p = \frac{(\sigma_v + \sigma_h)}{2} \quad q = \frac{(\sigma_v - \sigma_h)}{2}$$

$$p' = \frac{(\sigma'_v + \sigma'_h)}{2} = p - u \quad q' = \frac{(\sigma'_v - \sigma'_h)}{2} = q$$

4.4.1 Fizičko značenje efektivnog napona i raspodjela opterećenja u poroznoj sredini

Princip efektivnog napona predstavlja jednu od centralnih ideja mehanike tla. Ukupni normalni napon u zasićenom tlu prenose zajedno skelet tla i porna voda, ali se deformacije skeleta, trenje između zrna i najveći dio promjena smičuće čvrstoće neposredno povezuju sa efektivnim naponom. U Terzagijevom obliku, za potpuno zasićeno tlo i uobičajene geotehničke uslove, važi $\sigma' = \sigma - u$. Ova jednostavna relacija omogućava da se razdvoje dvije fizički različite

komponente istog ukupnog opterećenja: dio koji nosi voda u porama i dio koji se prenosi preko kontakata između čvrstih čestica.

Pri povećanju spoljašnjeg opterećenja ukupni napon raste odmah, dok način na koji se taj priraštaj dijeli između pornog pritiska i efektivnog napona zavisi od drenažnih uslova i vremena. U dobro propusnom pijesku višak pornog pritiska se brzo disipira, pa se većina priraštaja relativno brzo prenosi na skelet. U zasićenoj glini, neposredno nakon brzog opterećenja, značajan dio priraštaja može privremeno preuzeti porna voda. Tek sa drenažom i disipacijom viška pornog pritiska raste efektivni napon, a sa njim se razvija konsolidaciono slijeganje. Zbog toga ista vrijednost ukupnog napona ne mora odgovarati istom deformacionom ili čvrstoćnom stanju tla.

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u$$

U vertikalnom profilu ukupni napon obično raste sa dubinom približno linearno unutar svakog homogenog sloja, sa nagibom koji odgovara zapreminskoj težini tog sloja. Porni pritisak u hidrostatičkom režimu raste sa nagibom $\gamma\omega$ ispod pijezometarske linije. Efektivni napon zato raste sa nagibom približno jednakim potopljenoj zapreminskoj težini $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_{\omega}$ u potpuno zasićenom sloju. Na granici dva sloja ukupni i efektivni napon ostaju kontinuirani ako nema koncentrisanog površinskog opterećenja ili hidrauličkog diskontinuiteta, ali se njihov nagib mijenja zbog promjene zapreminske težine ili gradijenta pornog pritiska.

Za praktični proračun korisno je u svakoj karakterističnoj dubini prvo odvojeno odrediti σ_v i u, a zatim izračunati σ_v'. Takav redoslijed smanjuje mogućnost da se zasićena, vlažna i potopljena zapreminska težina međusobno zamijene. Posebno je važno da se potopljena zapreminska težina ne koristi za računanje ukupnog napona: ona je izvedena veličina koja se praktično pojavljuje tek kada se od ukupnog napona oduzme hidrostatički porni pritisak [Terzaghi, Peck i Mesri, 1996; Knappett i Craig, 2020].

4.4.2 Nivo podzemne vode, kapilarna zona i nezasićeno tlo

Promjena nivoa podzemne vode mijenja istovremeno zapreminsku težinu dijela profila i porni pritisak. Ako se nivo vode spusti, zona koja je ranije bila zasićena može postati nezasićena. Ukupni vertikalni napon tada obično blago opada, jer se zasićena zapreminska težina zamjenjuje manjom vlažnom ili prirodnom zapreminskom težinom. Porni pritisak, međutim, može opasti znatno više. Zbog toga je tipična posljedica snižavanja nivoa podzemne vode porast efektivnog napona, što može izazvati dodatno sabijanje tla i slijeganje površine. Upravo

taj mehanizam je važan kod dugotrajnog crpljenja podzemne vode u stišljivim glinama i prašinastim sedimentima.

Iznad nivoa podzemne vode realno stanje nije uvijek jednako pretpostavci $u = 0$. U sitnozrnom tlu kapilarne sile mogu podići vodu iznad slobodnog nivoa, pri čemu porni pritisak vode postaje negativan u odnosu na atmosferski. Negativan porni pritisak, odnosno matrični usis, može privremeno povećati prividnu krutost i smičuću otpornost nezasićenog tla. Jednostavna Terzagijeva relacija, međutim, nije dovoljna za opšti opis nezasićenog tla jer pore istovremeno sadrže vazduh i vodu.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \gamma (u_a - u_\omega).$$

U prethodnom izrazu u_a predstavlja pritisak vazduha u porama, u_ω pritisak vode, a χ parametar koji opisuje u kojoj mjeri usis doprinosi efektivnom naponskom stanju. Ovaj Bishopov zapis je koristan za razumijevanje, ali χ nije univerzalna konstanta i zavisi od stepena zasićenja i strukture tla. U zadacima ove vježbe nezasićena zona se svjesno pojednostavljuje, pa se iznad nivoa podzemne vode uzima $u \approx 0$. Takva pretpostavka je prihvatljiva za elementarne proračune, ali u projektima kosina, plitkih temelja, nasipa i isušenih glina efekat usisa može biti značajan.

Pri naglom porastu nivoa vode moguć je obrnut efekat: ukupni napon nešto raste zbog većeg sadržaja vode, dok porni pritisak raste brže, pa efektivni napon može opasti. Posljedica može biti smanjenje smičuće čvrstoće i stabilnosti. Zato se promjena nivoa podzemne vode ne analizira samo geometrijski, već kao promjena naponskog stanja. U vremenski promjenljivim uslovima treba razlikovati trenutni odgovor, kada porni pritisci još nisu u ravnoteži, od konačnog hidrostatičkog stanja poslije dovoljno dugog vremena.

4.4.3 Koeficijent pritiska u mirovanju K_o i istorija naprezanja

Horizontalni efektivni napon u prirodnom tlu nije određen samo trenutnim vertikalnim naponom. Na njega utiču geološka istorija, način taloženja, cementacija, prethodna opterećenja i rasterećenja, kao i mogućnost bočnog širenja. Koeficijent pritiska u mirovanju K_o definiše se odnosom efektivnog horizontalnog i vertikalnog napona u stanju u kome je bočna deformacija praktično spriječena: $K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$. On zato predstavlja stanje, a ne fundamentalnu materijalnu konstantu.

Za normalno konsolidovana tla često se koristi Jakijeva aproksimacija $K_{o,}NC \approx 1-\sin\varphi' K_o$. Ova relacija daje korisnu procjenu za mnoga sedimentna tla, ali njena primjena podrazumijeva približno horizontalno taloženje, odsustvo jakog cementiranja i poznat efektivni ugao smičuće otpornosti. Kada je tlo u prošlosti bilo izloženo većem efektivnom vertikalnom naponu nego danas, ono je prekonsolidovano. Tada se K_o tipično povećava, jer vertikalno rasterećenje ne prati proporcionalno smanjenje horizontalnog napona.

$$OCR = \frac{\sigma_p'}{\sigma_v'} \qquad K_{o,}OC \approx K_{o,}NC \cdot OCR^{(\sin\varphi')}.$$

Ovde je σ_p' napon prekonsolidacije, a σ_v' sadašnji efektivni vertikalni napon. Relacija za prekonsolidovano stanje predstavlja empirijsku aproksimaciju i posebno je korisna za razumijevanje zašto K_o kod starijih, erodovanih ili prethodno opterećenih glina može biti znatno veći od vrijednosti dobijene samo iz Jakijeve formule [Mayne i Kulhawy, 1982]. U jako prekonsolidovanom tlu horizontalni efektivni napon može čak biti uporediv sa vertikalnim ili veći od njega.

Praktično značenje K_o je veliko kod potpornih konstrukcija, dubokih iskopa, tunela, edometarskog ispitivanja i procjene početnog naponskog stanja u numeričkim modelima. Pogrešno usvojen K_o mijenja ne samo početni horizontalni napon već i kasniju putanju napona pri iskopu ili opterećenju. U terenskim uslovima dodatno treba razmotriti nagib slojeva, anizotropiju, tektonske ili rezidualne napone i lokalnu geometriju terena. Zbog toga se K_o u značajnim projektima, kada je moguće, provjerava terenskim ili laboratorijskim mjerenjima i kalibracijom modela, a ne samo jednom empirijskom jednačinom.

4.4.4 Priraštaj napona ispod raspodijeljenih površinskih opterećenja

Boussinesqovo rješenje za koncentrisanu silu predstavlja osnovu za izvođenje brojnih rješenja za raspodijeljeno opterećenje. Princip superpozicije omogućava da se ravnomjerno opterećena površina posmatra kao skup veoma malih elemenata opterećenja čiji se doprinosi sabiraju. Na taj način dobija se priraštaj vertikalnog napona ispod temelja, nasipa ili druge opterećene površine. U praktičnim proračunima rezultat se često zapisuje kao $\Delta\sigma_z = q \cdot I_z$, gdje je q intenzitet površinskog opterećenja, a I_z bezdimenzioni uticajni faktor koji zavisi od geometrije i odnosa koordinata prema dubini.

Za ravnomjerno opterećenu kružnu površinu poluprečnika R, priraštaj vertikalnog napona na osi ispod centra može se izraziti zatvorenim oblikom:

$$\Delta\sigma_z = q \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right)^{\left(\frac{3}{2} \right)}} \right].$$

Na malim dubinama u odnosu na dimenziju opterećene površine priraštaj napona je blizak površinskom pritisku q, dok se sa dubinom smanjuje i raspoređuje na sve veću zapreminu tla. Zbog toga se često govori o „naponskoj lukovic", odnosno zoni u kojoj je dodatni napon inžinjerski značajan. Oblik te zone zavisi od oblika temelja: ispod trake naponsko polje opada sporije sa dubinom nego ispod manjeg izolovanog temelja iste površinske intenzivnosti.

Newmarkov dijagram grafički sprovodi isti princip integracije. Za izabranu dubinu opterećena kontura se nacrta u odgovarajućoj razmjeri i postavi preko mreže uticajnih polja. Broj obuhvaćenih polja množi se uticajnom vrijednošću jednog polja i pritiskom q. Prednost metode je jednostavnost za nepravilne konture; nedostatak je ograničena grafička preciznost. Savremeni proračunski programi isti problem rješavaju numeričkom integracijom, ali fizički smisao ostaje isti.

Važno je da se dodatni napon $\Delta\sigma_z$ ne dodaje pornom pritisku automatski. Neposredna promjena u i način prelaska dodatnog ukupnog napona u efektivni napon zavise od drenažnih uslova. U dreniranim uslovima, poslije disipacije viška pornog pritiska, priraštaj ukupnog napona praktično prelazi u efektivni. U kratkotrajno nedreniranim uslovima zasićene gline početni porast efektivnog napona može biti mnogo manji. Zato analiza napona od temelja predstavlja prvi korak, a procjena deformacija i konsolidacije zahtijeva dodatni model ponašanja tla [Das i Sobhan, 2018; Newmark, 1942].

4.4.5 Sila filtracije, hidraulički gradijent i efektivni napon

Kada kroz tlo postoji tečenje vode, porni pritisak više ne mora odgovarati jednostavnoj hidrostatičkoj liniji. Razlika ukupne hidrauličke visine između dvije tačke stvara hidraulički gradijent i, zajedno sa strujanjem vode, silu filtracije koja djeluje na skelet tla. Za jednodimenzionalno tečenje intenzitet sile filtracije po jedinici zapremine može se približno pisati kao $i \cdot \gamma_\omega$, gde je i hidraulički gradijent. Smjer te sile je smjer gubitka hidrauličke visine.

Kod strujanja naniže sila filtracije djeluje u smjeru težine i povećava efektivni napon u odnosu na čisto hidrostatičko stanje. Kod strujanja naviše ona djeluje suprotno težini i smanjuje efektivni napon. Ako je uzlazni gradijent dovoljno velik, efektivni napon može postati veoma mali, pa pjeskovito tlo gubi stabilnu kontaktnu strukturu. Ovaj granični slučaj povezuje se sa kritičnim hidrauličkim gradijentom:

$$icr \approx \frac{\gamma'}{\gamma_\omega} = \frac{(G_s - 1)}{(1+e)}.$$

Kada i približi icr, uzlazna sila filtracije postaje uporediva sa potopljenom težinom tla. U praksi se takvo stanje može manifestovati kao ključanje pijeska, podizanje dna iskopa ili razvoj unutrašnje erozije i cjevljenja. Kritični gradijent iz prethodne formule je idealizovana vrijednost za homogeno zasićeno tlo; stvarna sigurnost zavisi od slojevitosti, lokalnih kanala, granulometrije, geometrije izlaza toka i zaštitnih filtera.

Ovaj koncept je direktno povezan sa dijagramom efektivnog napona. Pri uzlaznom strujanju nagib linije pornog pritiska postaje veći od hidrostatičkog, pa se razlika $\sigma_v - u$ smanjuje sa dubinom brže nego u mirnoj vodi. Pri silaznom strujanju događa se suprotno. Zbog toga se kod dubokih iskopa, brana, zagata i drenažnih sistema porni pritisak određuje iz pijezometarskih visina ili mreže strujanja, a ne samo iz geometrijske dubine ispod nivoa podzemne vode.

4.4.6 Putanja napona, drenirani i nedrenirani odgovor

Putanja napona opisuje redoslijed promjena naponskog stanja, a ne samo početnu i krajnju tačku. To je važno zato što realno tlo može različito reagovati na isto konačno stanje ako je do njega došlo različitim putem. U $p-q$ prikazu iz ove vježbe srednji napon p opisuje prosječni nivo normalnog opterećenja, dok q mjeri razliku vertikalnog i horizontalnog napona.

Za efektivne napone porni pritisak pomjera srednji napon: $p' = p - u$, dok se u idealizovanom ravanskom slučaju q ne mijenja jer se isti u oduzima od oba normalna napona.

U dreniranom opterećenju višak pornog pritiska ima dovoljno vremena da se disipira, pa se putanja ukupnih i efektivnih napona međusobno približavaju. U brzom nedreniranom opterećenju ukupni napon može znatno porasti, ali se dio promjene pojavljuje kao višak pornog pritiska. Efektivna putanja tada može biti veoma različita od ukupne. Kod normalno konsolidovanih glina pri smicanju se često razvija pozitivan višak pornog pritiska, dok jako prekonsolidovane gline mogu pokazati manji porast ili čak negativan porni pritisak u pojedinim fazama deformisanja.

Snižavanje nivoa podzemne vode predstavlja drugačiju vrstu naponske putanje. Ukupni vertikalni napon može blago opasti zbog smanjenja zapreminske težine, ali porni pritisak opada izraženije, pa p' raste. Istovremeno, ako se K_0 mijenja sa istorijom naprezanja, horizontalna komponenta ne mora pratiti vertikalnu proporcionalno. Zato se u detaljnijim analizama promjene nivoa vode, iskopa i nasipanja razmatraju kao sekvenca događaja, a ne kao jedan statički proračun.

Putanje napona su posebno korisne za povezivanje ove vježbe sa narednim oblastima mehanike tla: smičućom čvrstoćom, konsolidacijom i laboratorijskim triaksijalnim opitima. One omogućavaju da se uoči kada se tlo približava omotaču loma, da li se stanje pomjera ka većim ili manjim efektivnim naponima i kakvu ulogu ima promjena pornog pritiska. U praktičnom radu je zato korisno uz dijagrame $\sigma_v - u - \sigma_v'$ prikazati i nekoliko karakterističnih tačaka u $p - q$ prostoru, naročito prije i poslije promjene nivoa podzemne vode.

4.5 Redoslijed proračuna

- Definisati slojeve, njihove debljine i zapreminske težine iznad i ispod nivoa podzemne vode.
- U svakoj karakterističnoj dubini izračunati ukupni vertikalni napon sabiranjem γ i h_i.
- Iz pijezometarskog nivoa izračunati porni pritisak u; za odvojene akvifere koristiti odgovarajuću pijezometarsku liniju.
- Odrediti efektivni vertikalni napon $\sigma_v' = \sigma_v - u_i$, kada je zadato K_0, horizontalne efektivne i ukupne napone.
- Dijagrame crtati po karakterističnim dubinama i povezati linearno samo unutar intervala u kojima su γ i gradijent pornog pritiska konstantni.
- Kod promjene nivoa podzemne vode uporediti početno i konačno stanje i provjeriti da li promjena ukupnog napona odgovara promjeni zapreminske težine u zoni koja je promijenila stepen zasićenja.

Ukupni, porni i efektivni napon u poroznom tlu

Tlo je višefazna sredina u kojoj se spoljašnje opterećenje raspodjeljuje između skeleta čvrstih čestica i fluida u porama. Ukupni napon opisuje opterećenje po jedinici površine, porni pritisak opisuje pritisak vode u porama, a efektivni napon predstavlja dio napona koji se prenosi kontaktima između čestica. Za zasićeno tlo osnovna veza je $\sigma' = \sigma - u$. Iako je izraz

jednostavan, njegova važnost je velika: promjena čvrstoće i deformacije tla uglavnom je povezana sa promjenom efektivnog, a ne samo ukupnog napona.

Zbog toga dvije situacije sa istim ukupnim naponom mogu imati potpuno različito mehaničko stanje. Ako porni pritisak poraste, efektivni napon opada i tlo može postati mekše ili manje otporno na smicanje. Ako se voda drenira i porni pritisak opadne, efektivni napon raste i dolazi do zbijanja, odnosno konsolidacije. Ovaj princip objašnjava ponašanje temelja, nasipa, iskopa i kosina, ali i pojave kao što su hidrauličko izdizanje ili gubitak nosivosti pri brzom porastu pornih pritisaka.

U proračunu geostatičkih napona važno je dosljedno razlikovati zapreminsku težinu iznad i ispod nivoa podzemne vode. Ispod slobodne površine vode ukupni vertikalni napon i dalje raste punom zasićenom zapreminskom težinom, dok porni pritisak raste hidrostatički. Efektivni priraštaj zato odgovara približno potopljenoj zapreminskoj težini. Greška nastaje ako se potopljena težina koristi direktno za ukupni napon ili ako se porni pritisak oduzme dva puta. Fizičko razdvajanje ova tri pojma najbolja je zaštita od takve računarske greške.

Horizontalni napon, K_0 i istorija naprezanja

Vertikalni geostatički napon proizlazi prvenstveno iz sopstvene težine tla, ali horizontalni napon zavisi i od bočnog ograničenja, Poasonovog efekta, geološke istorije i prekonsolidacije. Koeficijent pritiska u mirovanju K_0 definiše odnos efektivnog horizontalnog i efektivnog vertikalnog napona kada nema bočne deformacije. To stanje je tipično za široke prirodne slojeve prije izvođenja iskopa ili nasipa. K_0 se ne smije poistovjetiti sa aktivnim ili pasivnim koeficijentom pritiska, koji pripadaju stanjima sa dovoljno velikom bočnom deformacijom da se mobilizuje granična čvrstoća.

Kod normalno konsolidovanih tala K_0 se često procjenjuje empirijskim vezama sa uglom unutrašnjeg trenja, ali prekonsolidacija može znatno povećati horizontalni napon. Tlo koje je u prošlosti bilo opterećeno većim vertikalnim naponom zadržava dio istorijskog bočnog naprezanja nakon rasterećenja. Zato površinski erodirani ili prethodno opterećeni slojevi mogu imati znatno veći K_0 od mladih normalno konsolidovanih naslaga. U praksi se istorija naprezanja povezuje sa OCR-om i rezultatima edometarskih ili in situ ispitivanja.

Anizotropija i slojevitost dodatno komplikuju raspodjelu horizontalnih napona. Sedimentacioni proces često stvara preferentnu orijentaciju čestica i različitu krutost u horizontalnom i vertikalnom pravcu. U takvom tlu jednostavna izotropna elastična veza može dati samo približnu procjenu. Za značajne podzemne konstrukcije, duboke iskope ili osjetljive potporne sisteme opravdano je kombinovati proračun sa mjerenjima deformacija i pornih pritisaka kako bi se stvarno naponsko stanje indirektno provjerilo tokom izvođenja.

Podzemna voda, kapilarna zona i sila filtracije

Slobodna površina podzemne vode predstavlja mjesto gdje je porni pritisak približno jednak atmosferskom. Iznad nje može postojati kapilarna zona u kojoj je voda pod negativnim mjernim pritiskom, odnosno usisom. U sitnozrnim tlima kapilarni uspon može biti veliki i bitno uticati na efektivni napon u plitkim slojevima. Jednostavni proračuni često zanemaruju ovu zonu, što je prihvatljivo samo kada njen uticaj nije značajan za problem koji se analizira. Kod nezasićenih tala veza između ukupnog i efektivnog napona postaje složenija, jer vazduh i voda imaju različite pritiske.

Kada voda teče kroz tlo, hidraulički gradijent stvara zapreminsku silu filtracije. Smjer te sile je isti kao smjer strujanja. Uzlazno strujanje smanjuje efektivni vertikalni napon, jer sila filtracije djeluje suprotno težini skeleta. Pri dovoljno velikom gradijentu efektivni napon može pasti blizu nule, što dovodi do hidrauličkog izdizanja, ključanja ili unutrašnje erozije. Silazno strujanje ima suprotan efekat i povećava kontaktne sile između čestica. Zato analiza iskopne jame ili podzemne vode mora istovremeno obuhvatiti hidrauličko i mehaničko stanje.

Pijezometarski nivo je praktičan način prikaza energije vode. U statičkim uslovima poklapa se sa hidrostatičkom linijom, dok u filtracionom polju može imati nagib. U slojevitom tlu sa različitim propustljivostima porni pritisak na istoj dubini ne može se uvijek odrediti samo udaljenošću od jedne horizontalne površine vode. Potrebno je znati uslove strujanja i granične nivoe. Mjerenja pijezometrima zato predstavljaju važnu kontrolu kod brana, nasipa, dubokih iskopa i kosina gdje promjena pornih pritisaka može biti dominantan faktor stabilnosti.

Dopunski naponi od površinskog opterećenja

Spoljašnje opterećenje temelja ili nasipa stvara priraštaj napona koji se širi u dubinu i bočno od opterećene površine. Klasična rješenja elastične teorije, poput Boussinesqovog rješenja, tretiraju tlo kao homogenu, izotropnu, linearnu elastičnu poluprostornu sredinu. Stvarno tlo rijetko ispunjava sve pretpostavke, ali rješenje daje koristan okvir za procjenu raspodjele

napona. Ključna osobina je da se priraštaj vertikalnog napona smanjuje sa dubinom i udaljenošću od opterećene zone.

Za pravougaone, kružne ili trakaste površine koriste se faktori uticaja ili integrisana rješenja. U praktičnom radu važno je razlikovati geostatički napon, koji postoji prije gradnje, od dopunskog napona koji nastaje usljed novog opterećenja. Ukupni budući efektivni napon dobija se tek nakon odgovarajućeg sabiranja i uzimanja u obzir pornih pritisaka. Kod zasićenih sitnozrnih tala dio dopunskog ukupnog napona može se u početku pojaviti kao višak pornog pritiska, a zatim se tokom konsolidacije prenijeti na skelet.

Slojevitost mijenja stvarno rasprostiranje napona, naročito kada se krutosti susjednih slojeva znatno razlikuju. Krut sloj može raspodijeliti opterećenje drugačije od mekog, a blizina stijenske podloge ograničava deformaciono polje. Zato elastični faktori uticaja treba da se posmatraju kao aproksimacija. Za složene geometrije i važne objekte koriste se numeričke metode, ali i tada je osnovna provjera ista: proračun mora poštovati ravnotežu, realne granične uslove i odgovarajuće početno naponsko stanje.

Putanja napona i veza sa dreniranim i nedreniranim ponašanjem

Stanje napona u tlu nije određeno samo konačnim vrijednostima, već i putem kojim su one dostignute. Putanja napona prikazuje promjenu kombinacije normalnih i smičućih komponenti tokom opterećenja ili rasterećenja. U $p-q$ prikazu srednji napon p opisuje prosječni nivo kompresije, dok q opisuje devijatorsku komponentu odgovornu za promjenu oblika i mobilizaciju smičuće čvrstoće. Takav prikaz omogućava da se različiti problemi, kao što su nasipavanje, iskop ili triaksijalno opterećenje, porede u zajedničkom naponskom prostoru.

Drenirani i nedrenirani odgovor razlikuju se po mogućnosti promjene zapremine i disipacije pornih pritisaka. U dovoljno propustljivom tlu ili pri sporom opterećenju voda može da otiče, pa se promjena ukupnog napona približno prenosi na efektivni napon. U zasićenom sitnozrnom tlu pri brzom opterećenju drenaža je ograničena i razvija se višak pornog pritiska. Zbog toga putanja ukupnog napona i putanja efektivnog napona mogu biti veoma različite. Upravo efektivna putanja određuje približavanje omotaču čvrstoće.

Redoslijed građenja zato ima direktan uticaj na geotehničko ponašanje. Brzo podizanje nasipa, etapno iskopavanje ili privremeno snižavanje podzemne vode mogu voditi različitim naponskim putanjama iako konačna geometrija izgleda isto. Proračun geostatičkih napona je

početni korak za sve takve analize. Dobro definisano početno stanje omogućava da se kasnije promjene pravilno pripišu opterećenju, drenaži ili promjeni geometrije, umjesto da se sve svede na jednu konačnu vrijednost napona.

4.6 Osnovni podaci

4.6.1 Zadatak 1

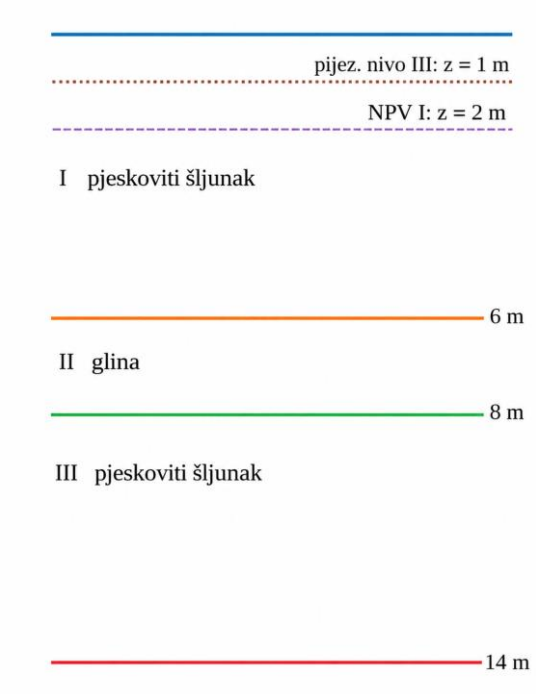
U šljunkovitim terasnim sedimentima nivo podzemne vode se u početnom stanju nalazi na dubini 4,0 m. Promjena vodnog režima izaziva spuštanje nivoa podzemne vode za 2,0 m, odnosno na dubinu 6,0 m. Zapreminska težina šljunka iznad nivoa podzemne vode je 19 kN/m³, a u zasićenom stanju 21 kN/m³. Usvojiti γ_{ω} = 10 kN/m³ i K_0 = 0,30. Prikazati promjenu naponskog stanja do dubine 8 m dijagramima ukupnih, efektivnih i neutralnih napona i putanjom ukupnih i efektivnih napona.

Tabela 4.1. Podaci za Zadatak 1

Veličina	Početno stanje	Konačno stanje
Nivo podzemne vode	z = 4,0 m	z = 6,0 m
γ iznad NPV	19 kN/m³	19 kN/m³
γ_{sat} ispod NPV	21 kN/m³	21 kN/m³
$\gamma\omega$	10 kN/m³	10 kN/m³
K_0	0,30	0,30
Dubina analize	0–8 m	0–8 m

4.6.2 Zadatak 2

Teren izgrađuju: I - pjeskoviti šljunak debljine 6 m, II - glina debljine 2 m i III - pjeskoviti šljunak do dubine z = 14 m. U sloju I nivo podzemne vode je na z = 2 m. Donji pjeskovito-šljunkoviti sloj III je hidraulički odvojen glinom i ima pijezometarski nivo na z = 1 m ispod površine terena. Za sloj I iznad NPV poznati su ω = 6 %, n = 0,30 i G_s = 2,72. Zasićena zapreminska težina sloja II je 20 kN/m³, a sloja III 22 kN/m³. Usvojiti γ_{ω} = 10 kN/m³.



Slika 4.3. Geometrija i pijezometarski nivoi za Zadatak 2.

$$e = \frac{n}{(1-n)} \quad \gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_\omega}{(1+e)} \quad \gamma = \gamma_d (1+\omega) \quad \gamma_{sat} = \frac{\gamma_\omega (G_s + e)}{(1+e)}$$

Za zadate vrijednosti sloja I dobijaju se $\gamma_d \approx 19{,}04$ kN/m³, $\gamma \approx 20{,}18$ kN/m³ i $\gamma_{sat} \approx 22{,}04$ kN/m³. Ove vrijednosti koristiti u daljem proračunu. U sloju III porni pritisak određivati iz njegovog pijezometarskog nivoa $z = 1$ m, a ne produžavanjem linije pornog pritiska iz sloja I.

4.7 Zadatak

- Za Zadatak 1 izračunati $\sigma_v, u, \sigma_v', \sigma_h' i \sigma_h$ u dubinama $z = 0$, 4, 6 i 8 m za oba stanja nivoa podzemne vode.
- Nacrtati dijagrame σ_v, u i σ_v' sa dubinom i jasno označiti početni i konačni NPV.
- Za dubine $z = 4$, 6 i 8 m izračunati p, q, p' i q' i prikazati putanju napona u $p-q$ dijagramu.
- Za Zadatak 2 izračunati ukupne, neutralne i efektivne vertikalne napone u dubinama $z = 2$, 6, 8 i 14 m.
- Na dijagramu pornog pritiska za Zadatak 2 posebno prikazati gornji vodonosni horizont i pijezometarski nivo donjeg sloja III.
- U zaključku objasniti zašto snižavanje nivoa podzemne vode obično povećava efektivni napon i kakve posljedice to može imati na slijeganje tla.

4.8 Riješeni primjer

Sljedeći primjer koristi zaseban skup podataka i ne rješava zadatke iz odjeljka 4.6. U homogenom pjeskovitom tlu γ = 18 kN/m³ iznad NPV, γ_{sat} = 20 kN/m³ ispod NPV, γ_{ω} = 10 kN/m³ i K_0 = 0,50. Posmatra se tačka na z z = 6 m. NPV se spušta sa 2 m na 4 m.

Korak 1 - početno stanje

$$\sigma_v = 2 \cdot 18 + 4 \cdot 20 = 116\,kPa$$

$$u = (6-2) \cdot 10 = 40\,kPa \quad \sigma_v' = 116 - 40 = 76\,kPa$$

$$\sigma_h' = 0{,}50 \cdot 76 = 38\ kPa \quad \sigma_h = 38 + 40 = 78\ kPa$$

Korak 2 - stanje poslije snižavanja NPV

$$\sigma_v = 4 \cdot 18 + 2 \cdot 20 = 112\,kPa$$

$$u = (6-4) \cdot 10 = 20\,kPa \quad \sigma_v' = 112 - 20 = 92\,kPa$$

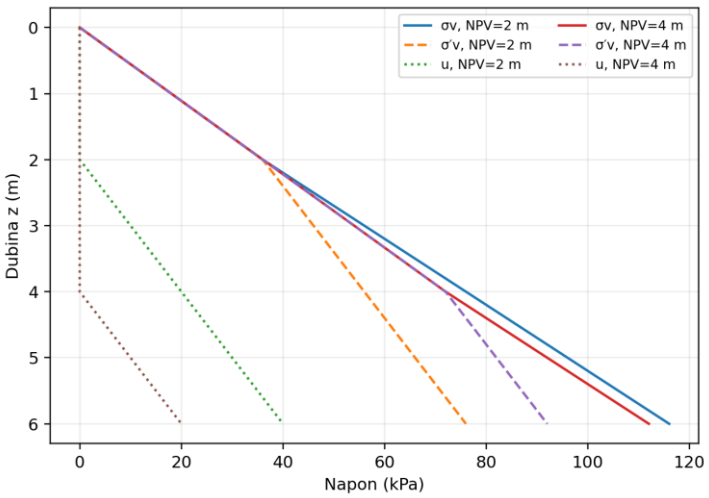
$$\sigma_h' = 0{,}50 \cdot 92 = 46\ kPa \quad \sigma_h = 46 + 20 = 66\ kPa$$

Ukupni vertikalni napon je opao samo 4 kPa, jer su 2 m tla promijenila zapreminsku težinu sa 20 na 18 kN/m³. Porni pritisak je opao 20 kPa, pa je efektivni vertikalni napon porastao za 16 kPa.

Korak 3 - $p-q$ prikaz

početno: p = 97 kPa, q = 19 kPa, p' = 57 kPa, q' = 19 kPa

konačno: p = 89 kPa, q = 23 kPa, p' = 69 kPa, q' = 23 kPa



Slika 4.4. Promjena dijagrama ukupnog, pornog i efektivnog vertikalnog napona u rješenom primjeru.

Literatura:

1. Das, B. M., Sobhan, K. (2018) Principles of Geotechnical Engineering. 9th ed. Cengage Learning, Boston.
2. Knappett, J. A., Craig, R. F. (2020) Craig's Soil Mechanics. 9th ed. CRC Press, Boca Raton.
3. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.
4. Mayne, P. W., Kulhawy, F. H. (1982) K0-OCR Relationships in Soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108(GT6), 851-872.
5. Newmark, N. M. (1942) Influence Charts for Computation of Stresses in Elastic Foundations. University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin 338.
6. Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G. (1996) Soil Mechanics in Engineering Practice. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

VJEŽBA BR. 5

Stišljivost tla i jednodimenzionalna konsolidacija - edometarski opit

5.1 Stišljivost tla

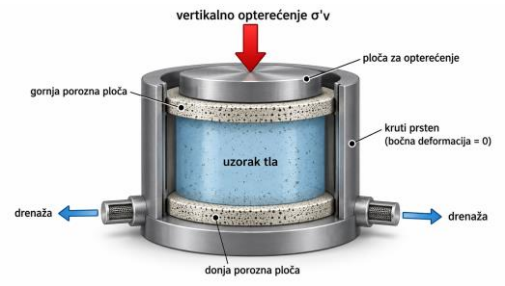
Stišljivost tla je sposobnost tla da smanji zapreminu usljed povećanja efektivnih napona. Kod zasićenih sitnozrnih tala neposredno nakon nanošenja opterećenja dio priraštaja totalnog napona preuzima porna voda. Sa vremenom se višak pornog pritiska disipira, efektivni napon raste, voda izlazi iz pora i nastaje zapreminska deformacija, odnosno slijeganje. Zbog toga su za projektovanje važne i veličina konačnog slijeganja i brzina kojom se ono razvija [Kostić, Vasović i Kuzmanović, 2023; Knappett i Craig, 2020].

Kod dobro propusnih pijeskova i šljunkova dreniranje je brzo, pa se zapreminske promjene uglavnom razvijaju u kratkom vremenu. Kod glina i prašinastih glina proces može trajati znatno duže. Edometarski opit zato omogućava da se u laboratoriji odrede parametri stišljivosti i jednodimenzionalne konsolidacije koji se koriste za procjenu slijeganja slojeva tla.

Savremena osnova za laboratorijski opit sa stepenastim opterećenjem je SRPS EN ISO 17892-5:2017. Standard propisuje cilindričan uzorak sa spriječenim bočnim širenjem, stepenasto vertikalno opterećenje ili rasterećenje i aksijalno dreniranje. Stara JUS terminologija i jedinice kp/cm² zadržavaju istorijski značaj, ali se u ovoj vježbi proračun vodi u SI jedinicama, prvenstveno kPa, mm i m²/s.

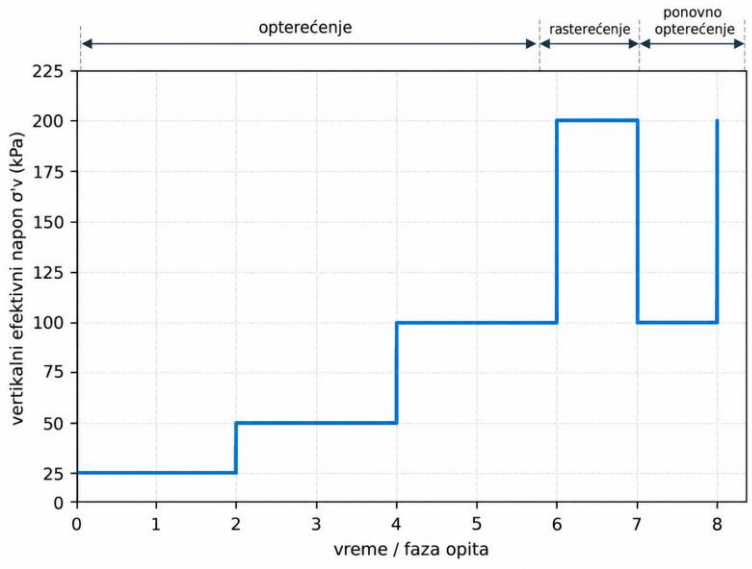
5.1.1 Edometar i princip opita

Uzorak tla nalazi se u krutom metalnom prstenu između dvije porozne ploče. Prsten sprječava bočno širenje, tako da je deformacija praktično jednodimenzionalna. Vertikalno opterećenje prenosi se preko gornje ploče, a promjena visine uzorka mjeri se komparaterom ili drugim uređajem za mjerenje pomjeranja. Ako je drenaža omogućena sa obje strane uzorka, najduži put dreniranja je približno polovina visine uzorka.



Slika 5.1. Šematski prikaz edometarskog opita sa dvostranom drenažom. Autorska nastavna šema.

Opterećenje se nanosi u stepenima. Uobičajeno je da se svaki sljedeći nivo napona bira tako da omogući jasno praćenje kompresione krive i vremenskog razvoja deformacije. Za odabrane stepene bilježe se očitavanja u više vremenskih trenutaka, od prvih sekundi/minuta do završetka primarne konsolidacije. Poslije dostizanja maksimalnog napona može se sprovesti rasterećenje i ponovno opterećenje radi ocjene prekonsolidacije i povratnih deformacija.



Slika 5.2. Šematski tok stepenastog opterećenja, rasterećenja i ponovnog opterećenja.

5.1.2 Osnovne veličine i obrada rezultata

Ako je početna visina uzorka H_0, a ukupno vertikalno slijeganje pri posmatranom nivou napona *Δh*, jednodimenzionalna relativna deformacija je:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta h}{H_o}.$$

Za interval efektivnih napona $\Delta\sigma'_v = \sigma'_{v,2} - \sigma'_{v,1}$ definiše se edometarski, odnosno ograničeni modul stišljivosti M :

$$M = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon_v}.$$

Veća vrijednost M znači manju stišljivost. U proračunima se često koristi i koeficijent zapreminske stišljivosti m_v :

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\sigma'_v} = \frac{1}{M}.$$

Promjena koeficijenta poroznosti e može se povezati sa promjenom visine uzorka. Ako je početni koeficijent poroznosti e_o, a zapremina čvrstih čestica se smatra konstantnom:

$$e = \frac{e_o - (1+e_o)\cdot \Delta h}{H_o}.$$

Koeficijent stišljivosti a_v za izabrani interval napona može se izraziti kao:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma_v'}.$$

Za isti interval važi veza $m_v = \frac{a_v}{1+e_1}$, gdje je e_1 koeficijent poroznosti na početku razmatranog intervala. Parametri M, m_v i a_v nisu univerzalne konstante tla: zavise od nivoa napona, putanje opterećenja, strukture uzorka i kvaliteta uzorkovanja.

5.2 Jednodimenzionalna konsolidacija

Terzagijeva jednodimenzionalna teorija konsolidacije opisuje disipaciju viška pornog pritiska i razvoj slijeganja u vremenu pod pretpostavkom zasićenog tla, malih deformacija, jednodimenzionalnog tečenja i konstantnih parametara u posmatranom intervalu. Za nastavne proračune osnovna veza između vremena t, koeficijenta konsolidacije c_v i dužine drenažnog puta H_{dr} glasi:

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H_{dr}^2}.$$

T_v je bezdimenzioni vremenski faktor. Za dvostranu drenažu $H_{dr} \approx H/2$, dok je kod jednostrane drenaže $H_{dr} \approx H$. Prosječni stepen konsolidacije U povezan je sa T_v. Za praktične proračune korisne su karakteristične vrijednosti:

Prosječni stepen konsolidacije U	**Vremenski faktor** T_v
50 %	0,197
90 %	0,848

Kada je c_v poznat, vrijeme potrebno za zadati stepen konsolidacije računa se kao $t = \frac{T_v \cdot H_{dr}^2}{cv}$.

Obrnuto, iz laboratorijskog vremena t_{50} ili t_{90} određuje se c_v.

5.2.1 Logaritamska metoda - Kasagrande

Kod logaritamske metode deformacija se prikazuje u funkciji logaritma vremena. Korigovana početna deformacija određuje se sa početnog približno paraboličnog dijela krive, a deformacija pri 100 % primarne konsolidacije iz presjeka karakterističnih pravaca završnog dijela krive. Sredina između deformacija za 0 % i 100 % primarne konsolidacije daje tačku za U = 50 % i odgovarajuće vrijeme t_{50}. Zatim se računa:

$$c_v = \frac{0{,}197 \cdot H_{dr}^2}{t_{50}}.$$

U laboratorijskom izvještaju treba navesti kako je određeno t_{50}, koji je usvojen drenažni put i koje su jedinice korišćene. Ako je H_{dr} u metrima, a t_{50} u sekundama, c_v se dobija u m²/s.

5.2.2 Metoda kvadratnog korijena vremena - Tejlor

Kod Tejlorove metode deformacija se prikazuje u funkciji $\sqrt{t}$. Početni dio krive aproksimira se pravom. Konstrukcijom linije čija je apscisa 1,15 puta veća od odgovarajuće apscise početne prave dobija se presječna tačka koja odgovara približno U = 90 %. Iz vremena t_{90} računa se:

$$c_v = \frac{0{,}848 \cdot H_{dr}^2}{t_{90}}.$$

Metode Kasagrandea i Tejlora mogu dati nešto različite vrijednosti c_v, naročito kada su početne deformacije, sekundarna kompresija ili neidealna drenaža izražene. Zato rezultat treba posmatrati kao parametar vezan za konkretan uzorak i nivo napona.

5.3 Kompresiona kriva i napon prekonsolidacije

Rezultati stepenastog opterećenja najčešće se prikazuju kao $e - \log \sigma_v'$ dijagram. Pri manjim naponima prirodno tlo može pokazivati manju stišljivost, dok poslije prelaska preko najvećeg efektivnog napona koji je tlo pretrpjelo u prošlosti, nagib kompresione krive postaje veći. Taj karakteristični napon naziva se naponom prekonsolidacije σ_p'.

U nastavnoj vježbi σ_p' se određuje Kasagrandeovom grafičkom konstrukcijom: na mjestu najveće zakrivljenosti povlače se horizontala i tangenta, zatim simetrala ugla, a linearni dio krive normalne konsolidacije produžava se do presjeka sa simetralom. Apscisa presjeka daje približnu vrijednost σ_p'. Rezultat je osjetljiv na kvalitet uzorka i izbor tačke najveće zakrivljenosti, pa ga treba prikazati kao grafičku procjenu, a ne kao apsolutno tačnu granicu.

Za pravolinijski dio $e - \log \sigma_v'$ krive mogu se definisati indeks kompresije C_c i indeks rekompresije C_r:

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \log 10 \cdot \sigma_v'}, \; C_r = \frac{-\Delta e}{\Delta \log 10 \sigma_v'}.$$

Pri tome se C_c određuje na dijelu normalne konsolidacije, a C_r na rasterećenju ili rekompresiji. Ti indeksi se koriste u klasičnim proračunima slijeganja, ali njihova primjena zahitjeva pravilno određen početni efektivni napon i istoriju naprezanja.

Porijeklo stišljivosti i uloga skeleta tla

Stišljivost tla predstavlja promjenu zapremine pod promjenom efektivnog napona. U zasićenom tlu čvrste mineralne čestice i voda su pojedinačno relativno malo stišljive u odnosu na porni prostor, pa najveći dio deformacije nastaje preuređivanjem skeleta i smanjenjem zapremine pora. Kod krupnozrnih tala taj proces je često brz jer se voda lako drenira, dok kod glina mala propustljivost uvodi vremensku komponentu. Zato je za sitnozrna zasićena tla potrebno razlikovati veličinu konačnog slijeganja od brzine kojom se ono razvija.

Edometarski opit ograničava bočnu deformaciju uzorka i omogućava jednodimenzionalno vertikalno sabijanje. Takav uslov predstavlja idealizaciju širokog sloja tla ispod velikog opterećenja, gdje su horizontalne deformacije ograničene okolnim tlom. Mjerenjem promjene visine pri sukcesivnim nivoima vertikalnog napona dobija se veza deformacije ili koeficijenta poroznosti sa efektivnim naponom. Ova kriva je osnova za određivanje kompresionih parametara i procjenu slijeganja.

Deformacija nije nužno potpuno povratna. Pri prvom opterećenju iznad prethodno dostignutog maksimalnog efektivnog napona dolazi do značajnog strukturnog preuređivanja i trajnog smanjenja pora. Pri rasterećenju i ponovnom opterećenju u nižem naponskom području kriva je blaža. Ova razlika između primarnog opterećenja i rasterećenja odražava istoriju naprezanja

tla. Zato poznavanje samo trenutnog napona nije dovoljno: treba znati da li je tlo normalno konsolidovano ili je u prošlosti bilo opterećeno većim naponom.

Kompresiona kriva, napon prekonsolidacije i OCR

Na dijagramu $e - \log \sigma_v'$ često se uočavaju dva režima. Ispod napona prekonsolidacije promjena koeficijenta poroznosti je relativno mala i opisuje se indeksom rekompresije, odnosno bubrenja. Kada efektivni napon pređe približno najveći ranije doživljeni napon, kriva postaje strmija i ulazi u područje primarne odnosno virgin kompresije, opisano indeksom kompresije C_c. Tačka prelaza nije uvijek oštra, pa određivanje napona prekonsolidacije ima određenu interpretativnu nesigurnost.

Odnos prekonsolidacije OCR definiše se kao odnos napona prekonsolidacije i trenutnog efektivnog vertikalnog napona. OCR približno jednak 1 odgovara normalno konsolidovanom stanju, dok OCR veći od 1 ukazuje na prekonsolidaciju. Uzroci mogu biti prethodno veće geološko opterećenje, erozija, sniženje nivoa podzemne vode, desikacija ili drugi procesi koji su povećali efektivni napon ili strukturalnu čvrstoću. Zbog toga prekonsolidacija nije samo laboratorijska oznaka, već zapis geološke istorije tla.

Praktičan značaj OCR-a je veliki jer snažno utiče na slijeganje. Ako novo projektno opterećenje ostane ispod napona prekonsolidacije, deformacije mogu biti relativno male. Ako ga premaši, aktivira se znatno stišljiviji dio krive i slijeganje se povećava. Zato mala greška u procjeni prekonsolidacionog napona može imati velik efekat kada je projektno stanje blizu te granice. U važnim projektima laboratorijska procjena se poredi sa geološkim podacima, in situ testovima i opaženim ponašanjem sličnih slojeva.

Jednodimenzionalna konsolidacija i koeficijent C_v

Terzagijeva teorija jednodimenzionalne konsolidacije opisuje disipaciju viška pornog pritiska iz zasićenog, slabo propustljivog sloja nakon porasta ukupnog napona. U trenutku brzog opterećenja voda privremeno preuzima veliki dio dodatnog napona. Kako voda otiče kroz drenažne granice, višak pornog pritiska opada, a efektivni napon u skeletu raste. Taj porast efektivnog napona uzrokuje postepeno sabijanje i slijeganje. Teorija tako povezuje hidraulički proces strujanja sa mehaničkom deformacijom tla.

Brzina konsolidacije zavisi od koeficijenta konsolidacije C_v i kvadrata drenažnog puta. To znači da udvostručenje drenažnog puta približno učetvorostručuje karakteristično vrijeme za isti stepen konsolidacije. Sloj koji drenira na obje strane ima efektivno kraći put od sloja koji drenira samo na jednoj strani. Ova geometrijska činjenica je jednako važna kao i laboratorijska vrijednost C_v. Pogrešan izbor drenažnih granica može dati ozbiljno pogrešnu procjenu vremena slijeganja čak i kada je C_v tačno određen.

Kasagrandeova i Tejlorova metoda koriste različite transformacije eksperimentalne krive vrijeme-deformacija kako bi se procijenio karakteristični tok primarne konsolidacije. Rezultati mogu odstupati jer realno tlo ne ispunjava potpuno pretpostavke idealne teorije: C_v može zavisiti od napona, uzorak može imati poremećenu strukturu, a sekundarne deformacije počinju prije potpunog završetka primarne konsolidacije. Zato vrijednost C_v treba navoditi zajedno sa naponskim intervalom i metodom određivanja, a ne kao jednu nepromjenljivu konstantu tla.

Sekundarna kompresija, puzanje i dugotrajne deformacije

Nakon što se najveći dio viška pornog pritiska disipira, deformacije mogu da se nastave i pri približno konstantnom efektivnom naponskom stanju. Taj proces se naziva sekundarna kompresija ili puzanje. Posebno je izražen u organskim tlima, tresetu i nekim mekim glinama. Mehanizam obuhvata postepeno preuređivanje čestica, viskozne procese u kontaktima i promjene mikrostrukture. Zbog toga kraj primarne konsolidacije ne znači nužno i kraj slijeganja tokom vijeka objekta.

Sekundarna kompresija se često opisuje približno linearnim odnosom deformacije ili koeficijenta poroznosti prema logaritmu vremena. Koeficijent sekundarne kompresije određuje se iz kasnijeg dijela edometarske krive. Kao i drugi indeksni parametri, zavisi od naponskog nivoa, strukture i vrste tla. Kod jako organskih materijala dugotrajni dio može biti dominantan, dok je kod mnogih mineralnih glina manji, ali i dalje značajan za objekte sa strogim zahtjevima u pogledu ukupnog i diferencijalnog slijeganja.

Dugotrajno ponašanje pokazuje zašto nije dovoljno procijeniti samo završno slijeganje primarne konsolidacije. Projektant mora povezati vremensku skalu opterećenja, faze gradnje i očekivani vijek konstrukcije. Predopterećenje i vertikalni drenovi mogu ubrzati primarnu konsolidaciju, ali ne eliminišu nužno sve kasnije viskozne deformacije. Kod osjetljivih

objekata korisno je planirati monitoring slijeganja i pornih pritisaka kako bi se stvarni tok deformacija uporedio sa prognozom i po potrebi prilagodile naredne faze gradnje.

Od laboratorijskog edometra do prognoze slijeganja u terenu

Primjena edometarskih rezultata na teren zahtijeva pažnju prema reprezentativnosti uzorka. Vađenje, transport i priprema mogu rasteretiti i poremetiti osjetljivu strukturu gline, pa laboratorijska kriva može pokazati veću stišljivost nego neporemećeni sloj. S druge strane, mali uzorak ne obuhvata makrostrukture, tanke pjeskovite proslojke ili pukotine koje u terenu mogu ubrzati drenažu. Zato se laboratorijski parametri uvijek tumače uz geološki profil i podatke sa terenskih ispitivanja.

Procjena slijeganja obično se izvodi po slojevima. Za svaki sloj određuju se početni efektivni napon, dopunski napon od konstrukcije, naponska istorija i odgovarajući dio kompresione krive. Posebnu pažnju zahtijeva prelazak preko napona prekonsolidacije, jer se tada mijenja nagib veze e-log σ'. U praksi je često važnije pravilno podijeliti profil i izabrati realne parametre nego povećavati broj decimala u završnom proračunu. Geotehnički model treba da predstavlja bitne razlike između slojeva, a ne samo matematičku finoću.

Konačna prognoza treba da sadrži i procjenu nesigurnosti. Debljina stišljivog sloja, nivo podzemne vode, stvarno opterećenje, C_c, C_r, C_v i prekonsolidacioni napon svi mogu varirati. Umjesto jednog apsolutnog broja korisno je razmotriti realan raspon slijeganja i vremena. Monitoring tokom građenja tada dobija jasnu ulogu: mjerena slijeganja i porni pritisci služe za provjeru pretpostavki. Takav spoj laboratorije, proračuna i opažanja predstavlja najpouzdaniji način upravljanja konsolidacionim rizikom.

5.4 Osnovni podaci

Za nastavnu obradu koristi se uzorak gline.

Tabela 5.1. Vremenski razvoj deformacije za dva stepena opterećenja

t (min) σ_v' **= 100 kPa**	**Δh (mm)**	**t (min)** σ_v' **= 200 kPa**	**Δh (mm)**
0	0	0	0
0,1	0,25	0,1	1,00
0,25	0,28	0,25	1,02
0,5	0,32	0,5	1,04

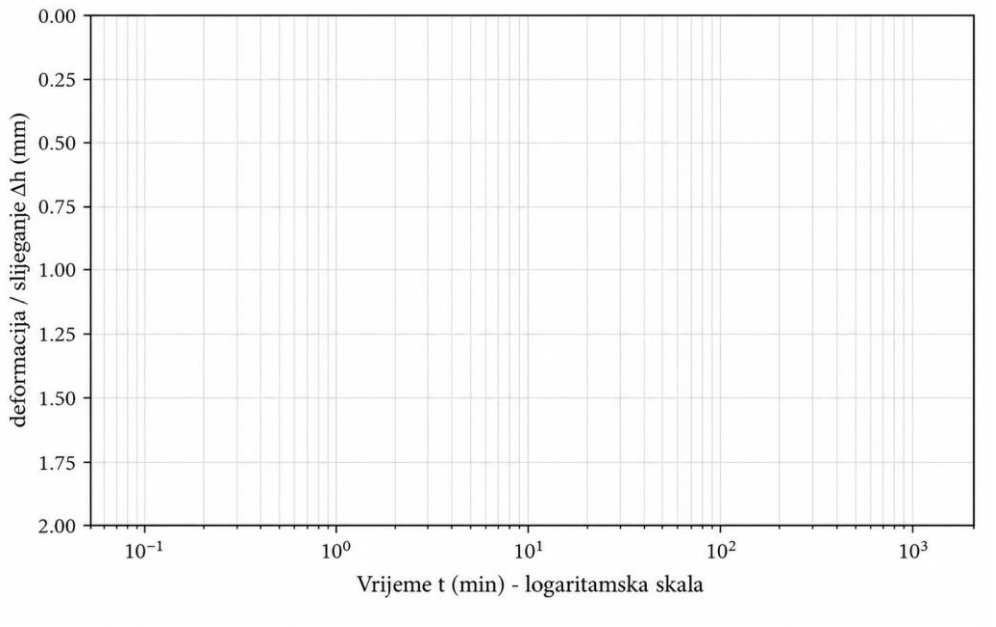
t (min) σ_v' **= 100 kPa**	**Δh (mm)**	**t (min)** σ_v' **= 200 kPa**	**Δh (mm)**
1	0,40	1	1,08
2	0,55	2	1,28
4	0,80	4	1,55
8	1,05	8	1,58
15	1,18	15	1,72
30	1,22	30	1,74
60	1,30	60	1,80
120	1,35	120	1,81
256	1,38	256	1,82
420	1,40	420	1,84
1417	1,41	1417	1,86

Tabela 5.2. Podaci za kompresionu, rasterećujuću i ponovnu opterećujuću putanju

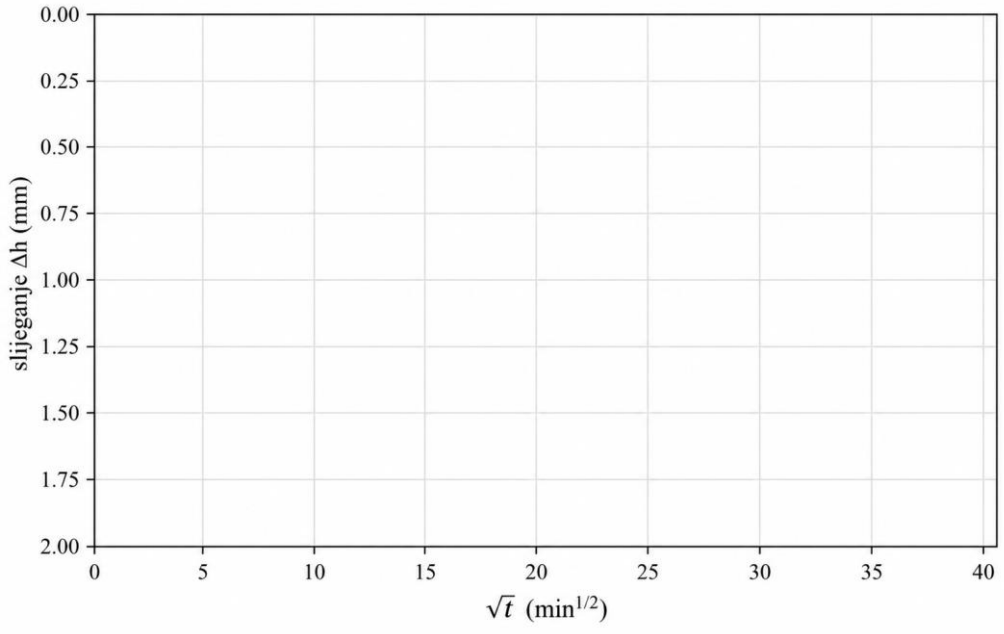
σ_v' **(kPa)**	**Δh (mm)**	ε_v **= Δh/H0**	**e**	**H (mm)**	$H_{dr} = H/2$ **(mm)**
0	0,000	0,0000	0,785	25,00	12,50
25	0,290	0,0116	0,764	24,71	12,36
50	0,560	0,0224	0,745	24,44	12,22
100	0,948	0,0379	0,717	24,05	12,03
200	1,490	0,0596	0,679	23,51	11,76
400	2,200	0,0880	0,628	22,80	11,40
800	2,870	0,1148	0,580	22,13	11,06
1600	3,580	0,1432	0,529	21,42	10,71
800	3,560	0,1424	0,531	21,44	10,72
400	3,480	0,1392	0,537	21,52	10,76
200	3,370	0,1348	0,544	21,63	10,81
100	3,230	0,1292	0,554	21,77	10,88
200	3,240	0,1296	0,554	21,76	10,88
400	3,290	0,1316	0,550	21,71	10,86
800	3,450	0,1380	0,539	21,55	10,78
1600	3,710	0,1484	0,520	21,29	10,64

5.5 Radni dijagrami

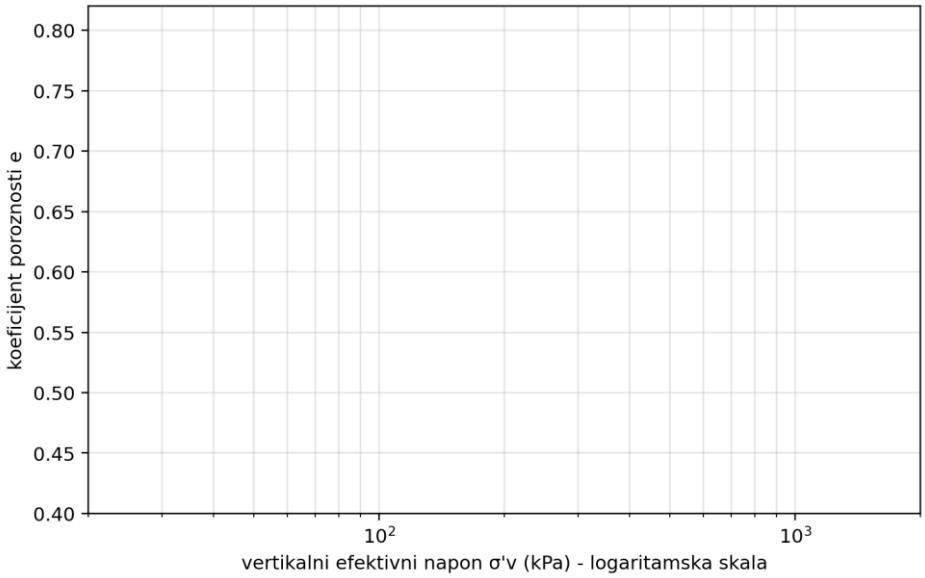
Sljedeći dijagrami namijenjeni su za grafičku obradu podataka. Na prva dva dijagrama student unosi vremenski razvoj deformacije iz Tabele 5.1, a na trećem rezultate iz Tabele 5.2. Po potrebi se za svaki stepen napona koristi poseban grafički prikaz.



Slika 5.3. Radni dijagram Δh - log t za određivanje t_{50} Kasagrandeovom metodom.



Slika 5.4. Radni dijagram Δh - $\sqrt{t}$ za određivanje t_{90} Tejlorovom metodom.



Slika 5.5. Radni dijagram e - log σ_v' za kompresionu putanju i procjenu napona prekonsolidacije.

5.6 Zadatak

- Na osnovu Tabele 5.1 nacrtati dijagrame $\Delta h - \log t$ za napone 100 kPa i 200 kPa. Za svaki dijagram grafički odrediti t_{50} Kasagrandeovom metodom i izračunati C_v.
- Za iste podatke nacrtati dijagrame $\Delta h - \sqrt{t}$, odrediti t_{90} Tejlorovom metodom i izračunati C_v. Uporediti rezultate dobijene dvjema metodama.
- Za proračun C_v koristiti odgovarajuću prosječnu visinu uzorka u posmatranom intervalu i dvostranu drenažu, $H_{dr} \approx \frac{H_{sr}}{2}$. Sve rezultate izraziti u m²/s i, po želji, u mm²/s.
- Na osnovu Tabele 5.2 nacrtati dijagrame $\varepsilon_v - \sigma_v'$ i $e - \log \sigma_v'$ za opterećenje, rasterećenje i ponovno opterećenje.
- Za najmanje tri karakteristična intervala napona izračunati modul stišljivosti M, koeficijent stišljivosti a_v i koeficijent zapreminske stišljivosti a_v. Provjeriti približnu vezu $M \approx \frac{1}{m_v}$.
- Kasagrandeovom konstrukcijom na $e - \log \sigma_v'$ dijagramu procijeniti napon prekonsolidacije σ_p' i komentarisati da li uzorak pokazuje normalno konsolidovano ili prekonsolidovano ponašanje u posmatranom rasponu napona.

- U zaključku navesti od kojih faktora zavise M, m_v, c_v i σ_p', i objasniti zašto laboratorijski rezultat ne treba bez provjere direktno prenijeti na cijelu geološku sredinu.

5.7 Riješeni primjer

Sljedeći primjer je ilustrativan i koristi drugi skup podataka od zadatka iz Tabela 5.1 i 5.2. Cilj je da student vidi tok od vremenske krive do koeficijenta konsolidacije, a zatim obradu kompresione krive i modula stišljivosti.

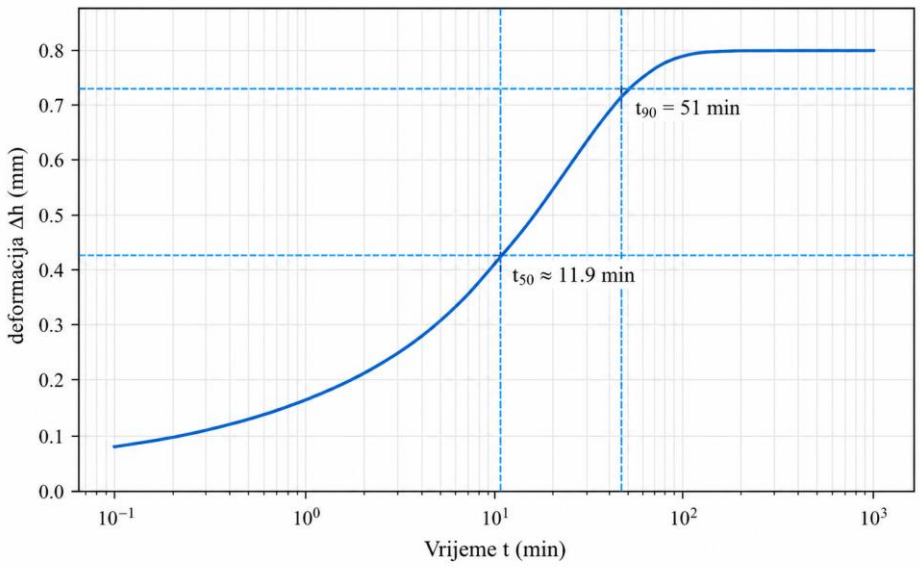
Korak 1 - koeficijent konsolidacije iz t_{50} i t_{90}

Za jedan stepen opterećenja prosječna visina uzorka u posmatranom intervalu iznosi približno 19,4 mm. Pošto je drenaža dvostrana, $H_{dr} = 19{,}4/2 = 9{,}7\ \text{mm} = 0{,}0097\ \text{m}$. Sa grafički obrađene vremenske krive očitano je $t_{50} \approx 11{,}9\ \text{min}$ i $t_{90} \approx 51\ \text{min}$.

$$C_{v,50} = \frac{0{,}197 \cdot (0{,}0097)^2}{(11{,}9 \cdot 60)} \approx 2{,}6 \cdot 10^{-8} m^2 / s$$

$$C_{v,90} = \frac{0{,}848 \cdot (0{,}0097)^2}{(51 \cdot 60)} \approx 2{,}6 \cdot 10^{-8} m^2 / s.$$

Dvije metode u ovom idealizovanom primjeru daju praktično istu vrijednost. U realnom opitu razlika može biti veća zbog početnog nalijeganja, sekundarne kompresije, neidealnog uzorka ili nejasnog prelaza između primarne i sekundarne konsolidacije.



Slika 5.6. Riješeni primjer - vremenska kriva sa karakterističnim vremenima t_{50} i t_{90}.

Korak 2 - modul stišljivosti, a_v i m_v

Na kompresionoj krivi za interval 200-400 kPa usvojeno je e_{200} = 0.819 i e_{400} = 0.744. Promjena koeficijenta poroznosti je Δe = 0.075.

$$a_v = \frac{0,075}{200} \approx 3,74e-04 kPa^{-1}$$

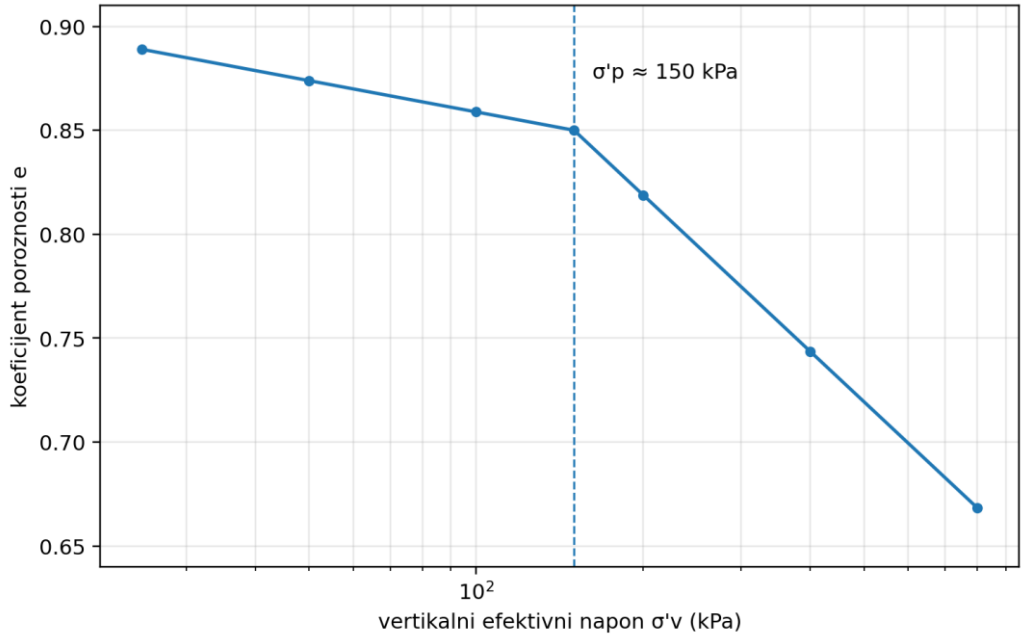
$$m_v = \frac{a_v}{(1+e_{200})} \approx 2,07e-04\ kPa^{-1}$$

$$M = \frac{1}{m_v} \approx 4,83 MPa.$$

Ako bi se isti m_v koristio za približnu procjenu jednodimenzionalnog slijeganja sloja debljine 4,0 m pri dodatnom naponu 100 kPa, dobilo bi se $s \approx 0,083$ m (83 mm). U stvarnom profilu napon i parametri se mijenjaju sa dubinom, pa je ovaj proračun samo ilustrativan.

Korak 3 - $e - \log \sigma_v'$ dijagram i napon prekonsolidacije

Za ilustrativni uzorak podaci su formirani tako da se blaži nagib pri manjim naponima mijenja u izraženiji nagib normalne kompresije. Kasagrandeova konstrukcija na dijagramu daje približno $\sigma_p' \approx 150$ kPa.



Slika 5.7. Riješeni primjer - kompresiona kriva $e - \log \sigma_v'$ i približna vrijednost napona prekonsolidacije.

Zaključak: vremenski tok slijeganja daje C_v , dok kompresiona kriva daje parametre deformabilnosti i podatak o istoriji naprezanja. M i m_v zavise od intervala napona, a C_v može da se mijenja sa naponom i strukturom tla. Zbog toga se u projektovanju uvijek navode nivo napona, metoda obrade i uslovi dreniranja uz koje je parametar određen.

Literatura:

1. ASTM International (2025) ASTM D2435/D2435M-25: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. Das, B. M., Sobhan, K. (2018) Principles of Geotechnical Engineering. 9th ed. Cengage Learning, Boston.
3. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.
4. Knappett, J. A., Craig, R. F. (2020) Craig's Soil Mechanics. 9th ed. CRC Press, Boca Raton.
5. Maksimović, M. (2008) Mehanika tla. AGM knjiga, Beograd.
6. SRPS EN ISO 17892-5:2017 Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - Deo 5: Edometarsko ispitivanje stepenastim opterećenjem.

VJEŽBA BR. 6

Smičuća čvrstoća tla - direktno smicanje, triaksijalni CU i jednoaksijalni opit

6.1 Smičuća čvrstoća tla

Smičuća čvrstoća je najveći smičući napon koji tlo može da prenese pri datom normalnom naponu i uslovima dreniranja. Ona je ključna za procjenu nosivosti temelja, stabilnosti kosina i nasipa, pritisaka na potporne konstrukcije i ponašanja tla oko podzemnih objekata. U laboratoriji se smičuća čvrstoća određuje različitim opitima, među kojima su direktno smicanje, triaksijalna kompresija i jednoaksijalna kompresija [Kostić, Vasović i Kuzmanović, 2023; Maksimović, 2008].

Za veliki broj inžinjerskih proračuna čvrstoća se u ograničenom rasponu napona opisuje Mohr-Kulonovim kriterijumom:

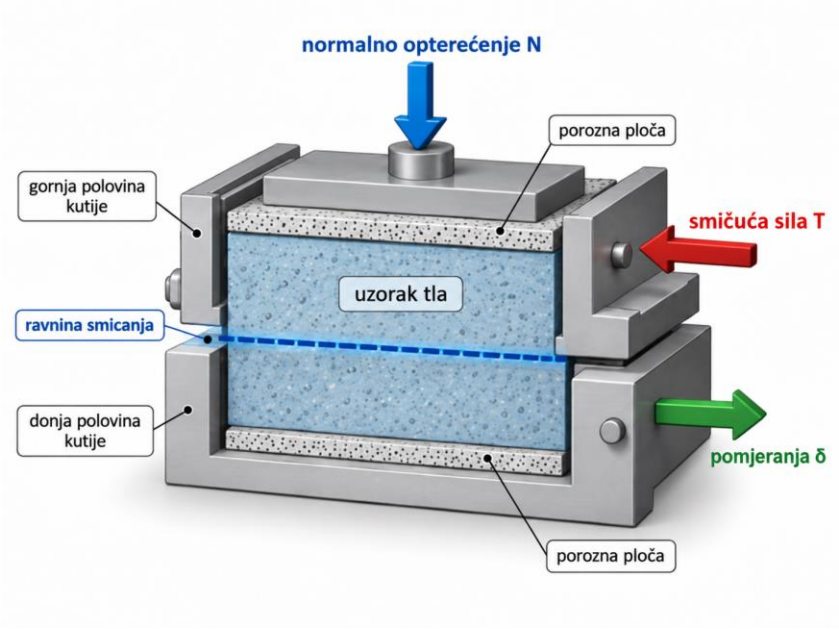
$$\tau_F = \sigma' + \sigma'_n \cdot \tan\varphi'$$

gdje su τ_f smičuća čvrstoća, σ_n' efektivni normalni napon u ravni loma, c' efektivna kohezija i φ' efektivni ugao smičuće otpornosti. Kada se analiza vodi totalnim naponima, koriste se odgovarajući totalni parametri C i φ. Zbog toga uz svaki rezultat mora biti jasno navedeno da li se odnosi na efektivne ili totalne napone i kakvi su bili uslovi dreniranja.

Važno je razlikovati vršnu i rezidualnu čvrstoću. Vršna čvrstoća odgovara najvećem otporu pri prvom smicanju, dok se rezidualna čvrstoća razvija pri velikim pomjeranjima nakon reorijentacije čestica duž već formirane ravni smicanja. Ova razlika je naročito značajna kod prekompaktnih i glinovitih tala.

6.2 Opit direktnog smicanja

Kod direktnog smicanja uzorak se nalazi u dvodjelnoj kutiji. Najprije se primjeni izabrani normalni napon, a zatim se jedna polovina kutije pomjera u odnosu na drugu, čime se smicanje prisilno razvija duž unaprijed određene horizontalne ravni. Mjere se horizontalna sila i pomjeranje, a po mogućnosti i vertikalna deformacija. Kompletna serija obično obuhvata najmanje tri uzorka ispitana pri različitim normalnim naponima.



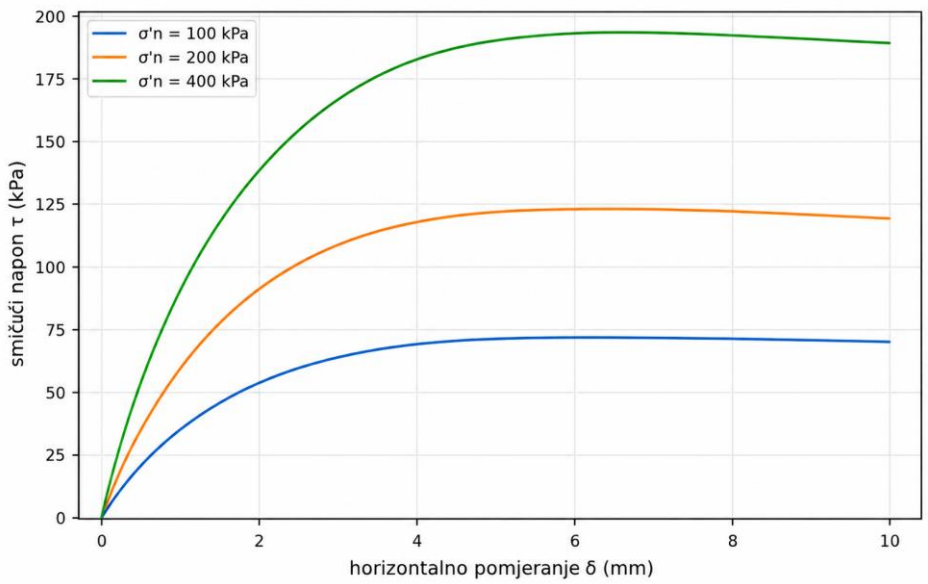
Slika 6.1. Šematski prikaz aparata i principa opita direktnog smicanja. Autorska nastavna šema.

Savremena laboratorijska osnova za direktno smicanje je SRPS EN ISO 17892-10. U standardnom dreniranom postupku brzina smicanja mora biti dovoljno mala da se tokom smicanja ne razvijaju značajni porni pritisci. Zbog toga brzina zavisi od propustljivosti i konsolidacionih osobina tla. Stara podjela na D, R i U opite zadržava didaktički značaj, ali se kod nedreniranog direktnog smicanja mora biti oprezan: porni pritisak se u klasičnoj kutiji ne mjeri, pa efektivni naponi nisu direktno poznati.

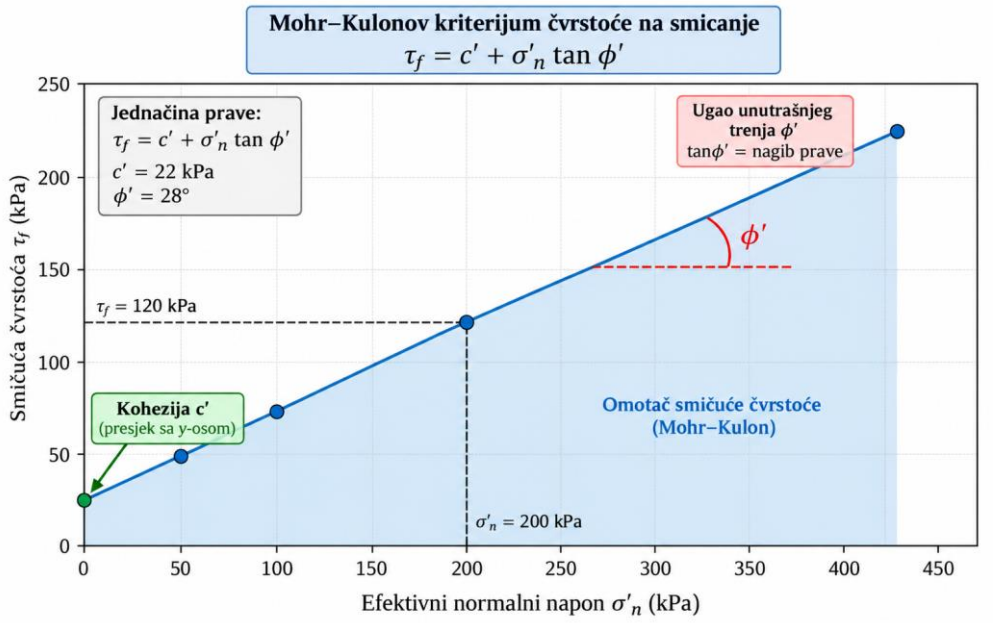
6.2.1 Vršna i rezidualna čvrstoća

Za svaki normalni napon iz krive $\tau - \delta$ određuje se vršna vrijednost τ_f. Kod tla koje pokazuje omekšavanje nakon vrha, pri velikom pomjeranju može se odrediti i približna rezidualna vrijednost τ_r. Vršne tačke iz više opita nanose se na dijagram $\tau_f - \sigma_n'$ i aproksimiraju linearnom anvelopom. Analogno se može formirati rezidualna anvelopa:

$$\tau_f = c' + \sigma_n' \cdot \tan\varphi' \;;\; \tau_r = c'_r + \sigma'_n \cdot \tan\varphi_r'$$



Slika 6.2. Tipičan oblik krivih smičući napon - horizontalno pomjeranje za različite normalne napone.



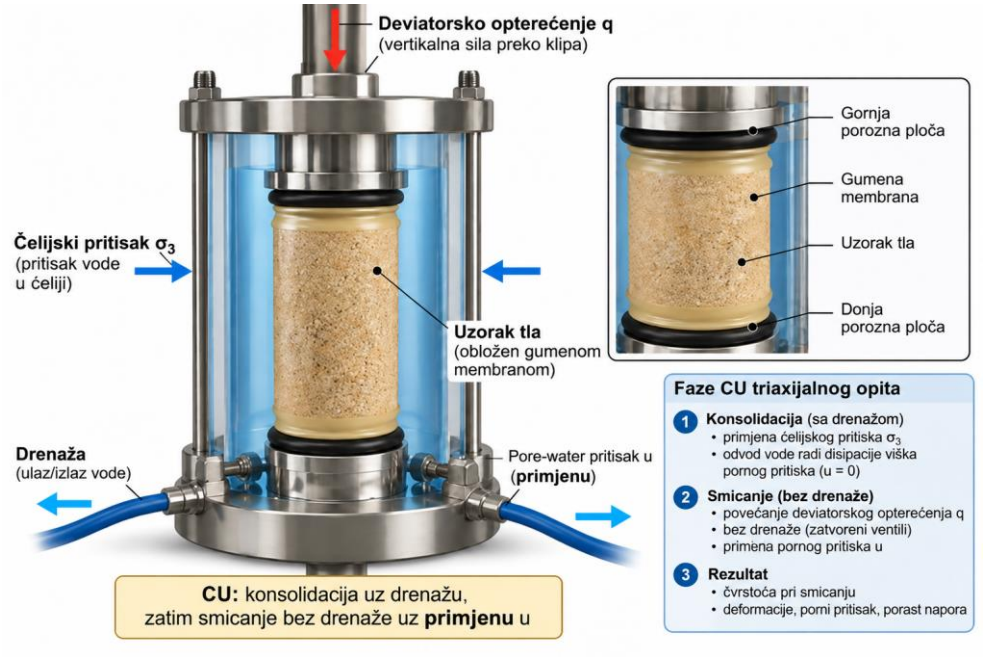
Slika 6.3. Formiranje Mohr-Kulonove anvelope iz rezultata serije direktnih smicanja.

Ograničenje direktnog smicanja je što je ravnina loma unaprijed zadana geometrijom kutije, a raspodjela napona u uzorku nije savršeno uniformna. Uprkos tome, opit je veoma koristan za pjeskove, kontaktne površine i za praktičnu procjenu vršne i rezidualne smičuće čvrstoće.

6.3 Triaksijalni CU opit

Triaksijalni opit omogućava znatno kontrolisanije naponsko stanje. Kod konsolidovano-nedreniranog (CU) opita uzorak se prvo konsoliduje pod ćelijskim pritiskom uz omogućenu

drenažu, a zatim se smiče bez drenaže. Ako se tokom smicanja mjeri porni pritisak u, iz istog opita mogu se odrediti i totalni i efektivni parametri čvrstoće.



Slika 6.4. Šematski prikaz triaksijalnog CU opita sa mjerenjem pornog pritiska. Autorska nastavna šema.

U konvencionalnoj triaksijalnoj kompresiji ćelijski pritisak je manji glavni napon σ_3, dok je devijator napona $q = \sigma_1 - \sigma_3$. Na lomu se zato računa:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + q$$

Ako je izmjeren porni pritisak u, efektivni glavni naponi su:

$$\sigma_1' = \sigma_1 - u \;\; ; \;\; \sigma_3' = \sigma_3 - u$$

Za Mohr-Kulonov kriterijum triaksijalne kompresije korisna je linearna veza između glavnih napona pri lomu:

$$\sigma_1 = N_\varphi \cdot \sigma_3 + 2 \cdot c\sqrt{N_\varphi} \; ; \;\; N_\varphi = \frac{(1+\sin\varphi)}{(1-\sin\varphi)}$$

Ista jednačina primjenjuje se na efektivne napone za određivanje c' i φ'. Parametri se mogu odrediti grafički pomoću Morovih krugova ili analitički regresijom σ_1 prema σ_3. Kod CU opita razlika između totalnih i efektivnih parametara neposredno odražava uticaj razvijenih pornih pritisaka.

6.3.1 Napon u ravni loma

Kada su poznati σ_1 i σ_3, normalni i smičući napon na ravni čija normala zaklapa ugao θ sa pravcem σ_1 mogu se odrediti transformacijom napona:

$$\sigma_n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \cos 2\theta,$$

$$\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cdot \sin 2\theta.$$

Za idealizovani Mohr-Kulonov lom položaj ravni loma povezan je sa uglom smičuće otpornosti. U grafičkoj obradi odgovarajuća tačka je tačka dodira Morovog kruga i anvelope čvrstoće. Time se izbjegava zabuna oko toga da li se ugao mjeri prema ravni ili prema njenoj normali.

6.4 Jednoaksijalni opit

Kod jednoaksijalne kompresije uzorak se opterećuje aksijalno bez bočnog pritiska, tako da je $\sigma_3 = 0$. Maksimalni aksijalni napon prije loma predstavlja jednoaksijalnu čvrstoću na pritisak q_u. U mehanici tla opit se najčešće primjenjuje na koherentna tla koja mogu samostalno da stoje bez bočne potpore.



Slika 6.5. Princip jednoaksijalnog opita i idealizovana ravnina loma.

Za zasićenu glinu pri nedreniranoj interpretaciji često se uzima $\varphi_u = 0$, pa je nedrenirana smičuća čvrstoća približno:

$$s_u \approx \frac{q_u}{2}.$$

Ako se mjeri aksijalna i poprečna deformacija, može se procijeniti deformabilnost. Da bi rezultat bio jednoznačan, u ovoj vježbi koristi se sekantni modul E_{50}, definisan preko napona $0,5q_u$ i odgovarajuće aksijalne deformacije ε_{50}:

$$E_{50} = \frac{0,5q_u}{\varepsilon_{50}}.$$

Poasonov koeficijent se procjenjuje iz odnosa poprečne i aksijalne deformacije u istom nivou napona, pri čemu se koristi odnos njihovih apsolutnih vrijednosti:

$$\nu \approx \frac{|\varepsilon_3|}{|\varepsilon_1|}.$$

Ugao vidljive ravni loma može se dodatno komentarisati. Relacija $\alpha \approx 45^o + \frac{\varphi}{2}$ predstavlja idealizovani Mohr-Kulonov odnos i nije zamjena za direktno određivanje efektivnog ugla smičuće otpornosti, posebno kod nedreniranog jednoaksijalnog opita.

Fizičko porijeklo smičuće čvrstoće tla

Smičuća čvrstoća tla nastaje iz otpora koji se razvija pri relativnom pomjeranju čestica i agregata. Kod krupnozrnih tala dominantni su trenje, međusobno uklještenje zrna i dilatacija, dok kod sitnozrnih tala važnu ulogu imaju efektivni napon, struktura, elektrohemijske sile i istorija naprezanja. Zato parametri c i φ u Mohr-Kulonovom modelu ne treba da se tumače kao dvije potpuno nezavisne materijalne konstante. Oni su parametri izabrane aproksimacije omotača čvrstoće u određenom opsegu napona i za određene uslove drenaže.

Efektivni napon je ključan za dreniranu čvrstoću. Povećanje normalnog efektivnog napona jače pritiska čestice jednu uz drugu i povećava trenje koje treba savladati pri smicanju. U zasićenom tlu promjena pornih pritisaka može zato značajno promijeniti raspoloživu čvrstoću iako ukupni napon ostane isti. Ovaj princip objašnjava zašto brzo opterećenje gline i sporo opterećenje iste gline mogu dati različito ponašanje: razlika nije samo u brzini, već u mogućnosti drenaže i razvoju pornih pritisaka.

Na nivou strukture, gust pijesak pri smicanju teži povećanju zapremine jer zrna moraju da se podignu preko susjednih zrna. Ta dilatacija doprinosi visokoj vršnoj čvrstoći. Rastresit pijesak može se u početku zbijati, pa je vršna čvrstoća manje izražena. Nakon velikih deformacija oba

stanja teže kritičnom stanju u kome se smicanje nastavlja bez dalje sistematske promjene zapremine i bez promjene srednjeg naponskog nivoa. Ova ideja pomaže da se razumije razlika između vršne i dugotrajne čvrstoće.

Mohr-Kulonov kriterijum, ukupni i efektivni parametri

Mohr-Kulonov kriterijum $\tau_f = c + \sigma_n' tg\varphi$ predstavlja linearnu aproksimaciju odnosa smičuće čvrstoće i normalnog efektivnog napona. U grafičkom Mohr-ovom prikazu lom nastaje kada krug napona dodirne omotač čvrstoće. Model je jednostavan i zato veoma rasprostranjen, ali realna omotačnica može biti zakrivljena. Parametri određeni u jednom naponskom području ne moraju biti optimalni za sasvim drugačiji nivo napona. Zbog toga je pri izvještavanju važno navesti opseg normalnih napona korišćen u opitu.

Kod nedreniranih analiza zasićenih glina ponekad se koriste parametri izraženi u ukupnim naponima. Tada se efekat pornih pritisaka ne prikazuje posebno, već je ugrađen u empirijski nedrenirani otpor c_u. Takav pristup može biti opravdan za kratkotrajne probleme pod uslovima sličnim laboratorijskom opitu. Za dugotrajno stanje, kada se višak pornih pritisaka disipira, relevantniji su efektivni parametri c' i φ'. Miješanje ukupnih i efektivnih parametara u istom proračunu je česta i ozbiljna greška.

Kohezioni presjek c' kod mnogih prirodnih tala ne mora predstavljati stvarnu vezu sličnu cementaciji. Može nastati kao rezultat linearne aproksimacije zakrivljene omotačnice, ograničenog broja opitnih tačaka ili strukturnih efekata. Kod cementiranih i prekonsolidovanih tala presjek može imati jasniji fizički značaj, ali i tada se može degradirati pri velikim deformacijama. Zato projektna interpretacija treba da razlikuje matematički presjek od trajne, mobilizabilne kohezije u realnom problemu.

Direktno smicanje, dilatacija i rezidualna čvrstoća

U opitu direktnog smicanja ravnina smicanja je unaprijed određena razdvajanjem kutije. Prednost je jednostavnost i direktno mjerenje smične sile, ali raspodjela napona po ravni nije potpuno uniformna, a pravac loma nije slobodan da se razvije tamo gdje bi ga materijal prirodno izabrao. Zbog toga je opit naročito pogodan za poređenje materijala i ispitivanje kontakata ili diskontinuiteta sa poznatom ravni, dok za opštu karakterizaciju homogenog tla triaksijalni opit daje potpuniju kontrolu naponskog stanja.

Tokom smicanja mjeri se i vertikalno pomjeranje, iz koga se može zaključiti da li uzorak kontrahuje ili dilatira. Gusti pijesak i prekonsolidovane gline mogu pokazati dilataciju i izražen vrh smične sile. Nakon vrha, struktura se reorganizuje i otpor može opasti ka približno stabilnoj vrijednosti. Kod nekih glina, naročito duž prethodno formiranih kliznih površina, vrlo velika pomjeranja dovode do orijentacije pločastih čestica i razvoja znatno niže rezidualne čvrstoće.

Razlika između vršne i rezidualne čvrstoće presudna je kod reaktivacije starih klizišta. Ako je klizna površina već prošla velika pomjeranja, korišćenje vršnih parametara može ozbiljno precijeniti stabilnost. Za nove lomne površine u netaknutom materijalu vršna čvrstoća može biti relevantna, ali samo ako se struktura zaista može mobilisati. Izbor parametara zato zavisi od istorije deformacije, a ne samo od vrste tla. Laboratorijski opit treba da bude projektovan tako da oponaša mehanizam koji se očekuje u terenu.

Triaksijalni CU opit i značaj mjerenja pornog pritiska

U konsolidovano-nedreniranom triaksijalnom opitu uzorak se najprije konsoliduje pod izabranim ćelijskim pritiskom, čime se uspostavlja kontrolisano početno efektivno naponsko stanje. Zatim se uz zatvorenu drenažu povećava devijatorski napon do loma. Pošto voda tokom smicanja ne može slobodno da izađe, razvija se promjena pornog pritiska. Ako se porni pritisak mjeri, iz ukupnih glavnih napona mogu se izračunati efektivni naponi i dobiti efektivni parametri čvrstoće.

Prednost CU opita je mogućnost da iz jednog nedreniranog opterećenja dobijemo informacije o oba nivoa: ukupnom odgovoru i efektivnoj putanji napona. Kontraktivno ponašanje obično stvara pozitivne pore, pritiske, i smanjuje efektivni srednji napon, dok dilatantno ponašanje može stvarati manje pozitivne ili čak negativne promjene pornog pritiska. Putanja efektivnog napona zato daje dublji uvid u mehanizam nego sama maksimalna devijatorska sila.

Kvalitet rezultata zavisi od zasićenosti uzorka, pravilne konsolidacije, malog trenja klipa, mjerenja deformacije i korekcije površine poprečnog presjeka. Nedovoljno zasićen uzorak sadrži kompresibilan vazduh, pa izmjereni porni pritisak više ne predstavlja ponašanje potpuno zasićenog tla. Takođe, prebrza ili prespora brzina smicanja može narušiti željene uslove. Zbog toga triaksijalni opit zahtijeva više kontrole nego direktno smicanje, ali zauzvrat daje znatno potpuniji opis naponsko-deformacionog odgovora.

Jednoaksijalni opit, osjetljivost uzorka i izbor projektne čvrstoće

Jednoaksijalni pritisni opit na koherentnom tlu predstavlja poseban slučaj triaksijalnog opita sa nultim bočnim ukupnim naponom. Ako je zasićena glina dovoljno koherentna da uzorak može stajati bez bočne potpore i ako se opterećenje izvodi nedrenirano, jednoaksijalna čvrstoća q_u često se povezuje sa nedreniranom smičućom čvrstoćom približnom relacijom $s_u \approx q_u / 2$. Ova veza počiva na idealizovanom Mohr-Kulonovom ponašanju sa φ_u približno jednakim nuli u ukupnim naponima.

Opit je brz, ali veoma osjetljiv na kvalitet uzorka. Pukotine, poremećaj pri vađenju, gubitak vlage i nepravilan odnos visine i prečnika mogu znatno smanjiti izmjerenu čvrstoću. Kod vrlo mekih glina i vrijeme između uzorkovanja i ispitivanja može promijeniti rezultat. Zato jednoaksijalna čvrstoća treba da se tumači zajedno sa opisom uzorka i po mogućnosti poredi sa drugim nedreniranim ispitivanjima. Niska vrijednost može predstavljati stvarno meko tlo, ali i loše očuvan uzorak.

Projektna čvrstoća nije nužno najveća vrijednost dobijena u laboratoriji. Za stabilnost je potrebno izabrati parametar koji odgovara uslovima drenaže, nivou deformacije, istoriji klizanja i prostornoj varijabilnosti. Kratkoročna analiza nasipa na mekoj glini može zahtijevati nedreniranu čvrstoću, dok dugoročna stabilnost iste konstrukcije zahtijeva efektivne parametre. Kod starih klizišta može biti relevantna rezidualna čvrstoća. Zadatak laboratorije je da izmjeri ponašanje, a zadatak inžinjerske interpretacije da izabere koji dio tog ponašanja odgovara realnom mehanizmu loma.

6.5 Osnovni podaci za direktno smicanje

Za nastavnu obradu koristi se serija od tri opita pri normalnim naponima 200, 300 i 400 kPa. U ovom nastavnom skupu redoslijed pomjeranja je usklađen na 0; 1,3; 2,4; 3,3; 4,4; 5,2; 6,3; 7,4 i 8,2 mm, bez promjene izmjerenih smičućih napona.

Tabela 6.1. Rezultati opita direktnog smicanja

$\delta(mm)$	$\tau(kPa)$ $\sigma_n = 200kPa$	$\tau(kPa)$ $\sigma_n = 300kPa$	$\tau(kPa)$ $\sigma_n = 400kPa$
0	0	0	0
1,3	12,6	29,5	52,5

$\delta(mm)$	$\tau(kPa)$ $\sigma_n = 200kPa$	$\tau(kPa)$ $\sigma_n = 300kPa$	$\tau(kPa)$ $\sigma_n = 400kPa$
2,4	29,0	55,3	95,3
3,3	45,5	75,3	129,8
4,4	61,7	95,1	157,3
5,2	75,3	114,4	174,5
6,3	87,2	129,7	187,3
7,4	95,5	140,3	198,5
8,2	99,9	149,9	203,8

6.6 Osnovni podaci za triaksijalni CU opit

Na tri uzorka glinovitog tla izveden je CU opit sa mjerenjem pornog pritiska. Vrijednosti u tabeli predstavljaju stanje pri lomu.

Tabela 6.2. Rezultati CU triaksijalnog opita

Uzorak	**Ćelijski pritisak** $\sigma_3(kPa)$	**Devijator** $q = \sigma_1 - \sigma_3(kPa)$	**Porni pritisak** $u(kPa)$
1	100	200	50
2	150	300	70
3	300	500	110

6.7 Osnovni podaci za jednoaksijalni opit

Za jednoaksijalni opit date su vrijednosti aksijalnog napona, aksijalne deformacije ε_1 i poprečne deformacije ε_3. Deformacije su izražene u procentima.

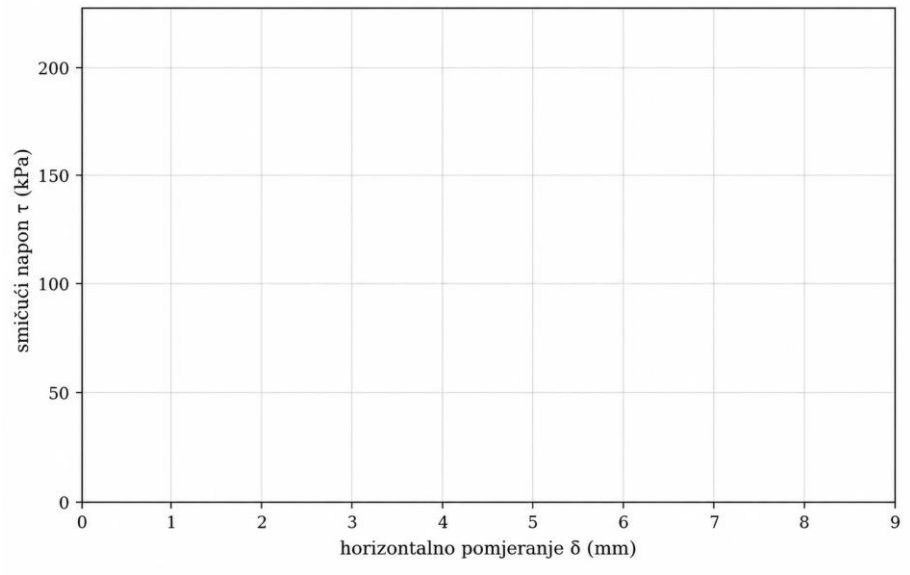
Tabela 6.3. Rezultati jednoaksijalnog opita

$\sigma_1(kPa)$	$\varepsilon_1(\%)$	$\varepsilon_3(\%)$
0	0	0
102	0,081	0,004
240	0,16	0,006
709	0,363	0,021
1250	0,583	0,119
1485	0,743	0,236

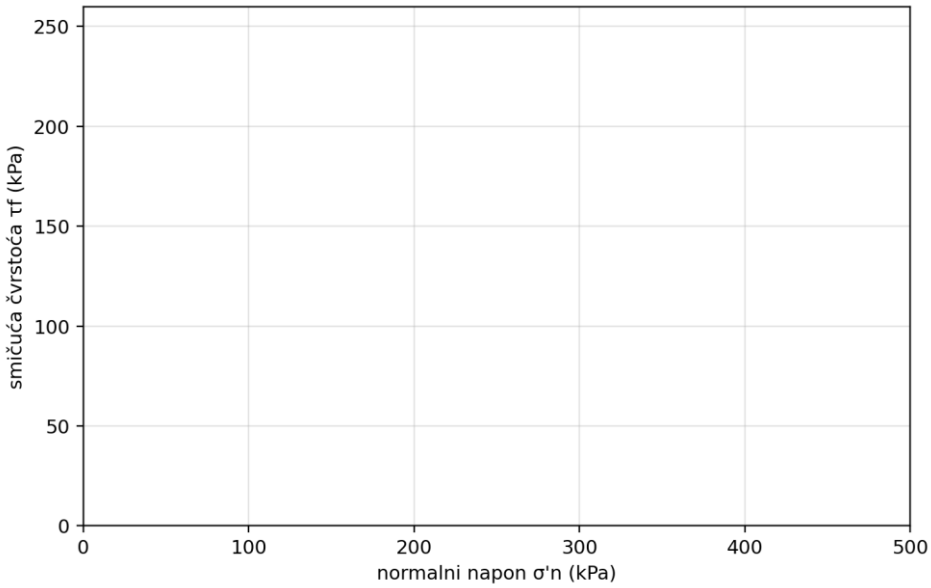
$\sigma_1(kPa)$	$\varepsilon_1(\%)$	$\varepsilon_3(\%)$
1149	0,803	0,243

6.8 Radni dijagrami

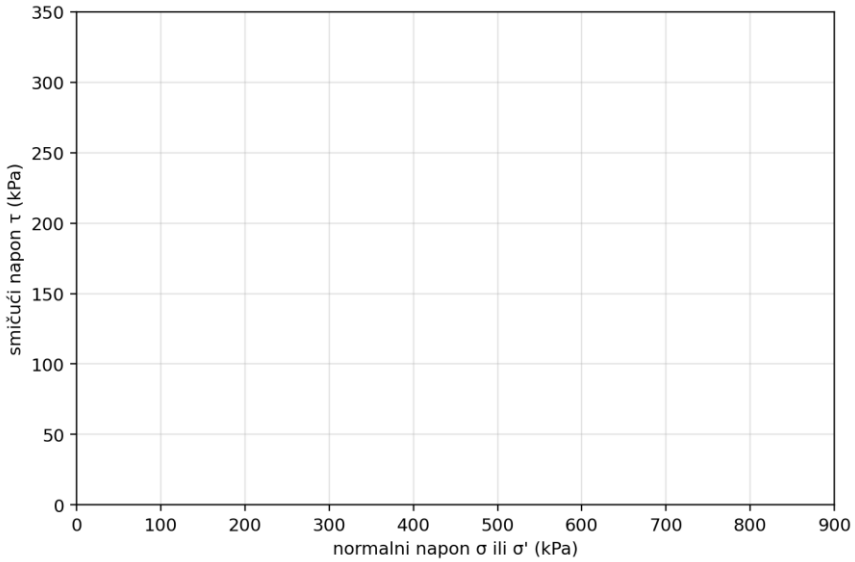
Radni dijagrami u nastavku namijenjeni su studentskoj obradi. Direktno smicanje se prvo obrađuje u prostoru $\tau - \delta$, a zatim se iz vršnih vrijednosti formira anvelopa $\tau_f - \sigma_n$. Za triaksijalni opit crtaju se Morovi krugovi totalnih i efektivnih napona, a za jednoaksijalni opit kriva $\sigma_1 - \varepsilon_1$.



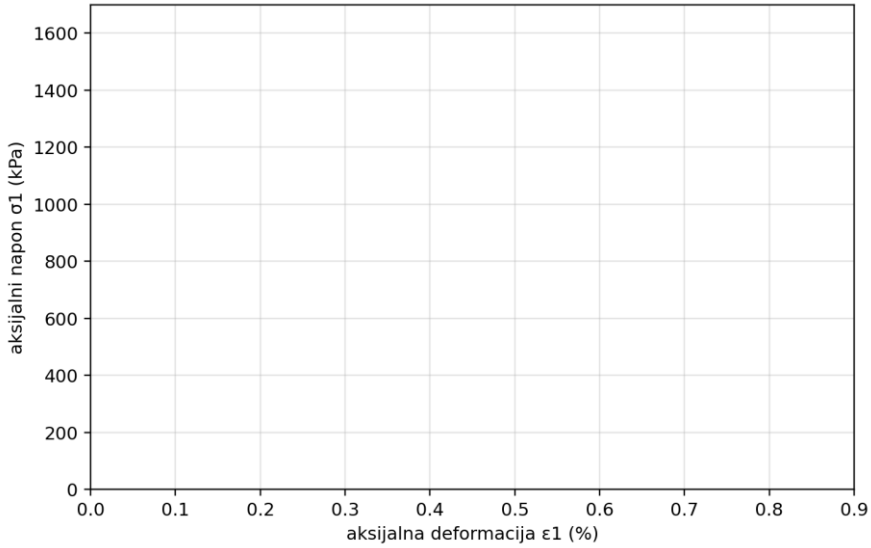
Slika 6.6. Radni dijagram $\tau - \delta$ za tri opita direktnog smicanja.



Slika 6.7. Radni dijagram za određivanje c i φ iz vršnih vrijednosti direktnog smicanja.



Slika 6.8. Radni Morov dijagram za totalne i efektivne napone triaksijalnog CU opita.



Slika 6.9. Radni dijagram $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 1 za jednoaksijalni opit.

6.9 Zadatak

- Na osnovu Tabele 6.1 nacrtati tri krive τ-δ i za svaki normalni napon odrediti vršnu smičuću čvrstoću τ_f. Provjeriti da li je pri posljednjem očitavanju dostignut jasan vrh ili samo najveća izmjerena vrijednost u raspoloživom opsegu pomjeranja.
- Vršne vrijednosti τ_f nanijeti na dijagram $\tau_f - \sigma_n$, odrediti najbolju linearnu aproksimaciju i iz nje izračunati c i φ.

- Na osnovu Tabele 6.2 za svaki CU uzorak izračunati σ_1, σ_1'' i σ_3'. Nacrtati Morove krugove totalnih i efektivnih napona i odrediti totalne parameter c, φ i efektivne parametre c', φ'.
- Za uzorak ispitan pri σ_3 = 150 kPa grafički odrediti tačku dodira odgovarajućeg Morovog kruga i anvelope, pa odrediti normalni i smičući napon u ravni loma. Rezultat provjeriti analitičkom transformacijom napona.
- Na osnovu Tabele 6.3 nacrtati krivu $\sigma_1 - \varepsilon_1$ i odrediti jednoaksijalnu čvrstoću q_u i deformaciju pri vrhu. Interpolacijom odrediti ε_{50} pri $\sigma_1 = 0,5 \cdot q_u$ i izračunati sekantni modul E_{50}.
- U nivou napona $0,5 \cdot q_u$ interpolovati i poprečnu deformaciju $\varepsilon_{3,5}$ i procijeniti Poasonov koeficijent $\nu_{50} = \frac{|\varepsilon_{3,5}|}{|\varepsilon_{1,5}|}$. Ako se uzorak tumači kao zasićena glina u nedreniranim uslovima, izračunati i $s_u \approx \frac{q_u}{2}$.
- Ako je na uzorku izmjeren ugao ravni loma $\alpha = 53^o$, izračunati indikativnu vrijednost $\varphi = 2\left(\alpha - 45^o\right)$ i u zaključku objasniti zašto se taj rezultat ne smije automatski poistovjetiti sa efektivnim φ' iz dreniranog ili CU opita.
- U zaključku uporediti šta se dobija direktnim smicanjem, CU triaksijalnim opitom i jednoaksijalnim opitom i navesti glavna ograničenja svakog postupka.

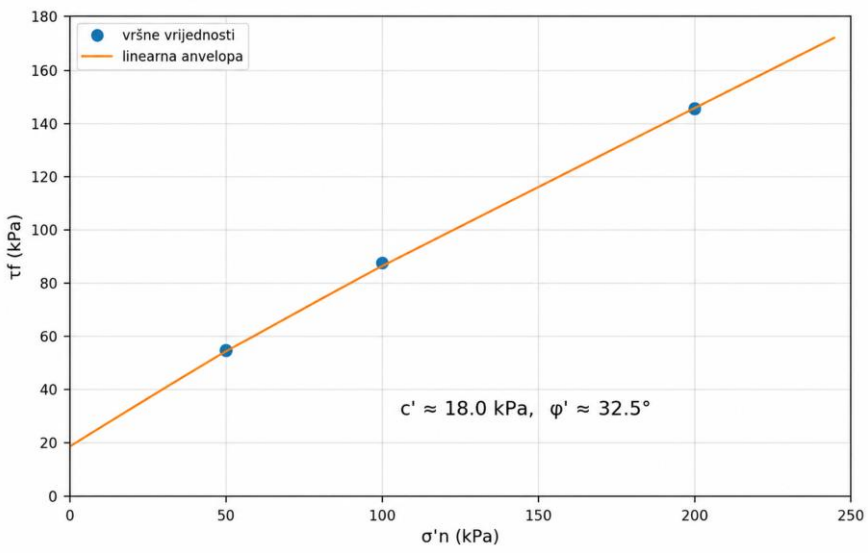
6.10 Riješeni primjer

Sljedeći primjer koristi drugi skup podataka od Tabela 6.1-6.3. Cilj je da student vidi kompletan tok obrade, ali da zadatak iz vježbe ostane samostalan.

A) Direktno smicanje - određivanje c' i φ'

Za tri drenirana opita dobijene su vršne vrijednosti: (σ_n', τ_f) = (50, 44), (100, 73) i (200, 131) kPa. Linearnom aproksimacijom $\tau_f = c' + \sigma_n' \cdot \tan\varphi'$ dobija se približno:

$$c' \approx 15 kPa \; ; \; \varphi' \approx 30,1^o$$



Slika 6.10. Riješeni primjer - anvelopa vršne čvrstoće direktnog smicanja.

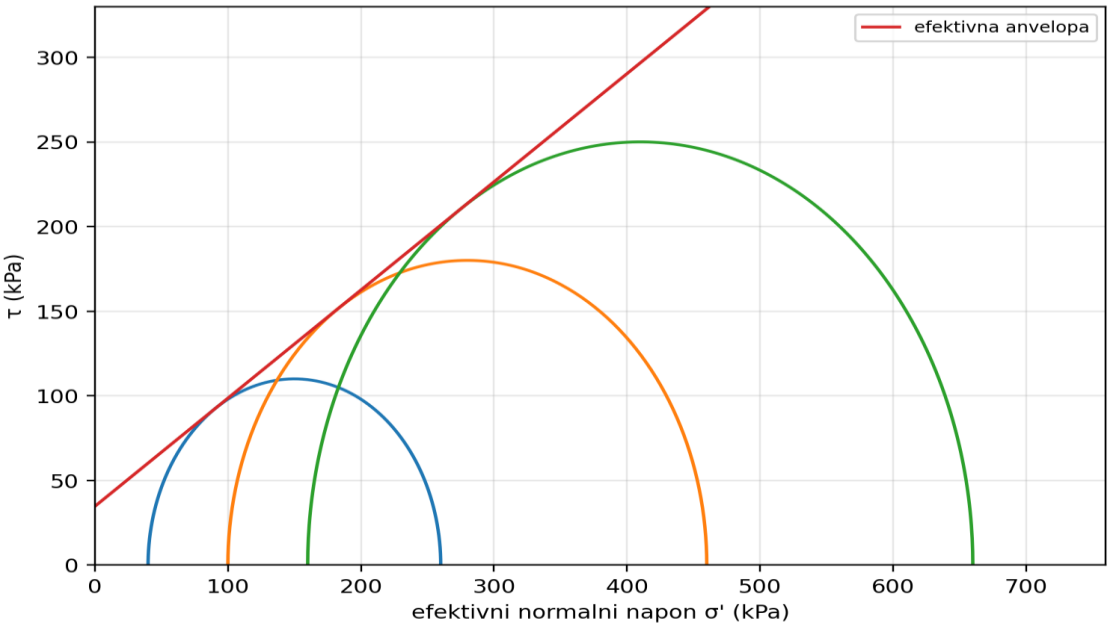
Ako bi se pri velikim pomjeranjima dobile rezidualne vrijednosti, one bi se obrađivale zasebno. Nije pravilno miješati vršne i rezidualne tačke u jednu anvelopu.

B) CU triaksijalni opit - totalni i efektivni parametri

U ilustrativnom CU primjeru usvojeno je: σ_3 = 100, 200 i 300 kPa; τ_f = 220, 360 i 500 kPa; u = 60, 100 i 140 kPa. Zato su totalni veliki glavni naponi σ_1 = 320, 560 i 800 kPa, a efektivni parovi (σ'3, σ'1) = (40,260), (100,460) i (160,660) kPa.

Totalni parametri: c ≈ 25.8 kPa, φ ≈ 24.3°

Efektivni parametri: c' ≈ 34.7 kPa, φ' ≈ 32.6°



Slika 6.11. Riješeni primjer - efektivni Morovi krugovi i anvelopa čvrstoće.

Razlika između totalne i efektivne anvelope nastaje zato što se u nedreniranoj fazi razvija porni pritisak. Zbog toga je podatak o mjerenju u presudan za efektivnu interpretaciju CU opita.

C) Jednoaksijalni opit - $q_u, E_{50}\, i\, \nu_{50}$

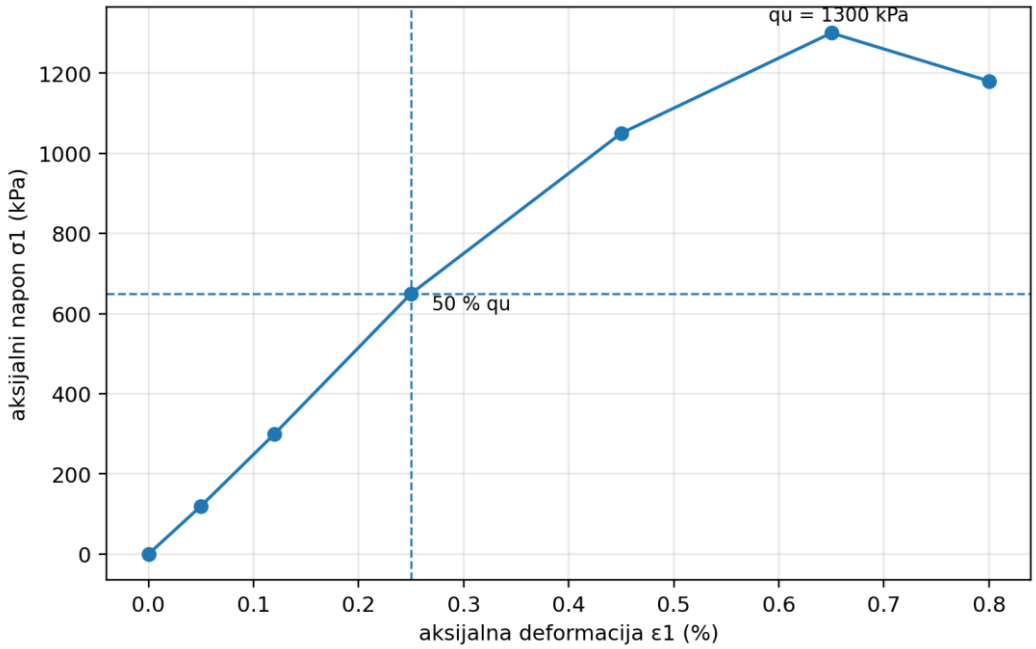
Za ilustrativni uzorak maksimalni napon je $q_u = 1300\ kPa$ a pri $\varepsilon_1 \approx 0,65\ \%$. Polovina čvrstoće je 650 kPa, a iz tabele/krive odgovara $\varepsilon_{50} \approx 0,25\% = 0,0025$. Zato je:

$$E_{50} = \frac{650}{0,0025} = 260\,000\,kPa = 260\,MPa$$

Ako je pri istom nivou napona poprečna deformacija $|\varepsilon_3| \approx 0,055\%$, tada je:

$$\nu_{50} \approx \frac{0,055}{0,25} \approx 0,22$$

Za nedreniranu interpretaciju zasićene gline: $s_u \approx \frac{q_u}{2} \approx 650\ kPa$. Kod realnih tala treba jasno navesti da li je modul tangentni, sekantni ili E_{50}, jer različite definicije daju različite numeričke vrijednosti.



Slika 6.12. Riješeni primjer - jednoaksijalna kriva i definicija E_{50}.

Zaključak: direktno smicanje daje jednostavnu anvelopu u unaprijed zadatoj ravni loma; CU opit omogućava odvojenu totalnu i efektivnu interpretaciju ako se mjeri porni pritisak;

jednoaksijalni opit brzo daje q_u i orijentacionu deformabilnost koherentnog uzorka. Parametri iz različitih opita nisu automatski međusobno zamjenljivi.

Literatura:

1. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.
2. Knappett, J. A., Craig, R. F. (2020) Craig's Soil Mechanics. 9th ed. CRC Press, Boca Raton.
3. Maksimović, M. (2008) Mehanika tla. AGM knjiga, Beograd.
4. SRPS EN ISO 17892-7:2017 Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - Deo 7: Jednoaksijalni opit pritiska.
5. SRPS EN ISO 17892-9:2018 Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - Deo 9: Konsolidovani triaksijalni opiti pritiska na vodom zasićenim tlima.
6. SRPS EN ISO 17892-10:2018 Geotehničko istraživanje i ispitivanje - Laboratorijsko ispitivanje tla - Deo 10: Opiti direktnog smicanja.
7. JUS U.B1.028 (1969) Ispitivanje direktnog smicanja tla - istorijska referenca korišćena u starijoj verziji praktikuma.

VJEŽBA BR. 7

Čvrstoća stijena na pritisak, zatezanje i smicanje

7.1 Čvrstoća intaktne stijene i stijenske mase

Čvrstoća stijene zavisi od mineralnog sastava, strukture i teksture, poroznosti, stepena alteracije, sadržaja vode, anizotropije i naponskog puta. Laboratorijski opiti se najčešće izvode na relativno malim, intaktnim probnim tijelima, pa dobijene vrijednosti opisuju svojstva intaktne stijene, a ne neposredno čvrstoću stijenske mase. Ponašanje stijenske mase dodatno određuju diskontinuiteti, rasjedi, slojevitost, ispuna, hrapavost i efekat razmjere [ASTM International, 2023a; ISRM, 2007].

U ovoj vježbi povezuju se tri osnovna aspekta čvrstoće: otpornost na pritisak, otpornost na zatezanje i smičuća čvrstoća. Cilj nije samo primjena formula, već razumjevanje šta svaki opit mijeri, koje su njegove pretpostavke i kada se rezultat može koristiti samo kao indeksni ili orijentacioni pokazatelj.

7.2 Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak (UCS)

Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak, σ_{ci}, određuje se opterećivanjem intaktnog probnog tijela bez bočnog pritiska do loma. U savremenoj praksi postupak je obuhvaćen ASTM D7012-23, Method C, dok ISRM Suggested Methods daju široko korišćenu referentnu proceduru za pripremu i ispitivanje stijenskih uzoraka. Geometrija uzorka, ravnost i paralelnost krajeva, brzina opterećenja, sadržaj vode i orijentacija uzorka u odnosu na slojevitost ili folijaciju moraju biti evidentirani jer mogu značajno uticati na rezultat.

$$\sigma_{ci} = \frac{P_{\max}}{A}, \quad A = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{(za cilindrično probno tijelo).}$$



Slika 7.1. Šematski prikaz jednoaksijalnog opita pritiska. Autorska nastavna šema prema principima ASTM D7012 i ISRM Suggested Methods.

Pri tumačenju UCS posebno je važno razlikovati laboratorijsku vrijednost intaktnog uzorka od projektne čvrstoće stijenske mase. ASTM D7012 izričito upozorava da laboratorijski uzorci ne obuhvataju uticaj zglobova, rasjeda, nehomogenosti i drugih diskontinuiteta prisutnih u terenu.

7.2.1 Indeks tačkastog opterećenja kao indirektna procjena UCS

Kada nije moguće pripremiti standardno probno tijelo za UCS, često se koristi indeks tačkastog opterećenja I_s. On je indeksna veličina, a ne direktno izmjerena jednoaksijalna čvrstoća. Za probno tijelo ekvivalentnog prečnika D_e važi:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}.$$

Ako se ispituju uzorci različitih dimenzija, rezultat se svodi na standardni ekvivalentni prečnik 50 mm. U ISRM postupku koristi se veličinska korekcija, često zapisana kao:

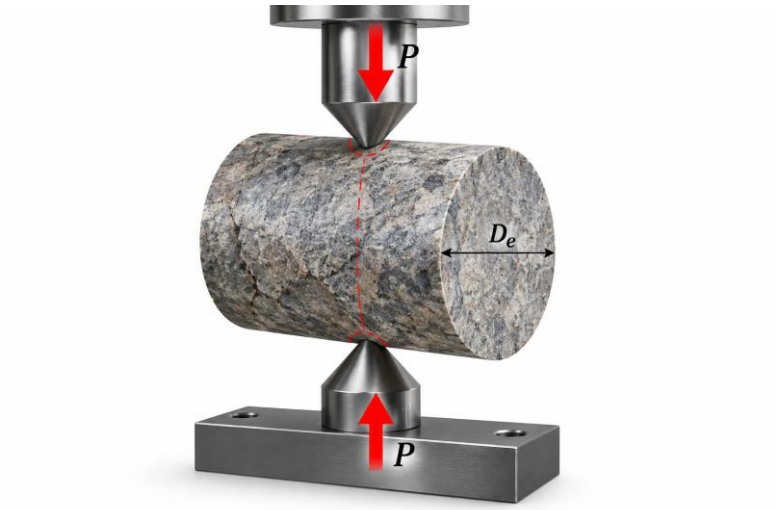
$$I_{s(50)} = F \cdot I_s, \quad F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45}.$$

Veza između $I_{s(50)}$ i UCS je empirijska i zavisi od litologije, strukture i lokalne kalibracije:

$$\sigma_{ci} \approx K \cdot I_{s(50)}$$

Koeficijent K nije univerzalna konstanta. U glavnom zadatku ove vježbe svi uzorci su već svedeni na $D_e = 50\,mm$, pa je $F = 1$, a isključivo u nastavne svrhe usvaja se $K = 24$. U

projektnom radu potrebno je koristiti korelaciju potvrđenu za konkretnu stijenu i raspoloživi skup podataka.



Slika 7.2. Princip opita tačkastog opterećenja i veza sa procjenom UCS. Autorska nastavna šema prema ISRM Suggested Methods.

7.2.2 Uticaj vode i ciklusa smrzavanje–odmrzavanje

Voda može smanjiti čvrstoću brojnih stijena kroz slabljenje veza, bubrenje glinovitih minerala, rast pritiska u porama i ubrzavanje alteracije. Poređenje suvog i zasićenog stanja može se prikazati koeficijentom omekšanja:

$$K_{om} = \frac{\sigma_{ci,sat}}{\sigma_{ci,dry}}.$$

Slično se može pratiti promjena čvrstoće nakon definisanog broja ciklusa smrzavanje–odmrzavanje:

$$KFT = \frac{\sigma_{ci,FT}}{\sigma_{ci,dry}}.$$

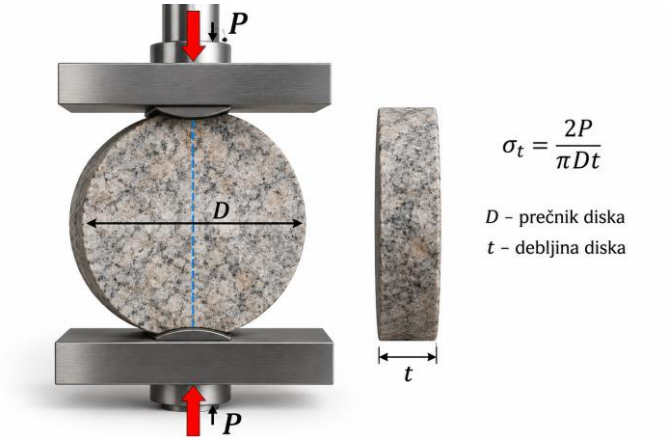
Ovi koeficijenti se tumače zajedno sa vrstom stijene, brojem ciklusa, temperaturnim režimom i metodom zasićenja. U ovoj vježbi ne usvaja se jedan univerzalni prag prihvatljivosti, jer projektni kriterijum mora biti vezan za namjenu materijala i primjenjenu specifikaciju.

7.3 Čvrstoća stijene na zatezanje

Direktno određivanje zatezne čvrstoće stijene je eksperimentalno zahtjevno zbog centriranja uzorka i prenosa čiste zatezne sile. Zbog toga se u laboratorijskoj praksi veoma često koristi indirektni Brazilski opit, odnosno splitting tensile test. ASTM D3967-23 određuje postupak za diskaste uzorke koji se opterećuju dijametralnom pritiskajućom silom do rascjepa.

$$\sigma_t = \frac{2P}{(\pi D t)}.$$

gdje je P sila pri lomu, D prečnik diska, a t njegova debljina. Dobijena vrijednost predstavlja indirektnu, odnosno splitting zateznu čvrstoću. Ona nije potpuno ekvivalentna rezultatu direktnog zateznog opita, pa metoda mora biti navedena u izvještaju.



Slika 7.3. Brazilski opit za određivanje indirektne zatezne čvrstoće. Autorska nastavna šema prema ASTM D3967-23.

Zatezna čvrstoća je kod većine stijena znatno manja od jednoaksijalne čvrstoće na pritisak, ali odnos $\frac{\sigma_t}{\sigma_{ci}}$ nije univerzalno jednak 10 %. Zavisi od litologije, mikroprslina, poroznosti, anizotropije, vlažnosti i primjenjene metode ispitivanja. Zato odnos dobijen u vježbi treba komentarisati kao svojstvo konkretnog skupa uzoraka.

7.4 Smičuća čvrstoća i Mohr–Kulonov kriterijum

Smičuća čvrstoća opisuje granično stanje pri kome dolazi do klizanja ili loma duž posmatrane ravni. U jednostavnom linearnom Mohr–Kulonovom obliku piše se:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan\varphi.$$

Parametar c predstavlja odsječak na osi smičućeg napona, a φ ugao trenja. Za intaktnu stijenu Mohr–Kulonova prava je samo lokalna linearna aproksimacija omotača loma; kod većeg raspona napona ponašanje stijena je često nelinearno. U projektantskim analizama parametri se zato najpouzdanije određuju iz odgovarajućih triaxialnih ili smičućih opita u relevantnom opsegu napona.

7.4.1 Didaktička procjena *c* i *φ* iz pritiska i zatezanja

Ako se, samo za potrebe ove vježbe, pretpostavi da jedna Mohr–Kulonova prava predstavlja zajedničku tangentu Mohr-ovih krugova jednoaksijalnog pritiska i jednoaksijalnog zatezanja, iz srednjih vrijednosti σ_{ci} i σ_t može se dobiti:

$$\sin\varphi = \frac{(\sigma_{ci} - \sigma_t)}{(\sigma_{ci} + \sigma_t)},$$

$$\varphi = \arcsin\frac{(\sigma_{ci} - \sigma_t)}{(\sigma_{ci} - \sigma_t)},$$

$$c = 0{,}5 \cdot \sqrt{(\sigma_{ci} \cdot \sigma_t)}.$$

U formulama se σ_t koristi kao pozitivna vrijednost intenziteta zatezne čvrstoće. Ovaj postupak je didaktička procjena i ne zamjenjuje direktno određivanje parametara smicanja. Posebno je osjetljiv na rasipanje rezultata i na činjenicu da splitting tensile strength nije isto što i direktna zatezna čvrstoća.

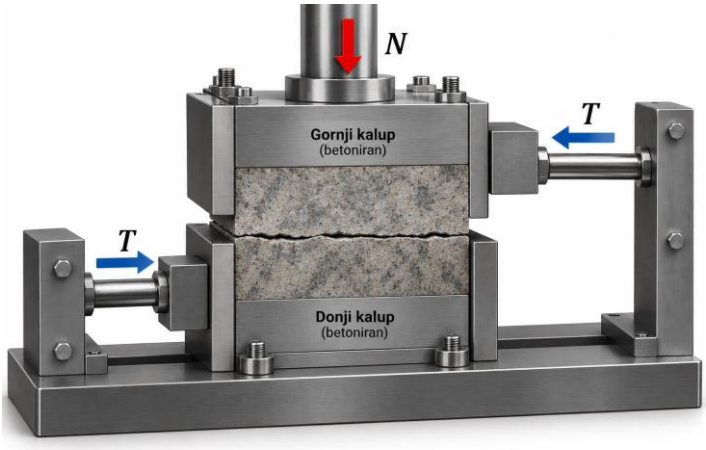
7.4.2 Direktno smicanje duž diskontinuiteta

Kada je ponašanje stijenske mase kontrolisano pukotinom, slojnom površi ili drugim diskontinuitetom, relevantno je direktno smicanje pod više nivoa normalnog opterećenja. Tokom opita prate se smičuća sila, horizontalno pomjeranje i, kada je moguće, normalno pomjeranje. Posebno se razlikuju vršna i rezidualna čvrstoća:

$$\tau_p = c_p + \sigma_n \tan\varphi_p,$$

$$\tau_r = c_r + \sigma_n \tan\varphi_r.$$

Dilatancija hrapavog diskontinuiteta može se približno opisati uglom $\psi = \arctan\left(\frac{\Delta v}{\Delta u}\right)$, uz jasno definisanu konvenciju znaka. Rezultat zavisi od hrapavosti, ispune, vlažnosti, normalnog napona i razmjere uzorka.



Slika 7.4. Šematski prikaz direktnog smicanja duž diskontinuiteta. Autorska nastavna šema prema principima ISRM Suggested Methods.

Napomena o standardizaciji: ASTM D5607-16, koji je uređivao laboratorijsko direktno smicanje stijena pod konstantnom normalnom silom, povučen je 2025. godine bez neposredne zamjene. Zbog toga se u ovoj vježbi direktno smicanje objašnjava prema opštim principima ISRM Suggested Methods i validiranoj laboratorijskoj proceduri, uz obavezno navođenje konkretne metode u realnom izveštaju.

7.5 Orijentaciona klasifikacija intaktne stijene prema UCS

Za opis intaktne stijene može se koristiti ISRM klasifikacija prema približnoj jednoaksijalnoj čvrstoći na pritisak. Klasifikacija predstavlja opis čvrstoće intaktnog materijala i ne smije se poistovjetiti sa klasifikacijom cijele stijenske mase.

Tabela 7.1. ISRM opisne klase čvrstoće intaktne stijene

Klasa	Opis	UCS (MPa)	Orijentacioni terenski opis
R0	izuzetno slaba	0,25–1	utiskuje se noktom
R1	vrlo slaba	1–5	mrvi se pod čvrstim udarcima geološkog čekića; može se ljuštiti nožem
R2	slaba	5–25	teško se ljušti nožem; plitka udubljenja pri snažnom udaru čekića
R3	srednje jaka	25–50	ne struže se nožem; lomi se jednim snažnim udarcem čekića
R4	jaka	50–100	za lom je potrebno više od jednog udarca geološkog čekića
R5	vrlo jaka	100–250	za lom je potrebno mnogo snažnih udaraca
R6	izuzetno jaka	>250	pri udarima se uglavnom samo kruni ili odlama u iverje

Granice između klasa treba tumačiti kao opisne pragove. Ako se srednja vrijednost nalazi neposredno uz granicu, u zaključku treba navesti i rasipanje pojedinačnih rezultata, a ne samo oznaku klase.

Mikropukotine i mehanizam loma intaktne stijene

Intaktna stijena na makroskopskom nivou djeluje kompaktno, ali na mikroskopskom nivou sadrži pore, granice mineralnih zrna i mikropukotine. Pod pritiskom se najprije zatvaraju postojeće pukotine i nepravilni kontakti, pa početni dio krive napon-deformacija može biti nelinearan. Nakon toga slijedi približno elastično područje. Sa daljim povećanjem napona nastaju nove mikropukotine, koje se spajaju i formiraju makroskopsku zonu loma. Jednoaksijalna čvrstoća zato predstavlja rezultat evolucije oštećenja, a ne jednu trenutnu tačku prekida savršeno homogenog materijala.

Mineraloški sastav i tekstura utiču na način razvoja pukotina. U sitnozrnoj, homogeno vezanoj stijeni put loma može presijecati mineralna zrna, dok u krupnozrnoj ili folijisanoj stijeni pukotine često prate slabije granice ili ravni orijentacije minerala. Zbog toga uzorci iz iste stijenske mase mogu pokazati rasipanje čvrstoće u zavisnosti od pravca jezgra. Anizotropija je naročito važna kod škriljaca, gnajseva i slojevitih sedimentnih stijena, gdje odnos ose opterećenja i ravni slabosti može promijeniti i čvrstoću i oblik loma.

Brzina opterećenja takođe utiče na rezultat. Pri bržem opterećenju nema dovoljno vremena za spor razvoj subkritičnih pukotina i redistribuciju napona, pa izmjerena vršna čvrstoća može biti veća. Pri dugotrajnom opterećenju stijena može pokazivati puzanje i rast pukotina pri naponskim nivoima nižim od kratkotrajne UCS vrijednosti. Zato laboratorijska jednoaksijalna čvrstoća predstavlja standardizovani kratkotrajni indeks i mora se pažljivo koristiti za dugotrajne podzemne konstrukcije.

Zatezna čvrstoća i brazilski opit

Stijena je obično znatno slabija na zatezanje nego na pritisak. Razlog je što postojeće mikropukotine pod zatezanjem lako otvaraju svoje vrhove i koncentrišu napone, dok se pod pritiskom dio pukotina zatvara. Direktni zatezni opit je eksperimentalno zahtjevan jer je teško uvesti čisto aksijalno zatezanje bez ekscentriciteta i lokalnog oštećenja u prihvatu. Zbog toga se u praksi često koristi brazilski, odnosno indirektni zatezni opit na disku opterećenom po prečniku.

Iako je spoljašnje opterećenje pritisno, u središnjoj zoni diska razvija se zatezni napon upravan na pravac opterećenja. Idealni proračun pretpostavlja homogenu, izotropnu i linearno elastičnu stijenu i lom koji započinje u odgovarajućoj centralnoj zoni. Ako uzorak lomi lokalno ispod kontaktnih linija ili je veoma anizotropan, jednostavna formula može izgubiti fizički smisao. Zato oblik loma treba dokumentovati zajedno sa izračunatom vrijednošću.

Zatezna čvrstoća ima veliki značaj za stabilnost krova podzemnih prostorija, razvoj ekstenzionih pukotina, hidrauličko frakturiranje i ponašanje stijene oko iskopa. U mnogim numeričkim modelima kriterijum zateznog loma postavlja se odvojeno od smičnog kriterijuma. To je važno jer Mohr-Kulonova prava produžena u područje zatezanja može predvidjeti nerealno veliku zateznu čvrstoću. Realističan model zato često ograničava zateznu čvrstoću posebno izmjerenom ili konzervativno procijenjenom vrijednošću.

Smičuća čvrstoća diskontinuiteta i uloga hrapavosti

U stijenskoj masi lom se često ne razvija kroz intaktnu stijenu, već duž postojećih diskontinuiteta: pukotina, slojevitosti, folijacije ili rasjeda. Smičuća čvrstoća takve ravni zavisi od normalnog efektivnog napona, hrapavosti, čvrstoće asperita, ispune i stepena trošenja. Pri malom normalnom naprezanju hrapave površine moraju da se podižu jedna preko druge, pa se razvija dilatacija i visoka vršna otpornost. Sa porastom normalnog napona asperiti se mogu drobiti ili smicati, pa relativni doprinos hrapavosti opada.

Ako je diskontinuitet ispunjen glinom ili zdrobljenim materijalom, kontakt stijena–stijena može biti djelimično ili potpuno izgubljen. Tada čvrstoću često kontroliše ispuna, njena debljina, plastičnost i vlažnost. Posebno su kritične glatke, prethodno smicane površine sa orijentisanim glinenim mineralima, koje mogu imati nisku rezidualnu čvrstoću. Zbog toga opis diskontinuiteta mora obuhvatiti više od ugla pada i razmaka: važni su hrapavost, kontinuitet, alteracija i prisustvo vode.

Direktno smicanje diskontinuiteta pokušava da reprodukuje ovaj mehanizam pod kontrolisanim normalnim opterećenjem. Rezultat zavisi od veličine uzorka jer veći uzorak obuhvata drugačiji spektar asperita i eventualne slabe zone. Takođe, smjer smicanja u odnosu na tragove hrapavosti može mijenjati čvrstoću. Zbog toga parametri dobijeni na malom jezgru ne treba automatski da se prenesu na dugačku diskontinuitetnu plohu bez razmatranja efekta razmjere.

Uticaj vode, trošenja, ciklusa smrzavanja i anizotropije

Voda može smanjiti čvrstoću stijene na više načina. U poroznim sedimentnim stijenama zasićenje smanjuje kapilarne i površinske sile koje doprinose prividnoj koheziji. Kod glinovitih ili slabo cementiranih komponenti voda može izazvati omekšavanje i bubrenje. Hemijsko rastvaranje dodatno slabi veze tokom dužeg vremena. Zbog toga odnos suve i zasićene čvrstoće predstavlja važan pokazatelj osjetljivosti, ali efekat zavisi od mineralogije i trajanja kontakta sa vodom.

Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja mogu progresivno širiti pukotine, naročito kada je stijena dovoljno zasićena i ima porni sistem u kome se stvaraju pritisci pri smrzavanju. Poslije više ciklusa često opada čvrstoća i dinamički modul, a raste poroznost. Ovaj efekat je značajan za kosine, portale tunela i površinske objekte u hladnim klimama. Laboratorijski ciklusi treba da se tumače kao ubrzana simulacija i da budu povezani sa realnim režimom vlaženja i temperature na lokaciji.

Anizotropija može biti primarna, nastala taloženjem ili metamorfizmom, ili sekundarna zbog sistema pukotina. Čvrstoća slojevite stijene često je najveća kada opterećenje djeluje približno normalno na slojevitost ili paralelno sa njom, a najmanja pri kosom odnosu koji omogućava klizanje duž slabih ravni. Tačan oblik zavisnosti je specifičan za materijal. Zbog toga je pri ispitivanju važno orijentisati jezgra i navesti ugao između ose uzorka i strukturalne ravni.

Od laboratorijske čvrstoće do čvrstoće stijenske mase

Intaktna čvrstoća je samo jedna komponenta ponašanja stijenske mase. U velikom obimu prisutni su diskontinuiteti koji prekidaju kontinuitet materijala i mogu formirati blokove. Čak i veoma čvrsta intaktna stijena može graditi slabu stijensku masu ako su pukotine guste, nepovoljno orijentisane, glatke ili ispunjene slabim materijalom. Obrnuto, umjereno čvrsta ali masivna stijena sa rijetkim diskontinuitetima može imati povoljno ponašanje. Zato se laboratorijski UCS ne smije koristiti kao jedini pokazatelj stabilnosti iskopa.

Kriterijumi loma poput Mohr-Kulonovog ili Hoek-Brownovog predstavljaju različite nivoe idealizacije. Mohr-Kulonov kriterijum je linearan i pogodan za mnoge analitičke i numeričke proračune, dok nelinearni kriterijumi mogu bolje opisati zavisnost čvrstoće stijenske mase od nivoa konfiniranja. Parametri stijenske mase obično se procjenjuju iz kombinacije intaktne čvrstoće, geološkog opisa i klasifikacije diskontinuiteta. Takva procjena nosi veću nesigurnost od direktnog laboratorijskog mjerenja, ali bolje odgovara razmjeri objekta.

Dobra interpretacija zato razdvaja tri nivoa: svojstva intaktne stijene, svojstva pojedinačnih diskontinuiteta i svojstva stijenske mase kao cjeline. Jednoaksijalni, brazilski i direktni smični opiti pripadaju prva dva nivoa. Projektovanje tunela, kosine ili temelja zahtijeva treći nivo, u kome se uz čvrstoću razmatraju orijentacija pukotina, podzemna voda, naponsko stanje i veličina iskopa. Laboratorijski rezultat postaje koristan tek kada se smjesti u taj širi geološko-inžinjerski kontekst.

7.6 Osnovni podaci za studentski zadatak

Za tri anonimne vrste stijene (ST-1, ST-2 i ST-3) raspoloživi su rezultati opita tačkastog opterećenja i Brazilskog opita. Da bi se studentska obrada fokusirala na logiku proračuna, za point-load skup usvojeno je $D_e = 50$ mm, pa je $I_s = I_{s(50)}$. Za procjenu UCS u ovoj vježbi koristi se nastavni faktor $K = 24$.

Tabela 7.2. Rezultati opita tačkastog opterećenja – kolone $I_{s(50)}$ i σ_{ci} popunjava student

Stijena	**Uzorak**	D_e **(mm)**	P **(kN)**	$I_{s(50)}$ **(MPa)**	$\sigma_{ci} \approx 24 I_{s(50)}$ **(MPa)**
ST-1	1	50	3,95		
ST-1	2	50	4,10		
ST-1	3	50	4,20		
ST-1	4	50	4,05		
ST-1	5	50	4,25		
ST-1	6	50	4,15		
ST-2	1	50	7,00		
ST-2	2	50	7,20		
ST-2	3	50	7,35		
ST-2	4	50	7,45		
ST-2	5	50	7,10		
ST-2	6	50	7,30		
ST-3	1	50	18,20		
ST-3	2	50	18,60		
ST-3	3	50	19,00		
ST-3	4	50	18,80		

Stijena	Uzorak	D_e (mm)	P (kN)	$I_{s(50)}$ (MPa)	$\sigma_{ci} \approx 24 I_{s(50)}$ (MPa)
ST-3	5	50	19,20		
ST-3	6	50	18,70		

Tabela 7.3. Rezultati Brazilskog opita – kolonu σ_t popunjava student

Stijena	Uzorak	D (mm)	t (mm)	P (kN)	σ_t (MPa)
ST-1	1	50	25	6,7	
ST-1	2	50	25	6,9	
ST-1	3	50	25	7,0	
ST-1	4	50	25	6,8	
ST-1	5	50	25	7,1	
ST-1	6	50	25	6,9	
ST-2	1	50	25	12,4	
ST-2	2	50	25	12,8	
ST-2	3	50	25	13,0	
ST-2	4	50	25	12,6	
ST-2	5	50	25	13,1	
ST-2	6	50	25	12,9	
ST-3	1	50	25	26,8	
ST-3	2	50	25	27,2	
ST-3	3	50	25	27,8	
ST-3	4	50	25	27,4	
ST-3	5	50	25	28,0	
ST-3	6	50	25	27,6	

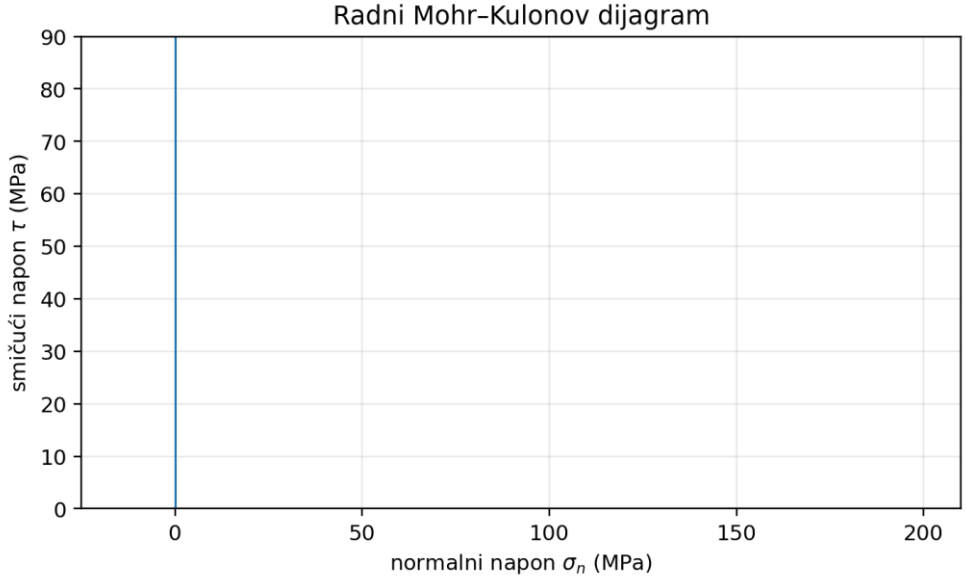
7.7 Zadatak

- Za svaki point-load uzorak iz Tabele 7.2 izračunati $I_{s(50)} = \frac{P}{D_e^2}$ i nastavnu procjenu $\sigma_{ci} = 24 \cdot I_{s(50)}$. Paziti na jedinice: ako je P u N, a D_e u mm, rezultat I_s je u N/mm² = MPa.
- Za svaku vrstu stijene izračunati srednju vrijednost procjenjene σ_{ci}, navesti minimum i maksimum i odrediti ISRM klasu R0–R6 prema Tabeli 7.1.

- Za svaki uzorak iz Tabele 7.3 izračunati indirektnu zateznu čvrstoću $\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt}$, a zatim srednju vrijednost σ_t za ST-1, ST-2 i ST-3.
- Za svaku stijenu iz srednjih vrijednosti σ_{ci} i σ_t izračunati didaktičke Mohr–Kulonove parametre C i φ koristeći izraze iz tačke 7.4.1.
- Popuniti Tabelu 7.4 i za jednu izabranu stijenu na Slici 7.5 konstruisati Mohr-ov krug za jednoaksijalni pritisak, Mohr-ov krug za zatezanje i zajedničku Mohr–Kulonovu tangentu.
- Izračunati odnos $\frac{\sigma_t}{\sigma_{ci}}$ za svaku stijenu i komentarisati razlike. Ne koristiti unaprijed pretpostavljeni fiksni odnos.
- U zaključku objasniti razliku između: (a) direktno izmjerene UCS, (b) UCS procjenjene iz point-load indeksa, (c) splitting zatezne čvrstoće i (d) parametara C i φ dobijenih didaktičkom Mohr–Kulonovom aproksimacijom.
- Posebno navesti zašto laboratorijski rezultati intaktnih uzoraka ne predstavljaju automatski čvrstoću stijenske mase u terenu.

Tabela 7.4. Zbirni radni obrazac

Stijena	**sred.** $I_{s(50)}$ **(MPa)**	**sred.** σ_{ci} **(MPa)**	**ISRM klasa**	**sred.** σ_t **(MPa)**	C **(MPa)**	φ **(°)**
ST-1						
ST-2						
ST-3						



Slika 7.5. Radni Mohr–Kulonov dijagram za grafičku obradu rezultata.

7.8 Riješeni primjer

Korak 1 – point-load indeks i procjena UCS

Uzorak	D_e (mm)	P (kN)	$I_{s(50)}$ (MPa)	σ_{ci} (MPa)
1	50	5,10	2,04	48,96
2	50	5,30	2,12	50,88
3	50	5,20	2,08	49,92
4	50	5,40	2,16	51,84

Srednja procjenjena jednoaksijalna čvrstoća iznosi $\sigma_{ci,mean} = 50,4 MPa$, Prema Tabeli 7.1. ovaj rezultat pripada klasi R4 – jaka stijena.

Korak 2 – Brazilski opit

Uzorak	D (mm)	t (mm)	P (kN)	σ_t (MPa)
1	50	25	9,2	4,69
2	50	25	9,6	4,89
3	50	25	9,4	4,79
4	50	25	9,5	4,84

Srednja zatezna čvrstoća iznosi $\sigma_{t,mean} = 4,80\, MPa.$

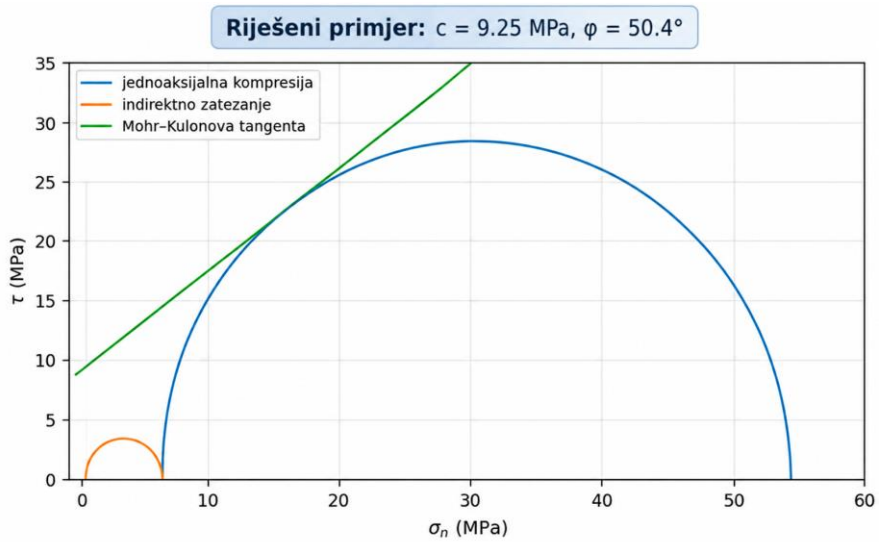
Korak 3 – procjena Mohr–Kulonovih parametara

$$\sin\varphi = \frac{(50,4 - 4,80)}{(50,4 + 4,80)} = 0,826\,.$$

$$\varphi \approx 55,7^o \quad \varphi \approx 55,7°$$

$$c = 0,5 \cdot \sqrt{(50,4 \cdot 4,80)} \approx 7,78\ MPa.$$

Dobijeni c i φ predstavljaju parametre idealizovane zajedničke tangente na dva Mohr-ova kruga. Oni služe za nastavnu vezu između rezultata pritiska, zatezanja i smicanja, ali se ne smiju nekritički prenijeti u projektantski model stijenske mase.



Slika 7.6. Mohr-ovi krugovi i zajednička Mohr–Kulonova tangenta za rješeni primjer.

Korak 4 – kontrola odnosa zatezanja i pritiska

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{ci}} \cdot 100 \approx 9{,}5\,\%$$

Rezultat je znatno manji od 100 %, što je očekivano za krte stijene, ali procenat ne treba koristiti kao univerzalnu konstantu. Kod drugih litologija i drugih metoda ispitivanja odnos može biti drugačiji.

Literatura:

1. ASTM International (2023a) ASTM D7012-23: Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. ASTM International (2023b) ASTM D3967-23: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens with Flat Loading Platens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
3. ASTM International (2016) ASTM D5607-16: Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force. Withdrawn 2025 without replacement.
4. ISRM (1979) Suggested Methods for Determining In Situ Deformability of Rock. International Society for Rock Mechanics.
5. Ulusay, R. (ed.) (2015) The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. Springer, Cham.
6. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.

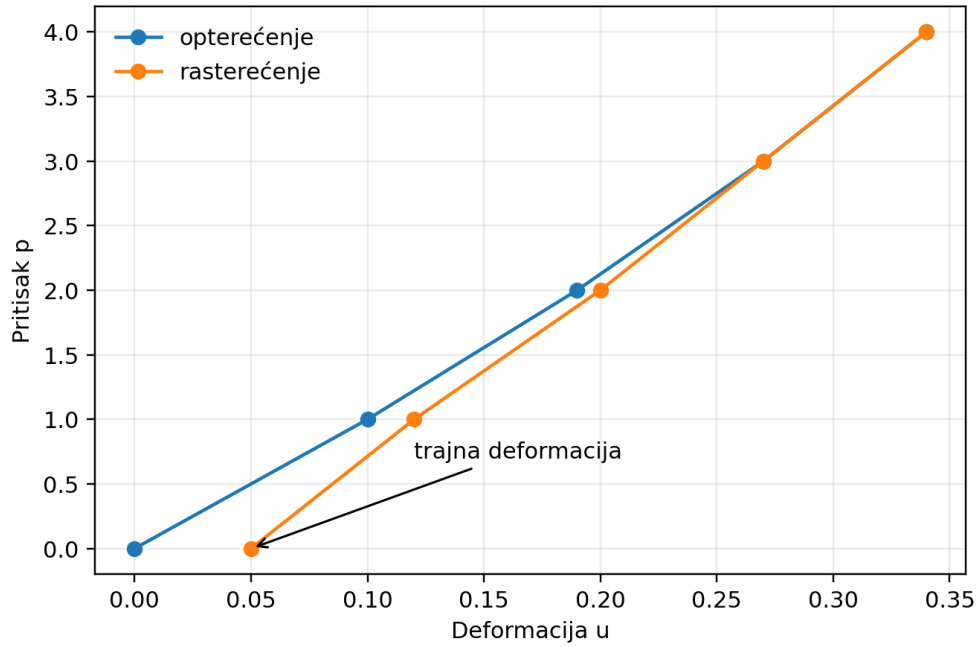
VJEŽBA BR. 8

Deformabilnost čvrstih stijenskih masa

8.1 Pojam deformabilnosti stijenske mase

Deformabilnost stijenske mase opisuje odnos između promjene naponskog stanja i nastalih pomjeranja ili deformacija. Za razliku od laboratorijskog uzorka intaktne stijene, stijenska masa sadrži pukotine, slojevitost, rasjede i ispune, pa je njena deformabilnost često izraženo nelinearna, anizotropna i zavisna od razmjere ispitivanja. Zbog toga modul stijenske mase nije jedna univerzalna konstanta, već rezultat koji mora biti vezan za metodu, pravac, nivo opterećenja i interval napona [Jaeger, Cook i Zimmerman, 2007; Palmström i Singh, 2001].

Pri prvom opterećenju dio deformacije nastaje zatvaranjem prethodno otvorenih pukotina, nalijeganjem kontaktnih površina i prilagođavanjem sistema za opterećenje. Pri rasterećenju se vraća samo dio ukupne deformacije. Preostali dio predstavlja trajnu, odnosno nepovratnu komponentu u okviru sprovedenog ciklusa.

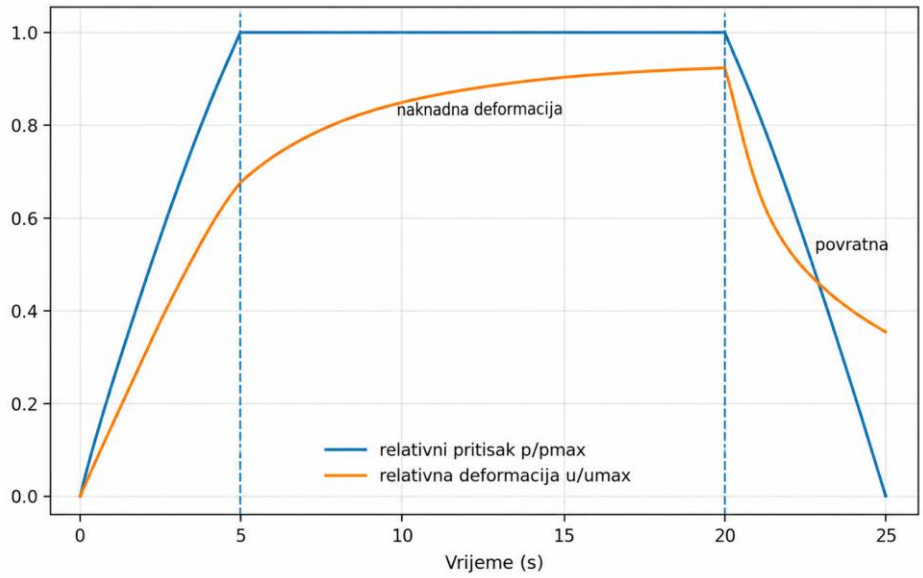


Slika 8.1. Tipičan ciklus opterećenja i rasterećenja sa povratnom i trajnom komponentom deformacije. Autorska nastavna šema.

8.1.1 Istovremena i naknadna deformacija

Ako se pritisak brzo dovede do zadate vrijednosti i zatim održava konstantnim, odmah se javlja istovremena deformacija, a zatim dodatna deformacija koja se razvija vremenom. Ova naknadna komponenta može biti posljedica viskoznog ponašanja ispuna, progresivnog

zatvaranja diskontinuiteta i lokalnih mikrolomova. Zbog toga se pri terenskim ispitivanjima uz svaku stepenicu opterećenja moraju registrovati i vrijeme i deformacija.



Slika 8.2. Šematski razvoj istovremene, naknadne i povratne deformacije tokom jednog ciklusa.

8.2 Terenska ispitivanja deformabilnosti

ISRM preporučuje više postupaka za određivanje deformabilnosti stijenske mase in situ: površinsko opterećenje pločom, opterećenje u bušotini, radijalno opterećenje, velike ravne jastuke i dilatometarske metode. Izbor zavisi od dostupnosti istražne galerije, očekivane anizotropije, zapremine stijenske mase koju treba obuhvatiti i projektovanog naponskog nivoa [ISRM, 1979; Ulusay i Hudson, 2007].

Metoda hidrauličkog jastuka korišćena u ovoj vježbi spada u direktna terenska ispitivanja u kojima se poznati pritisak prenosi na stijensku masu, a pomjeranja se mjere u funkciji vremena. Posebno je važno dobro pripremiti mjerno mjesto, proveriti nalijeganje jastuka i mjernih baza i sprovesti više ciklusa opterećenja i rasterećenja. Prvi ciklus je često snažnije pogođen zatvaranjem pukotina nastalih relaksacijom i miniranjem.

Napomena: *ASTM D4394-17 i D4395-17, koji su se često navodili za pločasta in situ ispitivanja, povučeni su 2026. godine. U ovoj vježbi se kao glavni metodološki oslonac zadržavaju ISRM Suggested Methods i stručna literatura, uz obavezno navođenje konkretne procedure koja je stvarno primjenjena.*

8.3 Moduli deformacije i elastičnosti

U starijoj regionalnoj praksi koriste se oznake D za modul deformacije i E za modul elastičnosti/povratne deformacije. Suština je da se D vezuje za ukupnu deformaciju u

izabranom intervalu opterećenja, dok se E određuje iz povratne grane. Vrijednosti zavise od definicije intervala, geometrijskog faktora i načina mjerenja, pa uz svaki rezultat treba navesti kako je izračunat.

$$D = \frac{k \cdot \Delta p}{\Delta u},\ E = \frac{k \cdot \Delta p}{\Delta u_e}.$$

Ovde je k geometrijsko-kalibracioni faktor iz usvojene interpretacije opita, Δu ukupna promjena pomjeranja u datom intervalu, a Δu_e povratna komponenta. Ne treba prenositi vrijednost k sa jednog tipa opita na drugi bez odgovarajuće teorijske ili kalibracione osnove.

8.4 Dinamički modul iz brzina P i S talasa

Ako su poznate gustina ρ i brzine longitudinalnih (V_p) i transverzalnih (V_s) talasa, za homogenu izotropnu elastičnu sredinu mogu se izračunati Poasonov koeficijent i dinamički Jungov modul. Dinamički modul obično nije jednak statičkom modulu stijenske mase, jer seizmički talasi predstavljaju veoma mala i brza ciklična naprezanja i mogu biti manje osjetljivi na iste diskontinuitete koji kontrolišu statičku deformaciju.

$$\nu = \frac{\left(V_p^2 - 2V_s^2\right)}{2\left(V_p^2 - V_s^2\right)},$$

$$E_{dyn} = \frac{\rho \cdot V_s^2 \left(3V_p^2 - 4V_s^2\right)}{\left(V_p^2 - V_s^2\right)}.$$

8.4.1 Statička i dinamička deformabilnost stijenske mase

Pri tumačenju deformabilnosti važno je razlikovati statički i dinamički odgovor stijenske mase. Statički modul dobija se iz odnosa promjene napona i deformacije tokom dovoljno sporog opterećenja, kada diskontinuiteti, ispune i kontaktne površine imaju vremena da reaguju na nametnuto opterećenje. Dinamički modul se, nasuprot tome, određuje iz brzina prostiranja elastičnih talasa i predstavlja odgovor pri veoma malim amplitudama deformacije i veoma kratkom trajanju opterećenja. Zbog toga dvije vrijednosti ne opisuju potpuno isti mehanički režim i ne treba ih neposredno izjednačavati [Jaeger, Cook i Zimmerman, 2007; Ulusay i Hudson, 2007].

U raspucaloj stijenskoj masi statički modul je često manji od dinamičkog. Pri statičkom opterećenju dolazi do zatvaranja otvorenih pukotina, klizanja i mikropomjeranja duž diskontinuiteta, lokalnog drobljenja neravnina i deformisanja ispune. Sve te komponente povećavaju ukupnu mjerenu deformaciju. Elastični talas, naročito pri maloj amplitudi, može

da prođe kroz isti sistem sa relativno malim relativnim pomjeranjima zidova pukotina, pa rezultat više odražava krutost intaktnog skeleta i zatvorenih kontakata. Razlika između statičkog i dinamičkog modula zato je informacija o strukturi stijenske mase, a ne greška koju treba nužno ukloniti.

Odnos dinamičkog i statičkog modula nije univerzalna konstanta. On zavisi od stepena ispucalosti, otvorenosti i ispune diskontinuiteta, naponskog nivoa, zasićenja, frekvencije pobude i zapremine obuhvaćene mjerenjem. U kompaktnoj, malo raspucaloj stijeni vrijednosti se mogu relativno približiti, dok u jako razlomljenoj ili alterisanoj stijenskoj masi razlika može biti velika. Zbog toga je u izvještaju potrebno navesti metod, interval opterećenja i stanje stijenske mase, a eventualne korelacije između E_{dyn} i E_{st} koristiti samo kada su lokalno provjerene.

Za statički odgovor moguće je definisati više modula. Sekantni modul predstavlja nagib prave koja spaja dvije izabrane tačke na krivoj napon-deformacija, tangentni modul opisuje trenutni nagib krive, dok se modul rasterećenja određuje sa povratne grane. U nelinearnom materijalu te vrijednosti mogu biti različite i sve mogu biti ispravne ako je jasno navedeno kako su određene. U okviru terenskog opita hidrauličkim jastukom posebno je korisno porediti modul dobijen pri prvom opterećenju sa modulima iz narednih ciklusa, jer se na taj način može odvojiti početno nalijeganje i zatvaranje pukotina od stabilnijeg povratnog odgovora.

$$E_{\text{sec}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon},\ E_{\tan} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}.$$

Poasonov koeficijent takođe zavisi od načina određivanja. U idealnoj izotropnoj elastičnoj sredini on povezuje poprečnu i uzdužnu deformaciju, ali u stijenskoj masi mjerena vrijednost može odražavati orijentaciju pukotina, bočno klizanje blokova i lokalnu heterogenost. Zbog toga jedna vrijednost *v* nije dovoljna da opiše izrazito anizotropnu stijensku masu. Kada se iz V_p i V_s računa dinamički Poasonov koeficijent, dobijeni rezultat pripada malodeformacionom dinamičkom režimu i mora se tako i tumačiti.

8.4.2 Uticaj diskontinuiteta, anizotropije i efekta razmjere

Najvažnija razlika između intaktne stijene i stjenske mase potiče od diskontinuiteta. Pukotine, slojne površine, folijacija i rasjedi mogu imati mnogo manju normalnu i smičuću krutost od intaktnog materijala između njih. Kada je opterećenje približno normalno na dominantan sistem pukotina, značajan dio deformacije potiče od njihovog zatvaranja. Kada je opterećenje povoljno orijentisano za smicanje, mogu se javiti klizanje i dilatancija duž kontakata. Zbog

toga deformabilnost zavisi ne samo od broja diskontinuiteta već i od njihove prostorne orijentacije u odnosu na pravac opterećenja.

Anizotropija znači da ista stijenska masa može pokazati različitu krutost u različitim pravcima. Kod slojevitih i škriljavih stijena modul mjeren normalno na slojevitost može znatno da se razlikuje od modula mjerenog paralelno sa njom. Sličan efekat nastaje i u masivu sa jednim dominantnim sistemom subparalelnih pukotina. U takvim uslovima izotropni elastični model može poslužiti za početnu procjenu, ali za pouzdanu analizu treba razmotriti ortotropni ili drugi anizotropni model sa različitim parametrima u karakterističnim pravcima.

Efekat razmjere dodatno komplikuje poređenje rezultata. Laboratorijski uzorak obuhvata mali volumen i često samo dio diskontinuiteta, dok terenski opit zahvata veću zapreminu i uključuje više pukotina, blokova i slabijih zona. Zbog toga laboratorijski modul intaktne stijene može biti znatno veći od terenskog modula stijenske mase. Sa povećanjem ispitivane zapremine rezultat postaje osjetljiviji na prostornu raspodjelu diskontinuiteta, sve dok se ne dostigne razmjera na kojoj je posmatrani volumen dovoljno reprezentativan za konkretan problem.

Pojam reprezentativne elementarne zapremine koristan je za razumijevanje ovog problema. Ako je ispitivani volumen manji od karakterističnog razmaka između glavnih diskontinuiteta, rezultat može zavisiti od slučajnog položaja jedne ili nekoliko pukotina. Kada se obuhvati dovoljan broj strukturnih elemenata, prosječne osobine postaju stabilnije. Međutim, kod vrlo nehomogenih masiva sa velikim rasjedima ili zonama drobljenja možda ne postoji jedinstvena razmjera na kojoj se ponašanje može opisati jednim modulom za cijeli objekat.

Praktična posljedica je da se mjesto i geometrija terenskog opita moraju birati u odnosu na projektni problem. Ispitivanje na maloj površini može biti odgovarajuće za lokalni kontakt podgrade i stijene, ali ne mora predstavljati deformabilnost velikog brdskog masiva oko dubokog tunela ili temelja velike brane. Obrnuto, pretjerano veliko ispitivano područje može uključiti geološke elemente koji nisu relevantni za lokalnu zonu konstrukcije. Rezultat zato uvijek treba povezati sa zapreminom i pravcem stijenske mase koje opit stvarno zahvata [Palmström i Singh, 2001].

8.4.3 Nelinearnost, zatvaranje pukotina i zavisnost od naponskog nivoa

Kriva napon-deformacija stijenske mase često je nelinearna već pri relativno malim opterećenjima. U početnom dijelu opterećenja dominira zatvaranje otvorenih ili slabo nalegnutih pukotina, pa je prividna krutost mala i deformacija raste brzo. Sa povećanjem pritiska kontakti postaju potpuniji, pukotine se zatvaraju i krutost se povećava. U srednjem

intervalu odgovor može biti približno linearan. Pri još većim naponima može doći do stvaranja novih mikropukotina, smicanja duž postojećih diskontinuiteta ili lokalnog drobljenja, nakon čega krutost ponovo opada.

Zbog takvog ponašanja vrijednost modula zavisi od izabranog intervala napona. Modul određen između 1 i 3 MPa ne mora biti jednak modulu između 10 i 20 MPa, čak ni na istom mjernom mestu. To je posebno važno kada se laboratorijski ili terenski rezultat prenosi u numerički model. Najprikladniji je parametar određen u opsegu napona koji je što bliži očekivanom radnom opsegu konstrukcije. Ako se koristi jedna konstantna vrijednost u širokom rasponu napona, treba jasno navesti da je riječ o ekvivalentnoj linearnoj aproksimaciji.

Ciklusi opterećenja i rasterećenja daju dodatne informacije. Površina petlje na $p-u$ dijagramu predstavlja energiju disipiranu usljed trenja, klizanja, mikrolomova i viskoznog ponašanja. Ako se u ponovljenim ciklusima petlja smanjuje i povratna grana postaje strmija, sistem se postepeno prilagođava opterećenju: zatvaraju se pukotine, poboljšava kontakt jastuka i podloge i smanjuje udio nepovratnih pomjeranja. Ako se, naprotiv, trajna deformacija povećava iz ciklusa u ciklus, to može ukazivati na progresivno oštećenje ili aktiviranje slabije strukture.

Prvi ciklus se zato često ne koristi kao jedini osnov za projektni modul. On je naročito osjetljiv na stanje površine, relaksaciju stijenske mase nakon iskopa i na kvalitet kontakta između opreme i stijene. Naredni ciklusi obično bolje prikazuju ponovljivi odgovor već „nalegnutog" sistema. Ipak, prvi ciklus nije bezvrijedan; njegova velika nepovratna komponenta može ukazati na izrazitu otvorenost diskontinuiteta ili na značajno oštećenje zone uz iskop.

Pri interpretaciji je korisno razdvojiti ukupno pomjeranje na elastično-povratnu i nepovratnu komponentu. U idealnom elastičnom slučaju rasterećenje bi vratilo sistem u početni položaj. U realnoj stijenskoj masi nakon rasterećenja ostaje rezidualno pomjeranje. Odnos trajne i ukupne deformacije može se koristiti kao jednostavan indikator stepena prilagođavanja masiva tokom ciklusa, ali ne predstavlja samostalni kriterijum kvaliteta stijenske mase.

8.4.4 Vremenski zavisne deformacije i uticaj vode

Deformacija ne mora prestati kada se pritisak zadrži konstantnim. Naknadno pomjeranje može nastati zbog puzanja intaktnog materijala, viskoznog ponašanja glinovite ili zdrobljene ispune, sporog klizanja duž hrapavih kontakata, redistribucije lokalnih napona i postepenog istiskivanja vode iz pukotina. Zato vrijeme predstavlja ravnopravnu mjernu veličinu u

terenskom opitu. Očitavanje odmah nakon promjene pritiska opisuje trenutni dio odgovora, dok niz naknadnih očitavanja pokazuje da li se deformacija stabilizuje ili nastavlja da raste.

Vremenski zavisno ponašanje može se kvalitativno podijeliti na trenutnu deformaciju, primarnu usporavajuću deformaciju i, u nepovoljnim uslovima, dugotrajno puzanje. U mnogim čvrstim stijenskim masama vremenski efekti pri umjerenim naponima su mali, ali u masivima sa glinovitim ispunama, solima, evaporitima, alterisanim zonama ili jako opterećenim diskontinuitetima mogu biti projektantski veoma važni. Zbog toga trajanje svake stepenice opterećenja treba da bude dovoljno da se prepozna trend stabilizacije, a ne samo da se zabilježi jedno trenutno očitavanje.

Voda utiče na deformabilnost na više načina. Povećanje pornog pritiska smanjuje efektivne normalne napone na diskontinuitetima i može olakšati klizanje. Zasićenje nekih ispuna smanjuje njihovu smičuću krutost, dok hemijska interakcija vode sa glinovitim mineralima može dovesti do bubrenja i dodatnog omekšanja. Sa druge strane, voda u zatvorenim pukotinama utiče i na prostiranje elastičnih talasa, pa promjena zasićenja može promijeniti V_p i V_s bez odgovarajuće promjene statičke krutosti.

Temperatura takođe može biti značajna kod dubokih objekata, podzemnih skladišta i hidroenergetskih postrojenja. Termičko širenje minerala i razlike njihovih koeficijenata širenja mogu mijenjati širinu pukotina i kontaktne sile. Ako se deformabilnost mjeri u uslovima koji znatno odstupaju od budućeg temperaturnog režima objekta, rezultat treba koristiti oprezno. U većini nastavnih zadataka ovi efekti se zanemaruju, ali u realnom projektu moraju biti prepoznati kada su relevantni.

Kod opita sa hidrauličkim jastukom vremenske krive $u(t)$ omogućavaju da se razlikuje gotovo trenutni elastični odgovor od sporije komponente. Ako se na istoj stepenici pritiska pomjeranje brzo približi stabilnoj vrijednosti, može se smatrati da je vremenski efekat za dati interval mali. Ako se pomjeranje nastavlja bez jasnog platoa, modul izračunat samo iz ranog očitavanja može precjeniti dugotrajnu krutost stijenske mase.

8.4.5 Izbor reprezentativnog modula i kontrola kvaliteta rezultata

Cilj terenskog ispitivanja nije samo dobijanje jedne brojčane vrijednosti, već izbor parametra koji odgovara konkretnom inžinjerskom modelu. Za proračun deformacija oko tunela može biti važan modul u opsegu oslobađanja i ponovnog opterećenja, dok je za temelj brane relevantan modul pri rastućem pritisku i pri pravcu opterećenja koji odgovara prenosu sila sa objekta na

masiv. Zato se „modul stijenske mase” ne smije posmatrati kao univerzalna oznaka bez informacije o metodi i naponskom intervalu.

Za studentsku obradu rezultata ove vježbe najvažnije je da se zadrži slijed mjerenja, razlikuju ciklusi opterećenja i rasterećenja, izdvoje trenutna i naknadna pomjeranja, i da se modul računa samo za jasno definisan interval. Rezultat treba predstaviti zajedno sa jedinicama, geometrijskim faktorom, oznakom mjerne baze i naponskim rasponom. Tek tako brojčana vrijednost postaje provjerljiv inžinjerski podatak.

Napomena za interpretaciju: visoka vrijednost modula sama po sebi ne znači da je stijenska masa „dobra”, niti niska vrijednost automatski znači nestabilnost. Deformabilnost mora da se posmatra zajedno sa čvrstoćom, naponskim stanjem, orijentacijom diskontinuiteta, prisustvom vode i zahtjevima konkretnog objekta.

8.5 Obrada rezultata opita hidrauličkog jastuka

- Vrijeme iz zapisnika prevesti u kontinuiranu vremensku osu; duplirana vremena na prelazu stepenice zadržati kao odvojena mjerenja prije i poslije promjene pritiska.
- Nacrtati $p-t$, u_s-t i u_o-t dijagrame. Na njima označiti trenutke promjene stepenice opterećenja.
- Nacrtati p-u_5 i p-u_0 dijagrame redoslijedom mjerenja, tako da se vide petlje opterećenja i rasterećenja.
- Za izabrane cikluse odrediti ukupnu, povratnu i trajnu komponentu deformacije. Prvi ciklus tumačiti oprezno zbog nalijeganja i zatvaranja pukotina.
- Prije proračuna modula provjeriti nelogične skokove i moguće greške prepisivanja u zapisniku; sumnjive vrijednosti ne mijenjati bez provjere primarnog mjernog lista.

DOPUNSKI TEORIJSKI OPIS

Pojam deformabilnosti i različiti moduli

Deformabilnost opisuje odnos između promjene napona i nastale deformacije. U idealno linearno elastičnom materijalu taj odnos se može opisati jednim Youngovim modulom E i Poasonovim koeficijentom ν. Stijenska masa, međutim, često pokazuje nelinearan odgovor zbog zatvaranja pukotina, klizanja duž diskontinuiteta i razvoja novih oštećenja. Zato vrijednost modula zavisi od dijela krive napon-deformacija iz kog je određena. Tangentni, sekantni i srednji modul mogu dati različite brojeve za isti opit, pa metoda definisanja mora biti navedena uz rezultat.

Treba razlikovati modul intaktne stijene od modula stijenske mase. Laboratorijski uzorak jezgra obuhvata mali volumen i uglavnom ne sadrži veće diskontinuitete. Terenski opit zahvata znatno veći volumen i uključuje pukotine, zone trošenja i nehomogenost. Zbog toga je deformacioni modul stijenske mase često niži od modula intaktne stijene. Razlika nije greška mjerenja, već posljedica efekta razmjere i drugačijeg reprezentativnog volumena.

Deformabilnost je važna čak i kada je čvrstoća dovoljna. Tunel može ostati stabilan bez globalnog loma, ali prevelike konvergencije mogu oštetiti podgradu ili instalacije. Temelj na stijeni može imati veliku rezervu nosivosti, a ipak razviti neprihvatljiva diferencijalna pomjeranja ako se oslanja na zone različite krutosti. Zato se u projektovanju čvrstoća i deformabilnost tretiraju kao odvojeni, iako povezani aspekti ponašanja.

Diskontinuiteti, anizotropija i ekvivalentni kontinuum

Diskontinuiteti smanjuju krutost jer omogućavaju zatvaranje, otvaranje i klizanje bez potrebe da se značajno deformiše intaktni materijal između njih. Pri malim normalnim naponima otvorene pukotine mogu dati vrlo nisku početnu tangentnu krutost. Sa povećanjem pritiska pukotine se zatvaraju i ukupna stijenska masa postaje kruća. Zbog toga modul može rasti sa naponskim nivoom, što je suprotno pretpostavci konstantnog linearnog modula.

Ako su diskontinuiteti dominantno orijentisani, deformabilnost postaje anizotropna. Krutost normalno na sistem pukotina može biti znatno manja od krutosti paralelno sa njim, dok smična deformabilnost zavisi od hrapavosti i kontakta duž ravni. U takvom slučaju jedan izotropni modul predstavlja samo ekvivalentnu aproksimaciju. Za tunele, kaverne ili temelje orijentisane u odnosu na jasnu strukturu može biti potrebno koristiti ortotropni ili diskontinuumski model.

Koncept ekvivalentnog kontinuuma koristan je kada je broj diskontinuiteta dovoljno velik da se njihovo zajedničko djelovanje može statistički homogenizovati na razmjeri objekta. Ako nekoliko pojedinačnih diskontinuiteta direktno kontroliše pomjeranje ili stabilnost, eksplicitno modeliranje tih ravni je fizički smislenije. Izbor između kontinuumskog i diskontinuumskog pristupa nije samo softverska odluka, već zavisi od odnosa razmjere objekta, razmaka pukotina i njihovog kontinuiteta.

Terenska ispitivanja i efekat razmjere

Terenska ispitivanja deformabilnosti nastoje da opterete znatno veći volumen stijene nego laboratorijski uzorak. Opiti ravnom pločom, radijalnim presama, hidrauličkim jastucima ili

dilatometrima razlikuju se po geometriji opterećenja i dubini zahvaćenog volumena. Dobijeni modul zato nije samo svojstvo materijala nego i rezultat interakcije ispitnog sistema sa geometrijom pukotina oko mjesta mjerenja. Pri poređenju metoda treba voditi računa o pravcu opterećenja, veličini opterećene površine i naponskom opsegu.

Efekat razmjere proizlazi iz činjenice da veći volumen ima veću vjerovatnoću da obuhvati slabu zonu ili reprezentativniji skup diskontinuiteta. Modul dobijen na malom, kvalitetnom jezgru može zato biti sistematski viši od terenskog modula. Sa povećanjem ispitne skale rezultat često teži stabilnijoj vrijednosti kada se dostigne reprezentativni elementarni volumen. Međutim, u izrazito heterogenim stijenskim masama takva stabilizacija može izostati, pa je bolje opisati raspon nego jednu jedinu vrijednost.

Terenski opiti su skupi i broj mjerenja je ograničen, zbog čega je izbor lokacija presudan. Ispitivati samo najkvalitetniju, pristupačnu stijenu može dati nereprezentativno optimističan rezultat. Lokacije treba povezati sa geološkim modelom i zonama koje su relevantne za objekat. Korisno je kombinovati direktna deformaciona mjerenja sa geofizičkim podacima i kartiranjem pukotina, jer različite metode osvjetljavaju različite razmjere i mehanizme ponašanja.

Dinamički i statički modul

Dinamički modul procjenjuje se iz brzina elastičnih talasa i gustine materijala. P i S talasi izazivaju vrlo male deformacije i vrlo kratko trajanje opterećenja, pa se mjeri početna, mala-deformaciona krutost. Statički opiti obično obuhvataju veće deformacije i dovoljno vremena za zatvaranje, klizanje ili viskozne procese duž pukotina. Zato je dinamički modul često veći od statičkog. Razlika nije nužno znak greške; ona odražava različit nivo deformacije i različit fizički režim mjerenja.

Brzina talasa je veoma osjetljiva na otvorenost pukotina, zasićenje i pravac propagacije. Pukotine normalne na pravac talasa smanjuju brzinu više nego pukotine paralelne sa njim. Voda u pukotinama može povećati P-brzinu jer je tečnost mnogo manje kompresibilna od vazduha, dok efekat na S-talase može biti drugačiji. Zato promjena V_p / V_s ne treba automatski da se tumači samo kao promjena čvrstoće; ona može odražavati i promjenu zasićenja ili strukture pukotina.

Korelacije između dinamičkog i statičkog modula korisne su kada su kalibrisane za lokalnu geologiju. Univerzalna konverzija nije pouzdana jer odnos zavisi od poroznosti, pukotina,

naponskog nivoa i razmjere. Najbolji pristup je imati makar ograničen broj parnih mjerenja na istoj stijenskoj masi, a zatim geofizičke podatke koristiti za prostorno proširenje informacija. Na taj način velika pokrivenost dinamičkih metoda dopunjuje direktniju, ali skuplju statičku karakterizaciju.

Nelinearnost, voda, vrijeme i izbor projektnog modula

Projektni modul treba da odgovara naponskom i deformacionom nivou stvarnog objekta. Modul određen pri vrlo malim deformacijama može precijeniti krutost pri velikim konvergencijama, dok modul određen blizu loma može biti prenizak za početnu elastičnu fazu. Nelinearni modeli zato ponekad koriste modul koji zavisi od napona ili od deformacije. Kada se ipak koristi jedan konstantan modul, treba ga birati kao reprezentativnu sekantu u opsegu koji je relevantan za projektni problem.

Voda utiče na deformabilnost preko omekšavanja ispune diskontinuiteta, smanjenja efektivnog normalnog napona i hemijskog trošenja. U nekim stijenskim masama promjena nivoa podzemne vode može zato povećati deformacije bez promjene spoljašnjeg opterećenja. Dugotrajno puzanje dodatno je važno u evaporitima, glinovitim stijenama i slabije cementiranim materijalima. Kratkotrajan opit tada nije dovoljan za prognozu ponašanja tokom više godina.

Izbor projektne vrijednosti treba da uključi prostornu varijabilnost i nesigurnost. Umjesto automatskog uzimanja aritmetičkog prosjeka, korisno je odrediti koje zone najviše utiču na deformaciju konstrukcije i kakav je mehanizam opterećenja. U numeričkom modelu često je bolje zonirati stijensku masu na nekoliko geološki smislenih domena sa različitim modulima nego koristiti jednu preciznu vrijednost za cijeli prostor. Monitoring deformacija tokom izvođenja omogućava da se ti parametri naknadno provjere i, po potrebi, kalibrišu.

8.6 Osnovni podaci

U istražnoj galeriji G-2 izvršeno je ispitivanje deformabilnosti stijenske mase metodom hidrauličkog jastuka. U tabelama 8.1a i 8.1b dati su podaci iz izvornog zapisnika. Vrijeme je prikazano u formatu hh:mm, pritisak u 10^5 Pa, a deformacije u μm.

Tabela 8.1a. Zapisnik mjerenja, prvi dio (08:00–11:50)

Vrijeme t	p (10^5 Pa)	u_5 (µm)	u_0 (µm)
08:00	0	0	—
08:00	1	6,8	5,1
08:05	1	7,0	5,5
08:10	1	7,2	5,7
08:15	1	7,2	5,7
08:25	1	7,2	5,7
08:25	3	58,0	43,7
08:30	3	62,2	46,9
08:35	3	64,2	48,3
08:40	3	66,2	49,7
08:50	3	66,4	51,1
08:50	5	111,2	80,3
08:55	5	119,4	86,3
09:00	5	121,0	87,5
09:05	5	121,4	87,9
09:10	5	121,4	87,9
09:10	10	239,4	179,9
09:15	10	252,6	189,7
09:20	10	256,8	192,3
09:25	10	263,8	198,1
09:30	10	270,0	202,7
09:35	10	274,0	205,7
09:45	10	274,2	206,5
09:45	5	252,2	168,3
09:50	5	219,0	164,5
09:55	5	213,8	160,7
10:05	5	213,0	160,3
10:05	3	181,4	136,7
10:10	3	173,2	130,7
10:15	3	172,2	129,3
10:25	3	171,8	129,3
10:25	1	107,6	81,3
10:30	1	100,6	75,3
10:35	1	96,6	75,3
10:40	1	93,6	70,7
10:50	1	92,4	69,3

Vrijeme t	p (10^5 Pa)	u_5 (µm)	u_0 (µm)
10:50	5	140,2	105,3
10:55	5	141,2	105,9
11:00	5	141,6	106,7
11:05	5	142,4	106,9
11:15	5	143,2	107,3
11:15	10	272,8	204,3
11:20	10	287,2	216,3
11:25	10	287,8	216,5
11:30	10	288,2	216,7
11:40	10	288,2	216,7
11:40	20	400,7	286,3
11:45	20	435,0	296,3
11:50	20	447,0	406,3

Tabela 8.1b. Zapisnik mjerenja, drugi dio (11:50–16:00)

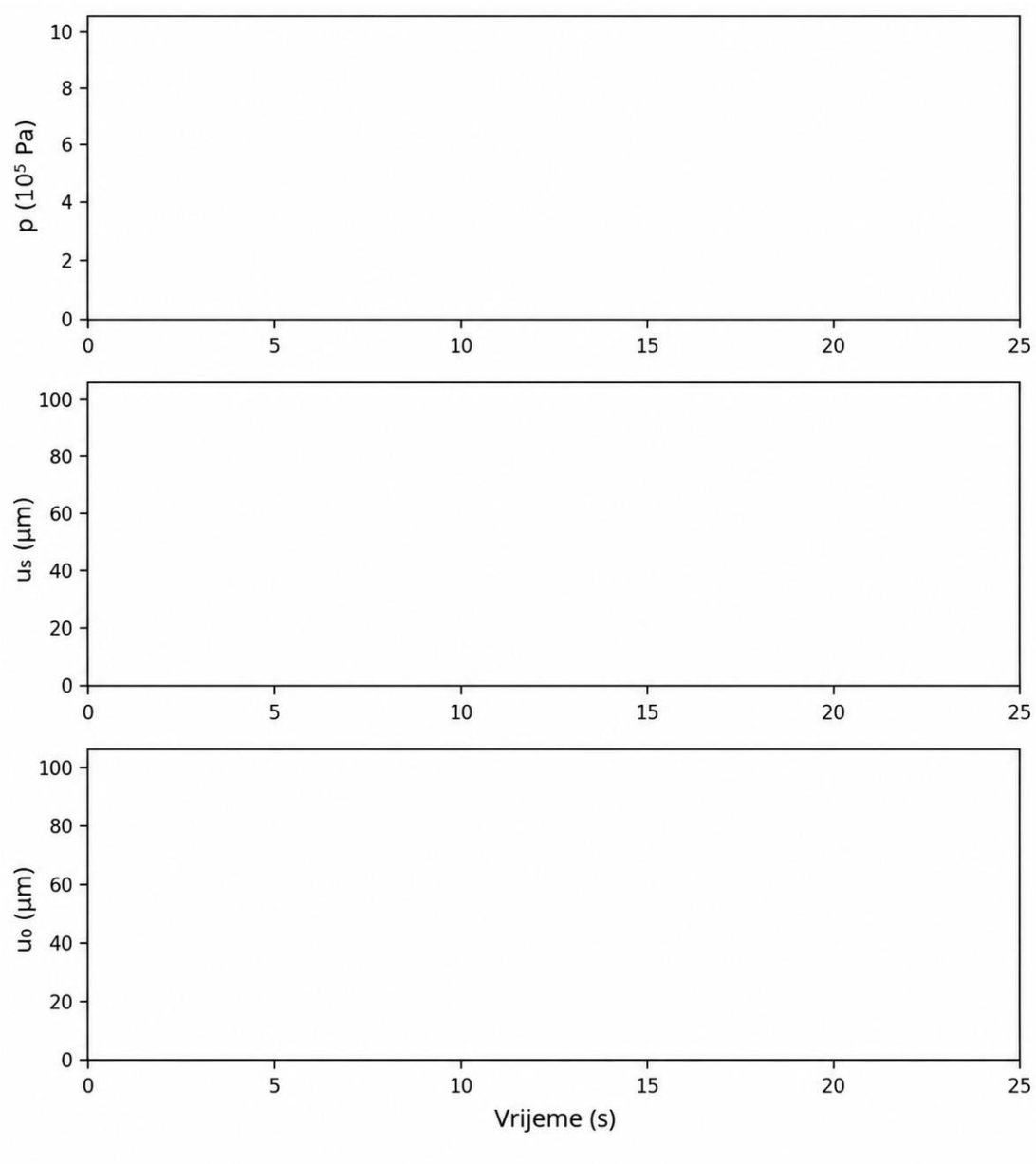
Vrijeme t	p (10^5 Pa)	u_5 (µm)	u_0 (µm)
11:50	20	411,2	337,7
11:55	20	441,6	360,3
12:00	20	445,6	361,7
12:10	20	447,8	362,3
12:10	10	440,0	324,3
12:15	10	440,8	318,3
12:20	10	430,0	315,3
12:30	10	435,8	315,3
12:30	5	373,0	249,3
12:35	5	372,8	243,3
12:40	5	371,4	241,3
12:50	5	370,8	246,7
12:50	1	225,8	169,7
12:55	1	214,6	160,3
13:00	1	203,4	151,7
13:05	1	199,4	150,3
13:15	1	190,2	150,3
13:15	10	445,2	313,3
13:20	10	443,0	316,3
13:25	10	445,6	328,7
13:30	10	432,4	332,3
13:40	10	435,8	333,7

Vrijeme t	p (10^5 Pa)	u_5 (µm)	u_0 (µm)
13:40	20	606,8	154,3*
13:45	20	625,2	498,3
13:50	20	644,6	521,3
13:55	20	646,2	522,7
14:05	20	647,6	524,3
14:05	40	957,8	718,7
14:10	40	1001,6	754,7
14:15	40	1079,2	781,7
14:20	40	1082,8	840,3
14:25	40	1071,0	845,3
14:30	40	1078,4	859,3
14:40	40	1082,4	863,3
14:40	20	996,8	743,3
14:45	20	990,4	742,7
14:50	20	987,6	741,3
15:00	20	981,4	736,3
15:00	10	804,8	603,3
15:05	10	790,2	592,7
15:10	10	783,4	588,3
15:20	10	775,2	582,3
15:20	1	552,4	391,7
15:25	1	508,2	381,3
15:30	1	497,8	371,7
15:35	1	489,8	367,7
15:40	1	481,6	361,7
15:50	1	466,4	350,3
16:00	1	459,2	345,3

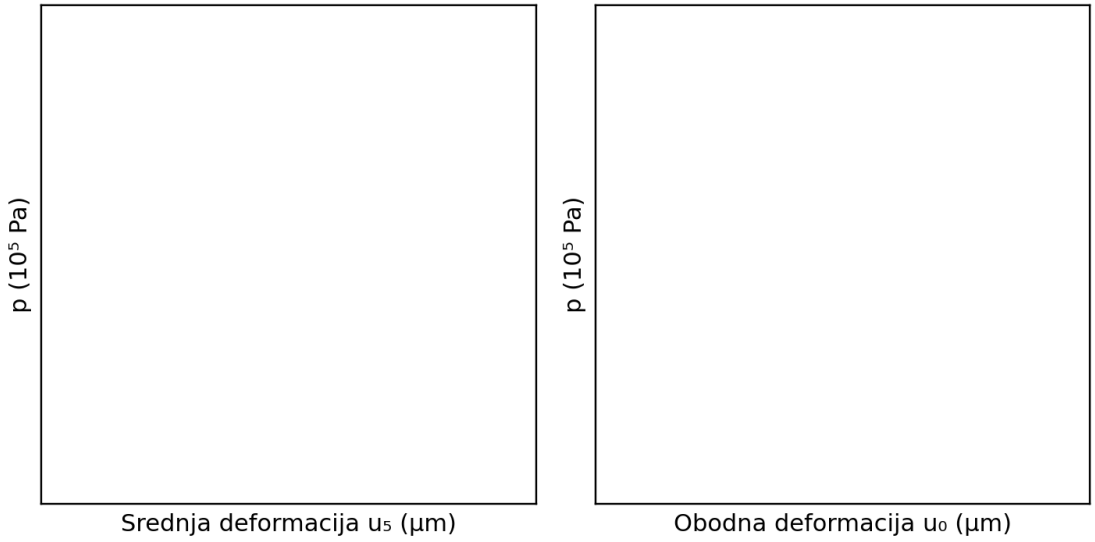
Napomena: *Oznaka * uz u_0 = 154,3 µm u 13:40 prenijeta je iz izvornog dokumenta jer je vrijednost izrazito nekonzistentna sa susjednim očitavanjima. Prije konačnog proračuna potrebno je provjeriti primarni zapisnik; vrijednost nije automatski korigovana.*

8.7 Radni dijagrami

Na sljedećim dijagramima student može da ucrta podatke ili da iste grafike izradi u računarskom programu. Pri povezivanju tačaka mora se poštovati hronološki red mjerenja, posebno na prelazima između stepenica opterećenja.



Slika 8.3. Radni dijagrami $p-t$, u_s-t *i* u_o-t .



Slika 8.4. Radni dijagrami $p-u_s$ *i* $p-u_o$ *.*

8.8 Zadatak

- Nacrtati dijagram pritiska na stijensku masu u funkciji vremena.
- Nacrtati dijagrame srednje deformacije u_s i obodne deformacije u_o u funkciji vremena.
- Nacrtati $p-u_s$ *i* $p-u_o$ dijagrame kao putanje mjerenja, sa jasno izdvojenim granama opterećenja i rasterećenja.
- Za najmanje dva kompletna ciklusa odrediti ukupnu, povratnu i trajnu deformaciju i komentarisati promjenu od ciklusa do ciklusa.
- Identifikovati sumnjive podatke i obrazložiti kako bi se provjerili prije korišćenja u proračunu modula.
- U zaključku komentarisati razliku između statičke deformabilnosti stijenske mase i dinamičkog modula dobijenog seizmičkim mjerenjima.

8.9 Riješeni primjer

Sljedeći primjer je ilustrativan i koristi zaseban skup podataka. Za jedan ciklus opterećenja izmjerena su pomjeranja u = 0,00; 0,10; 0,19; 0,27; 0,34 mm pri p = 0; 1; 2; 3; 4 MPa. Pri rasterećenju do p = 0 ostaje u = 0,05 mm.

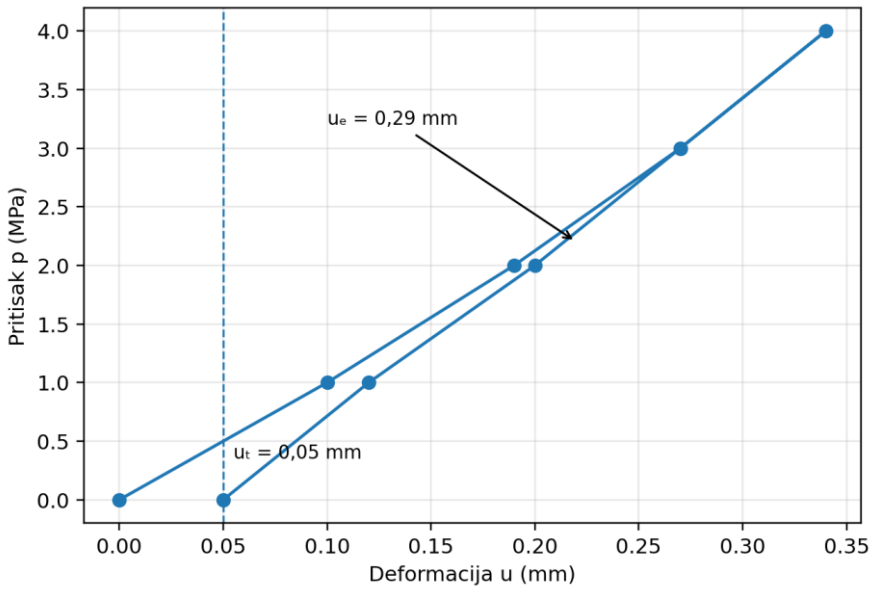
Korak 1 - komponente deformacije

ukupna deformacija pri pmax: u = 0,34 mm

trajna deformacija poslije rasterećenja: u_t = 0,05 mm

povratna deformacija: $u_e = 0{,}34 - 0{,}05 = 0{,}29$ mm

Odnos trajne i ukupne deformacije iznosi 0,05/0,34 ≈ 0,15, odnosno oko 15 %. Ako se u narednim ciklusima taj odnos smanjuje, to ukazuje da se zatvaranje pukotina i nalijeganje sistema postepeno iscrpljuju.



Slika 8.5. $p-u$ petlja za riješen ilustrativni primjer.

Korak 2 - primjer dinamičkog modula

Za $\rho = 2650\,kg/m^3; V_p = 4{,}8\,km/s$ *i* $V_s = 2{,}8\,km/s$ dobijaju se:

$$\nu \approx 0{,}242 \quad E_{dyn} \approx 51{,}6\,GPa. \quad \nu \approx 0{,}242 \qquad \text{Edyn} \approx 51{,}6 \text{ GPa}$$

Ovaj rezultat ne treba direktno izjednačiti sa statičkim modulom stijenske mase iz opita jastukom. Dinamički modul se odnosi na mala, brza elastična naprezanja i najčešće je veći od statičkog modula raspucale stijenske mase.

Zaključak: za pouzdanu ocjenu deformabilnosti važno je koristiti više ciklusa, jasno definisati interval napona i način izračunavanja modula, a sumnjive tačke provjeriti prije numeričke obrade.

Literatura:

1. ASTM International (2017) ASTM D4394-17: Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Rigid Plate Loading Method. Withdrawn 2026.
2. ASTM International (2017) ASTM D4395-17: Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Flexible Plate Loading Method. Withdrawn 2026.

3. Brady, B. H. G., Brown, E. T. (2006) Rock Mechanics for Underground Mining. 3rd ed. Springer, Dordrecht.
4. ISRM (1979) Suggested Methods for Determining In Situ Deformability of Rock. International Society for Rock Mechanics.
5. Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., Zimmerman, R. W. (2007) Fundamentals of Rock Mechanics. 4th ed. Blackwell Publishing, Oxford.
6. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.
7. Palmström, A., Singh, R. (2001) The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. Tunnelling and Underground Space Technology, 16(2), 115-131.
8. Ulusay, R., Hudson, J. A. (eds.) (2007) The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. ISRM Turkish National Group, Ankara.

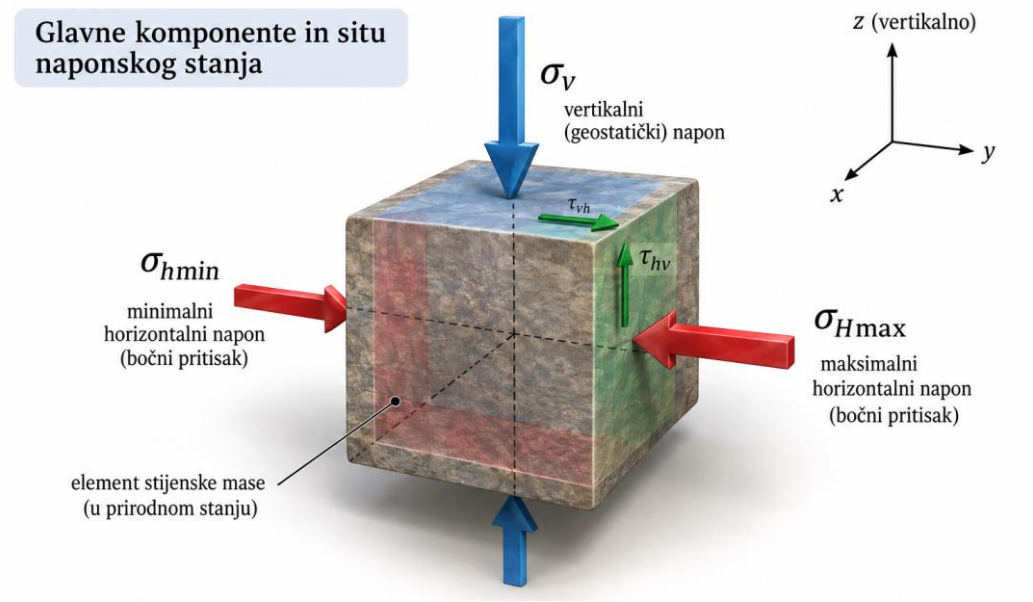
VJEŽBA BR. 9

Primarna naponska stanja u stijenskim masama

9.1 In situ i primarno naponsko stanje

Stijenska masa u prirodi je opterećena prije početka bilo kakvog iskopa. To početno stanje se u savremenoj literaturi najčešće naziva in situ ili pre-iskopno naponsko stanje. U ovoj vježbi zadržava se tradicionalni izraz primarno naponsko stanje. Poslije iskopa nastaje preraspodjela napona, odnosno sekundarno naponsko stanje, koje se obrađuje u Vježbi 10 [Jaeger, Cook i Zimmerman, 2007; Brady i Brown, 2006].

U opštem trodimenzionalnom slučaju naponsko stanje opisuje šest nezavisnih komponenti simetričnog tenzora napona ili, ekvivalentno, tri glavna napona i njihove pravce. U dubinskim inžinjerskim problemima često se koriste oznake σ_v za vertikalni napon, $S_{H\max}$ za maksimalni horizontalni i $S_{h\min}$ za minimalni horizontalni glavni napon.



Slika 9.1. Glavne komponente in situ naponskog stanja.

9.2 Vertikalna komponenta napona

Kada su reljef i bočne promjene gustine zanemarljivi, vertikalna komponenta se može aproksimirati težinom nadsloja. Za slojevitu sredinu koristi se zbir $\gamma_i \ h_i$. Ova aproksimacija je dobra polazna tačka, ali u planinskom reljefu, blizini dubokih dolina i velikih geoloških struktura lokalno naponsko polje može odstupati od jednostavnog modela nadsloja.

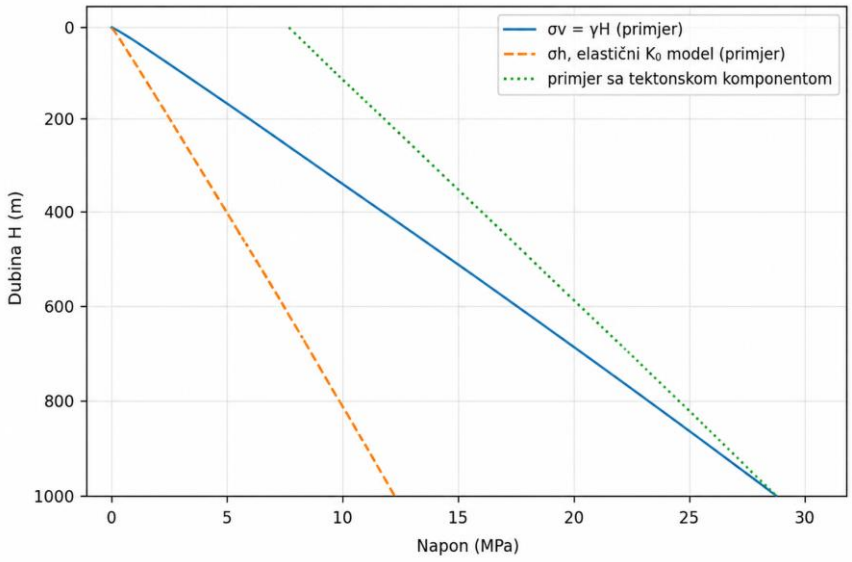
$$\sigma_{v(H)\approx}\int_0^H \rho(z)\cdot g\cdot dz \approx \sum \gamma_i \cdot h_i.$$

9.3 Horizontalni naponi: modeli i ograničenja

Hajmova istorijska hipoteza pretpostavlja približno hidrostatičko stanje na velikim dubinama, pa je $\sigma_h \approx \sigma_v$. Nasuprot tome, u idealizovanom homogenom izotropnom elastičnom masivu bez bočne deformacije dobija se relacija $K_o = \frac{\nu}{(1-\nu)}$, odnosno $\sigma_h = K_o \cdot \sigma_v$. Ove dvije aproksimacije mogu dati veoma različite rezultate i ne treba ih predstavljati kao univerzalne zakone.

$$\text{Hajm: } \sigma_h \approx \sigma_v \quad elastični\ K_o \bmod el : \sigma_h = \frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot \sigma_v.$$

Mjerenja širom svijeta pokazuju da horizontalni naponi mogu biti manji ili veći od vertikalnih, naročito u gornjem dijelu kore. Na njih utiču tektonske sile, erozija i rasterećenje, topografija, geološka struktura, anizotropija, temperaturni efekti i lokalna istorija deformisanja. World Stress Map zato podatke o pravcu i tipu naponskog polja prikuplja iz više nezavisnih indikatora i rangira po kvalitetu [Heidbach i dr., 2016].



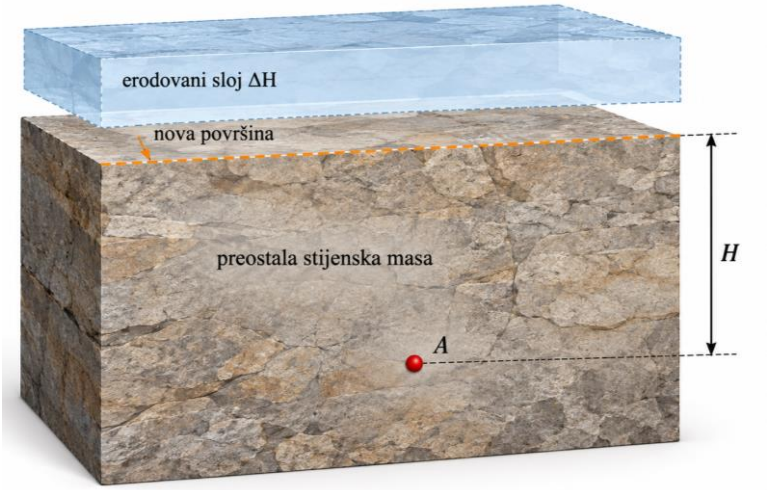
Slika 9.2. Ilustrativno poređenje vertikalnog napona, jednostavnog elastičnog horizontalnog napona i modela sa dodatnom tektonskom komponentom.

9.4 Uticaj erozije i rasterećenja

Erozija uklanja dio nadsloja i neposredno smanjuje vertikalni napon za $\Delta\sigma \approx \gamma \cdot \Delta H$. Ako se za elastični dio rasterećenja pretpostavi bočna deformacija ograničena, promjena horizontalnog

napona može se aproksimirati sa $\Delta\sigma_h \approx \frac{\nu}{(1/\nu)} \cdot \Delta\sigma_v$. Zbog toga horizontalni napon može opasti manje od vertikalnog i nakon dugotrajnog rasterećenja ostati relativno visok. Realna stijenska masa može reagovati neelastično, pukotinski i tektonski, pa je ovaj izraz samo nastavna aproksimacija.

$$\Delta\sigma_v = \gamma \cdot \Delta H \quad \Delta\sigma_h \approx \frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot \Delta\sigma_v.$$



Slika 9.3. Pojednostavljena geometrija rasterećenja erozijom.

9.5 Određivanje in situ napona

Pouzdana procjena naponskog stanja kombinuje geološki model, težinu nadsloja, regionalne podatke i terenska mjerenja. ISRM Rock Stress Estimation smjernice obuhvataju strategiju procjene, overcoring metode, hidrauličko frakturiranje i HTPF, kao i kontrolu kvaliteta. Dodatni indikatori uključuju borehole breakout, drilling-induced tensile fractures, podatke o rasjedima i seizmološka rješenja [ISRM, 2003; Ulusay i Hudson, 2007].

9.5.1 Prostorna priroda naponskog polja i reprezentativnost mjerenja

In situ naponsko stanje je prostorna veličina i ne može se potpuno opisati jednom komponentom napona ili jednim mjerenjem. U opštem slučaju potrebno je odrediti tri glavna napona i njihove pravce, odnosno šest nezavisnih komponenti simetričnog tenzora napona. Zbog toga pojedinačno mjerenje u bušotini najčešće predstavlja samo dio informacije, a kompletna procjena nastaje kombinovanjem više orijentacija mjerenja sa geološkim modelom i podacima o dubini.

Važan problem predstavlja izbor reprezentativne zapremine stijenske mase. Rezultat mjerenja zavisi od toga da li mjerni obuhvat uključuje samo intaktnu stijenu, jednu familiju pukotina ili

veći sistem diskontinuiteta. Na maloj skali lokalni napon može biti poremećen mineralnim zrnom, pukotinom ili zonom alteracije, dok se na većoj skali prosječno naponsko stanje približava stanju relevantnom za tunel, komoru ili rudarsko polje. Zato se veličina mjerne baze i udaljenost od slobodnih površina moraju povezati sa razmjerom problema koji se rješava.

9.5.2 Glavni naponi, orijentacija i odnos horizontalnih komponenti

U dubinskim objektima često se pretpostavlja da je jedan glavni napon približno vertikalan, ali to nije univerzalno pravilo. U područjima izražene tektonike, strmog reljefa ili složenih struktura ose glavnih napona mogu biti nagnute. Horizontalno naponsko stanje tada se opisuje maksimalnom i minimalnom horizontalnom komponentom, $S_{H\max}$ i $S_{H\min}$, kao i azimutom $S_{H\max}$. Razlika između ovih komponenti utiče na orijentaciju koncentracija napona oko budućih podzemnih prostorija.

Količnici $k \cdot H = \frac{S_{H\max}}{\sigma_v}$ i $k \cdot H = \frac{S_{H\min}}{\sigma_v}$ korisni su za poređenje različitih lokacija i dubina. Njihove vrijednosti nisu materijalne konstante: mijenjaju se sa dubinom, tektonskim režimom, erozionom istorijom i geometrijom reljefa. Pri plitkim dubinama čak i relativno umjerena tektonska komponenta može dati veliki količnik horizontalnog i vertikalnog napona, jer je σ_v još mali. Sa porastom dubine doprinos težine nadsloja raste, pa odnos komponenti može postati stabilniji.

Pri interpretaciji je zato korisno odvojiti veličinu napona od njegovog pravca. Dvije lokacije mogu imati slične vrijednosti σ_v, $S_{H\max}$ i $S_{H\min}$, ali različite azimute glavnih napona i samim tim različito očekivano ponašanje tunela istog oblika. Ovakav prikaz predstavlja vezu između primarnog naponskog stanja i sekundarne preraspodjele koja nastaje nakon iskopa [Brady i Brown, 2006; Jaeger, Cook i Zimmerman, 2007].

9.5.3 Overcoring metode i princip oslobađanja napona

Overcoring metode zasnivaju se na kontrolisanom oslobađanju napona oko male mjerne zapremine stijene. U bušotinu se postavi deformacioni senzor, a zatim se oko njega izvodi dodatno jezgro većeg prečnika. Uklanjanjem okolne stijene prvobitni naponi se djelimično oslobađaju i izazivaju mjerljive deformacije. Ako su poznati elastični parametri stijene i geometrija mjernog sistema, iz registrovanih deformacija može se inverzno procijeniti prethodno naponsko stanje.

Prednost overcoring postupka je mogućnost određivanja više komponenti napona iz relativno male mjerne zone. Istovremeno, rezultat je osjetljiv na kvalitet jezgra, anizotropiju, mikroprslina, temperaturu i tačnost elastičnih parametara. Lokalna oštećenja pri bušenju mogu promijeniti odgovor neposredno uz zid bušotine. Zbog toga se mjerenja obično ponavljaju na više dubina i orijentacija, a deformacioni odgovor se poredi sa očekivanim ponašanjem kalibrisanog mjernog sistema.

Kod anizotropne stijene nije dovoljno u proračun uvesti jedan Jungov modul i jedan Poasonov koeficijent. Slojevitost, folijacija ili izražena orijentacija pukotina mogu učiniti da isti naponski inkrement daje različite deformacije u različitim pravcima. U takvim uslovima interpretacija mora koristiti odgovarajući konstitutivni model ili rezultat treba označiti kao aproksimaciju.

9.5.4 Hidrauličko frakturiranje i HTPF

Hidrauličko frakturiranje određuje naponsko stanje izazivanjem kontrolisane pukotine u izolovanom intervalu bušotine. Pritisak fluida se povećava dok ne dođe do iniciranja ili ponovnog otvaranja pukotine. Vrijednosti karakterističnih pritisaka, zajedno sa pritiskom fluida u porama i pretpostavkama o orijentaciji bušotine, koriste se za procjenu minimalnog glavnog napona i drugih komponenti. Metoda je posebno korisna na dubinama gdje je mehaničko oslobađanje jezgra teško izvodljivo.

HTPF pristup koristi postojeće ili novonastale pukotine različitih orijentacija i više mjerenih pritisaka kako bi se rekonstruisao tenzor napona. Njegova snaga je u kombinovanju većeg broja geometrijskih ograničenja, ali uspeh zavisi od pouzdanog određivanja orijentacije pukotina i od pretpostavke da analizirane pukotine zaista reaguju na isto regionalno naponsko polje. ISRM smjernice zato naglašavaju kontrolu postupka, ponovljivost ciklusa i procjenu kvaliteta svakog pojedinačnog testa [ISRM, 2003; Ulusay i Hudson, 2007].

9.5.5 Indirektni pokazatelji naponskog stanja u bušotinama

Kada direktno mjerenje nije moguće, naponsko stanje se može ograničiti indirektnim pokazateljima nastalim tokom bušenja. Borehole breakout predstavlja lokalno lomljenje zida bušotine uslijed koncentracije pritisnih napona. U približno vertikalnoj bušotini i odgovarajućim uslovima, izduženi parovi oštećenja često se razvijaju u pravcu minimalnog horizontalnog napona, pa njihov azimut daje informaciju o orijentaciji $S_{H\max}$. Širina i geometrija breakout zone mogu dodatno ograničiti veličine napona, ali samo uz model čvrstoće zida bušotine.

Drilling-induced tensile fractures su zatezne pukotine koje nastaju kada lokalna tangencijalna naprezanja na zidu bušotine pređu zateznu čvrstoću stijene. Njihov položaj je takođe povezan sa orijentacijom glavnih horizontalnih napona. Za razliku od breakout-a, ove pukotine predstavljaju zatezni odgovor i zato su osjetljive na pritisak u bušotini, porni pritisak, termičke efekte i zateznu čvrstoću stijene. Zajednička interpretacija oba fenomena može dati znatno pouzdaniji pravac naponskog polja nego jedan indikator sam za sebe.

9.5.6 Geološki i seizmološki indikatori regionalnog napona

Na regionalnoj skali pravac savremenog naponskog polja može se procjenjivati iz aktivnih rasjeda, fokalnih mehanizama zemljotresa i deformacionih obrazaca. Seizmološki podaci ne određuju nužno lokalnu veličinu napona u tački budućeg objekta, ali daju važan kontekst o režimu naprezanja i orijentaciji kompresije. Zbog toga regionalni podaci služe kao kontrola konzistentnosti terenskih mjerenja, a ne kao njihova direktna zamjena.

World Stress Map objedinjuje različite indikatore orijentacije i tipa naponskog polja i razvrstava ih prema kvalitetu. Takav pristup pokazuje da podaci različitog porijekla ne nose istu težinu. Dobro dokumentovano mjerenje sa poznatom orijentacijom, dubinom i metodom ima veću interpretativnu vrijednost od pojedinačnog, slabo kontrolisanog indikatora. Za projektovanje je zato važna ne samo numerička vrijednost napona nego i sljedljivost: kako je dobijena, na kojoj skali i sa kojim ograničenjima [Heidbach i dr., 2016].

U praktičnoj analizi najbolji rezultat daje hijerarhijska sinteza: regionalni podaci definišu očekivani režim, geološki model objašnjava lokalna odstupanja, a direktna i indirektna mjerenja kvantifikuju stanje na lokaciji. Nesaglasnost između ovih izvora nije nužno greška; može ukazati na lokalni rasjed, promjenu litologije, reljefni efekat ili zaostale napone koji nisu obuhvaćeni jednostavnim modelom.

9.5.7 Uticaj topografije, dolina i geološke strukture

Pretpostavka da je vertikalni napon jednak težini vertikalnog stuba stijene najpouzdanija je ispod približno ravne površine i u bočno dovoljno homogenom masivu. Ispod strmih padina i dubokih dolina linije glavnih napona mogu se zakriviti, a lokalne koncentracije ili rasterećenja mogu se javiti na udaljenostima reda veličine karakteristične dimenzije reljefa. Zbog toga ista dubina ispod površine ne mora značiti isto naponsko stanje na dnu doline i ispod susjednog grebena.

Geološke granice takođe remete homogeno polje. Kontakt čvrste i deformabilne stijene može preraspodijeliti napone, naročito ako su moduli elastičnosti izrazito različiti. Rasjedi i slabe

zone mogu djelovati kao površine relativnog klizanja, dok kompetentni blokovi prenose veći dio opterećenja. U slojevitim i folijisanim stijenskim masama orijentacija strukture utiče i na deformacioni odgovor i na lokalnu koncentraciju napona.

9.5.8 Zaostali, tektonski i termički naponi

Primarno stanje nije određeno samo trenutnom težinom nadsloja. Stijenska masa može zadržati dio naponske istorije nastale tektonskim deformisanjem, erozionim rasterećenjem ili promjenama temperature. Ako se nadsloj ukloni erozijom, vertikalni napon opada približno za težinu uklonjenog sloja, ali horizontalni napon ne mora opasti u istoj mjeri. Upravo zato su u plitkim i srednje dubokim masivima često zabilježeni horizontalni naponi veći od jednostavno procjenjenog vertikalnog napona.

Termički naponi mogu biti značajni tamo gdje postoji izražen geotermalni gradijent, lokalno zagrijevanje ili hlađenje, kao i kod vrlo krutih stijena sa ograničenom mogućnošću deformacije. Promjena temperature sama po sebi nije dovoljna za određivanje napona; važna je i mogućnost slobodnog širenja ili skupljanja. U potpuno slobodnom tijelu termička deformacija ne stvara napon, dok u ograničenoj sredini može nastati dodatna naponska komponenta.

Za potrebe nastave korisno je posmatrati ukupno in situ stanje kao superpoziciju više doprinosa: geostatičkog, tektonskog, rezidualnog i lokalnog strukturnog. Takva dekompozicija nije jedinstvena, ali sprječava pogrešno tumačenje da jedan koeficijent K ili jedna teorijska relacija mogu objasniti sve lokalne rezultate. [Brown i Hoek 1978] su upravo kroz skup mjerenja sa dubinom pokazali veliko rasipanje horizontalnih napona i potrebu za empirijskim, mjerenjima potkrijepljenim pristupom.

9.5.9 Nesigurnost, rasipanje i kontrola kvaliteta mjerenja

In situ naponi se rijetko mogu navesti kao jedna tačna vrijednost bez informacije o nesigurnosti. Rasipanje potiče od heterogenosti stijenske mase, ograničene tačnosti instrumenata, pretpostavki interpretacionog modela i činjenice da različite metode uzorkuju različitu zapreminu stijene. Zbog toga niz ponovljenih mjerenja ima veću vrijednost od jednog nominalno preciznog rezultata. Pri obradi treba prikazati srednje vrijednosti, opseg ili drugo prikladno mjerilo rasipanja i izdvojiti očigledno nevalidne testove samo uz jasno dokumentovan razlog.

Kontrola kvaliteta počinje prije samog mjerenja: provjerom orijentacije bušotine, kalibracijom instrumenata, stanjem jezgra, temperaturom i kvalitetom geološkog opisa. Tokom interpretacije potrebno je provjeriti da li dobijeni tenzor zadovoljava mehaničku konzistentnost

i da li su procjenjeni pravci u skladu sa geologijom i drugim indikatorima. Velika razlika između susjednih mjernih mjesta može predstavljati realan strukturni efekat, pa se ne smije automatski proglasiti greškom.

9.5.10 Inžinjerski značaj primarnog naponskog stanja

Poznavanje primarnih napona neposredno utiče na izbor trase i orijentacije podzemnih objekata. Tunel čija je osa povoljno postavljena u odnosu na glavne napone može imati manju koncentraciju nepovoljnih tangencijalnih napona od istog tunela druge orijentacije. Kod dubokih rudnika i hidrotehničkih objekata stanje napona utiče na pojavu spalling-a, squeezing-a, otvaranja diskontinuiteta i mogućnost dinamičkih pojava. Zbog toga naponski model treba formirati prije detaljne analize podgrade.

Za preliminarne proračune mogu se koristiti jednostavni modeli kao u zadacima ove vježbe, ali se sa povećanjem posljedica mogućeg otkaza povećava i potreba za direktnim mjerenjima. Praktičan radni tok obuhvata: geološki model, procjenu σ_v iz nadsloja, regionalnu procjenu pravca $S_{H\max}$, izbor početnog raspona horizontalnih napona, terenska mjerenja, statističku i mehaničku kontrolu rezultata i konačno definisanje reprezentativnog naponskog tenzora sa rasponom nesigurnosti.

Ovakav pristup je u skladu sa osnovnom porukom savremene mehanike stijena: in situ naponsko stanje nije podatak koji se bezuslovno preuzima iz jedne formule, već model koji se postepeno gradi i provjerava. Jednostavne relacije zadržavaju veliku nastavnu vrijednost jer omogućavaju provjeru reda veličine, dok za realne podzemne objekte odlučujuću ulogu imaju mjerenja, geološka interpretacija i procjena nesigurnosti [ISRM, 2003; Brady i Brown, 2006; Ulusay i Hudson, 2007].

9.6 Redoslijed proračuna

- Definisati geološki profil i dubinu tačke u odnosu na trenutnu i, ako je potrebno, prethodnu površinu terena.
- Izračunati σ_v iz težine nadsloja, koristeći odgovarajuću γ za svaki sloj.
- Jasno navesti model horizontalnog napona: Hajm, elastični K_o, empirijski/mjeren odnos ili direktno terensko mjerenje.
- Kod erozije najprije rekonstruisati početno stanje, zatim oduzeti promjenu vertikalnog i horizontalnog napona prema usvojenom modelu rasterećenja.
- Sve rezultate izraziti u MPa i provjeriti red veličine u odnosu na dubinu i zapreminsku težinu.

DOPUNSKI TEORIJSKI OPIS

Porijeklo primarnog naponskog stanja

Primarno ili in situ naponsko stanje predstavlja sistem napona koji postoji u stijenskoj masi prije izvođenja novog iskopa. Njegova najjednostavnija komponenta je gravitaciona: težina nadležećih stijena stvara vertikalni napon koji približno raste sa dubinom i prosječnom zapreminskom težinom. Međutim, horizontalni naponi ne proizlaze samo iz Poasonovog bočnog širenja. Tektonske sile, geološka istorija, erozija, termičke promjene i rezidualni naponi mogu učiniti da horizontalne komponente budu jednake, manje ili znatno veće od vertikalne.

Zbog toga se primarno naponsko polje ne može potpuno odrediti samo iz dubine. U stabilnim sedimentnim basenima gravitacioni trend može biti dominantan, dok u tektonski aktivnim područjima orijentacija i veličina horizontalnih napona često odražavaju regionalno deformaciono polje. Lokalna geologija dodatno modifikuje regionalni trend. Kruti intruzivi, slabe zone, rasjedi i kontrast modula mogu koncentrisati ili rasteretiti napone u okolini.

Naponsko stanje je tenzorska veličina. U opštoj tački postoje tri međusobno upravne glavne komponente i njihovi pravci. Inžinjerski problem zato nije samo odrediti "veličinu napona", nego i orijentaciju glavnih napona. Pravac najvećeg horizontalnog napona može imati presudan uticaj na stabilnost tunela, orijentaciju bušotinskih izbočenja, pravac hidrauličkih pukotina i izbor optimalne orijentacije podzemnih prostorija.

Vertikalni i horizontalni modeli i ograničenja K-odnosa

Vertikalni napon se često procjenjuje integralom zapreminske težine po dubini. U homogenom profilu to se svodi na približno $\sigma_v = \gamma \cdot H$, ali realni profil može imati slojeve različite gustine. Na velikim dubinama male greške u prosječnoj gustini daju značajnu razliku u naponu, pa je korisno koristiti podatke iz jezgra, geofizike ili gustinskih logova. Topografija dodatno mijenja raspodjelu: ispod doline i grebena naponsko polje odstupa od jednostavnog ravnog poluprostora.

Horizontalni naponi se ponekad predstavljaju odnosom $K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$. Takav odnos je praktičan, ali ne mora biti konstantan sa dubinom niti isti u dva horizontalna pravca. U plitkim zonama rezidualni i tektonski doprinos može biti velik u odnosu na gravitacioni napon, pa K može

imati visoke vrijednosti. Sa dubinom, gravitaciona komponenta raste i odnos se može mijenjati. Zbog toga je sigurnije posmatrati zasebno σ_v i σ_h nego pretpostaviti jedan univerzalni K.

Elastične formule zasnovane na Poasonovom koeficijentu opisuju idealizovano stanje bočno ograničenog homogenog medija. Stijenska masa sa pukotinama i dugom geološkom istorijom rijetko odgovara toj idealizaciji. Takve formule mogu biti početna procjena kada nema mjerenja, ali treba jasno označiti njihova ograničenja. Kod značajnih podzemnih objekata neposredna mjerenja napona ili indirektni indikatori često su neophodni za kalibraciju modela.

Overcoring, oslobađanje napona i hidrauličko frakturiranje

Metode oslobađanja napona zasnivaju se na mjerenju deformacije koja nastane kada se dio stijene lokalno oslobodi od prvobitnog naprezanja. Kod overcoring postupka senzor se postavlja u prethodno pripremljenu bušotinu, a zatim se jezgro oko senzora izbušuje većim prečnikom. Promjena deformacije nakon oslobađanja, zajedno sa elastičnim svojstvima stijene i geometrijom instrumenta, koristi se za povratni proračun komponenti početnog napona. Kvalitet rezultata zavisi od kontakta instrumenta, poznavanja modula i pretpostavke približno elastičnog odgovora tokom rasterećenja.

Hidrauličko frakturiranje koristi pritisak fluida u izolovanom intervalu bušotine. Povećanjem pritiska postojeća ili nova pukotina se otvara kada fluid savlada kombinaciju normalnog napona i zatezne čvrstoće stijene. Pritisci loma i ponovnog otvaranja, zajedno sa orijentacijom pukotine, daju informacije o horizontalnim naprezanjima. Metoda je naročito korisna na većim dubinama gdje je pristup za druge tehnike ograničen, ali interpretacija zavisi od geometrije bušotine, pornog pritiska i pretpostavke o orijentaciji glavnih napona.

Nijedna metoda ne daje savršenu sliku cijelog masiva. Overcoring mjeri mali lokalni volumen, dok hidrauličko frakturiranje ispituje zonu oko određenog intervala bušotine. Pukotine, heterogenost i lokalna oštećenja mogu uticati na rezultat. Zato je vrijedno kombinovati više mjerenja na različitim lokacijama i dubinama i posmatrati konzistentnost veličina i pravaca, umjesto oslanjanja na jednu pojedinačnu tačku.

Geološka struktura, topografija i prostorna promjenljivost napona

Naponsko polje reaguje na promjene geometrije i krutosti stijenske mase. U dolinama dolazi do rasterećenja i savijanja putanja glavnih napona prema topografiji, dok ispod grebena mogu nastati drugačije koncentracije. Blizina strmih kosina i dubokih kanjona naročito je važna za

plitke podzemne objekte. Jednostavan odnos napona sa vertikalnom dubinom tada ne može opisati lokalno stanje i potrebno je razmotriti stvarnu topografiju.

Rasjedi i zone smicanja mogu i prenositi i rasterećivati napone, zavisno od njihove krutosti, trenja i istorije aktivnosti. Krut blok između slabih zona može koncentrisati napone, dok otvorena ili veoma deformabilna zona može ih djelimično relaksirati. Slično, kontakt dvije litologije različitog modula stvara redistribuciju čak i bez novog iskopa. Zbog toga mjerenje u jednoj litologiji ne mora biti reprezentativno za susjednu zonu.

Prostorna promjenljivost zahtijeva statistički i geološki pristup. Umjesto traženja jedne 'tačne' vrijednosti za cijelo područje, korisno je definisati domene unutar kojih su naponi približno konzistentni. U svakom domenu može se procijeniti srednja vrijednost, rasipanje i dominantna orijentacija. Takav model je praktičniji za projektovanje jer omogućava da se kritične kombinacije napona povežu sa položajem konkretnih komora, tunela ili eksploatacionih prostorija.

Inžinjerski značaj i kontrola kvaliteta naponskih podataka

Primarno naponsko stanje određuje koliko će se naponi preraspodijeliti nakon iskopa. Ako je najveći glavni napon nepovoljno orijentisan u odnosu na tunel, može doći do koncentracija koje izazivaju spalling, slabbing ili rockburst u čvrstoj krtoj stijeni. U slabijim masama visoki naponi mogu dovesti do duktilnijeg gnječenja i velikih konvergencija. Isti geološki materijal zato može zahtijevati različitu podgradu u zavisnosti od dubine i orijentacije naponskog polja.

Kontrola kvaliteta podataka obuhvata više od provjere instrumenta. Potrebno je dokumentovati dubinu, orijentaciju bušotine, geologiju, prisustvo pukotina, temperaturu, postupak kalibracije i pretpostavljene elastične parametre. Rezultati koji snažno odstupaju nisu automatski pogrešni; mogu ukazivati na lokalnu strukturu. Ali prije geološkog tumačenja treba isključiti instrumentalne i metodološke uzroke. Dobar izvještaj zato prikazuje i podatke koji su odbačeni, uz obrazloženje kriterijuma.

Kada direktna mjerenja nisu dostupna, koriste se indirektni indikatori kao što su bušotinska izbočenja, inducirane pukotine, mehanizmi žarišta zemljotresa i regionalne geološke strukture. Oni često pouzdanije daju orijentaciju nego apsolutnu veličinu napona. Kombinovanje različitih izvora u jedinstven konceptualni model omogućava da se nesigurnost eksplicitno prikaže. Takav model je korisniji od prividno precizne pojedinačne vrijednosti, jer projektantu pokazuje i očekivano stanje i mogući nepovoljni raspon.

9.7 Osnovni podaci

9.7.1 Zadatak 1

Tačka A nalazi se na dubini H = 690 m. Gornji sloj debljine h_1 = 160 m ima γ_1 = 21 kN/m³, a donji sloj do tačke A ima γ_2 = 24 kN/m³. Za elastični K_o model usvojiti ν = 0,22. Odrediti vertikalni i horizontalni primarni napon: (a) po Hajmovoj aproksimaciji $\sigma_h \approx \sigma_v$ i (b) po elastičnom modelu $\Delta\sigma_h \approx \frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot \Delta\sigma_v$.

Tabela 9.1. Podaci za Zadatak 1

Veličina	Vrijednost
H	690 m
h_1	160 m
γ_1	21 kN/m³
γ_2	24 kN/m³
ν	0,22

9.7.2 Zadatak 2

Prije erozije tačka A bila je opterećena gornjim slojem γ_1 = 17 kN/m³ debljine h_1 = 130 m i stijenskom masom γ_2 = 21 kN/m³ ukupne preostale debljine $h'+h$ = 420 + 670 = 1090 m. Pretpostaviti da je prije erozije važila Hajmova aproksimacija $\sigma_{h_0} = \sigma_{v_0}$. Nakon erozije uklonjen je cijeli gornji sloj h_1, a elastični dio horizontalnog rasterećenja računati sa ν = 0,25. Odrediti σ_v i σ_h u tački A poslije erozije.

Tabela 9.2. Podaci za Zadatak 2

Veličina	Vrijednost
γ_1	17 kN/m³
h_1 - erodovani sloj	130 m
γ_2	21 kN/m³

Veličina	Vrijednost
h'	420 m
h	670 m
ν	0,25

9.8 Zadatak

- Za Zadatak 1 izračunati σ_v u tački A i zatim σ_h po oba modela; prikazati rezultate u tabeli i na dijagramu napona sa dubinom.
- Uporediti količnik $\frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ dobijen po Hajmu i po elastičnom K_o modelu i objasniti zašto se modeli razlikuju.
- Za Zadatak 2 najprije izračunati početne napone prije erozije, zatim promjene $\Delta\sigma_v$ i $\Delta\sigma_h$ i konačne napone poslije erozije.
- Provjeriti da li nakon erozije horizontalni napon može biti veći od vertikalnog i fizički objasniti rezultat.
- Navesti najmanje tri geološka ili tektonska razloga zbog kojih realno in situ naponsko stanje može odstupati od oba jednostavna modela.

9.9 Riješeni primjer

Sljedeći primjer je ilustrativan i ne rješava zadatke 9.7. U homogenoj stijenskoj masi γ = 26 kN/m³ posmatra se tačka na H = 500 m. Poasonov koeficijent je ν = 0,25.

Korak 1 - vertikalni napon

$$\sigma_v = \gamma \cdot H = 26 \cdot 500 = 13000\,kPa = 13,0\,MPa$$

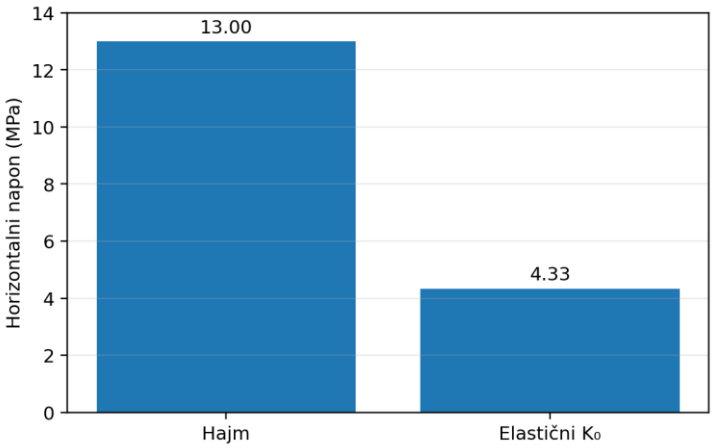
Korak 2 - horizontalni napon po Hajmu

$$\sigma_{h,Hajm} \approx \sigma_v = 13,0\,MPa$$

Korak 3 - horizontalni napon po elastičnom K_o modelu

$$K_o = \frac{\nu}{(1-\nu)} = \frac{0,25}{0,75} = 0,333$$

$$\sigma_{h,el} = 0,333 \cdot 13,0 = 4,33\,MPa$$



Slika 9.4. Poređenje horizontalnog napona dobijenog dvjema idealizovanim aproksimacijama u riješenom primjeru.

Zaključak: isti vertikalni napon može dati veoma različit horizontalni napon u zavisnosti od usvojenog modela. Zato se za ozbiljne podzemne objekte in situ naponi ne određuju samo jednom teorijskom relacijom, već se procjena kalibriše mjerenjima i geološkim informacijama.

Literatura:

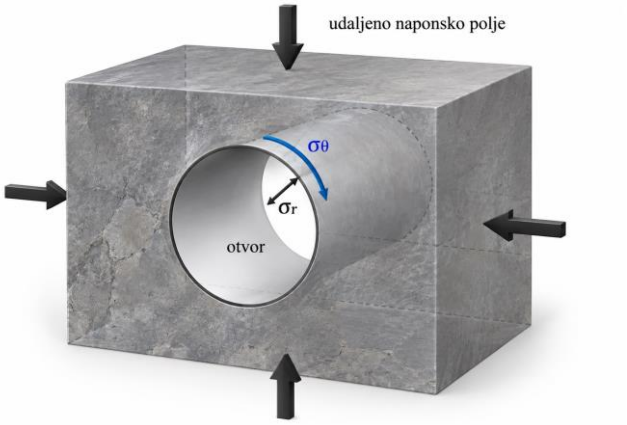
1. Brady, B. H. G., Brown, E. T. (2006) Rock Mechanics for Underground Mining. 3rd ed. Springer, Dordrecht.
2. Brown, E. T., Hoek, E. (1978) Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(4), 211-215.
3. Elezović, D., Nedeljković, B., Jakšić, M. (2001) Mehanika stena i tla. Rudarsko-metalurški fakultet, Kosovska Mitrovica.
4. Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K., Ziegler, M., WSM Team (2016) World Stress Map Database Release 2016, v1.1. GFZ Data Services.
5. ISRM (2003) Suggested Methods for Rock Stress Estimation, Parts 1-4. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8).
6. Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., Zimmerman, R. W. (2007) Fundamentals of Rock Mechanics. 4th ed. Blackwell Publishing, Oxford.
7. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.
8. Ulusay, R., Hudson, J. A. (eds.) (2007) The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. ISRM Turkish National Group, Ankara.

VJEŽBA BR. 10

Sekundarna naponska stanja u stijenskim masama

10.1 Preraspodjela napona oko podzemnog iskopa

Izradom tunela ili druge podzemne prostorije uklanja se materijal koji je do tada prenosio dio početnih napona. Zbog toga se naponsko polje u neposrednoj okolini konture preraspodjeljuje. Ovo lokalno, iskopom izmijenjeno stanje u ovoj vježbi naziva se sekundarno naponsko stanje. Njegov oblik zavisi od geometrije otvora, odnosa glavnih in situ napona, orijentacije diskontinuiteta, deformabilnosti i čvrstoće stijenske mase, podgrade i redoslijeda iskopa [Brady i Brown, 2006; Jaeger, Cook i Zimmerman, 2007].



Slika 10.1. Radijalni i tangencijalni naponi oko kružnog otvora u idealizovanoj elastičnoj sredini. Autorska nastavna šema.

10.2 Kiršovo rješenje za kružni otvor

Za kružni otvor poluprečnika a u beskonačnoj homogenoj, izotropnoj i linearno-elastičnoj sredini klasično Kiršovo rješenje daje radijalni, tangencijalni i smičući napon kao funkcije r i ugla θ. Za udaljena glavna naprezanja p_x i p_y, bez smicanja u beskonačnosti:

$$\sigma_r = \frac{\left(p_x + p_y\right)}{2\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)} + \frac{\left(p_x - p_y\right)}{2\left(1-\frac{4a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right)} \cdot \cos 2\theta$$

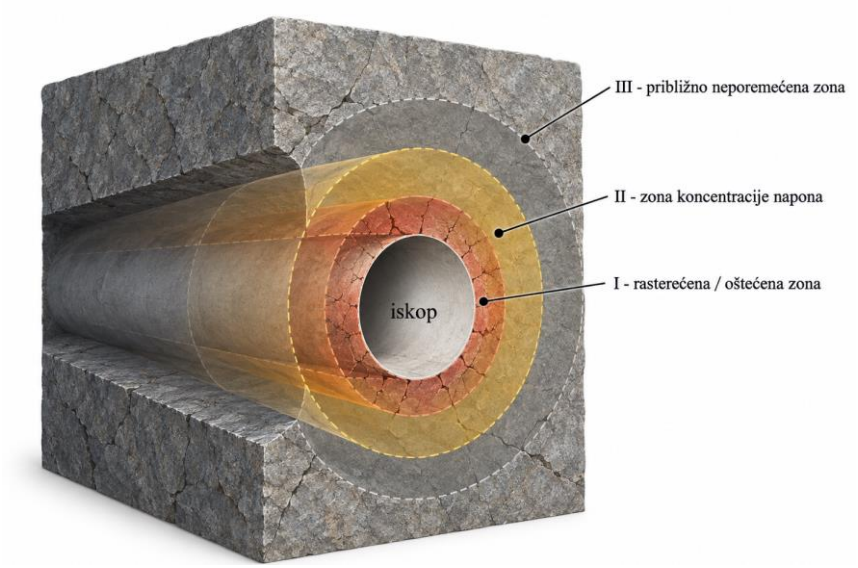
$$\sigma_r = \frac{\left(p_x + p_y\right)}{2\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)} - \frac{\left(p_x - p_y\right)}{2\left(1+\frac{4a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right)} \cdot \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta} = -\frac{\left(p_x - p_y\right)}{2\left(1+\frac{2a^2}{r^2}-\frac{3a^4}{r^4}\right)} \cdot \sin 2\theta$$

Na slobodnoj konturi $r = a$ radijalni napon je nula. U hidrostatičkom udaljenom polju $p_x = p_y = p$, tangencijalni napon na konturi iznosi $2p$. To je najjednostavniji primjer koncentracije napona. Za nejednake horizontalne i vertikalne napone raspodjela zavisi od ugla, a lokalni maksimumi mogu biti znatno veći.

10.3 Elastična, plastična i oštećena zona

Ako koncentrisani naponi premaše čvrstoću stijenske mase, u blizini konture nastaje zona popuštanja ili oštećenja. U praksi se često razlikuju: (I) rasterećena i/ili iskopom oštećena zona uz konturu, (II) zona povećanih napona ili zatvaranja pukotina i (III) udaljena zona u kojoj se stanje približava početnom. Granice nisu nužno kružne i snažno zavise od diskontinuiteta i tehnologije iskopa.



Slika 10.2. Podjela zona oko kružnog iskopa. Stvarne granice mogu biti nepravilne i anizotropne.

10.4 Seizmička brzina kao indikator promjena stijenske mase

Brzina P talasa zavisi od elastičnih svojstava, gustine, poroznosti, zasićenja i stanja pukotina. U zoni neposredno uz iskop brzina može biti niža zbog otvaranja pukotina i oštećenja miniranjem. Sa udaljavanjem od konture pukotine se mogu zatvarati pod koncentrisanim naponom, pa brzina raste; još dalje brzina teži referentnoj vrijednosti neporemećene stijenske mase. Zbog više uticajnih faktora nije opravdano granice zona određivati jednom univerzalnom

vrijednošću brzine - važni su oblik profila, ponovljivost i poređenje između pravaca [ISRM, 1988; Ulusay i Hudson, 2007].

10.4.1 Mehanizam preraspodjele napona i deformacija oko iskopa

Prije izrade podzemne prostorije svaka tačka stijenske mase nalazi se u stanju ravnoteže koje određuju sopstvena težina nadsloja, regionalni i lokalni tektonski uticaji, geološka građa i istorija deformisanja. Iskopom se uklanja dio materijala i na novoformiranoj slobodnoj konturi više ne mogu da se prenose normalni i smičući naponi koje je taj materijal prethodno nosio. Zbog toga se sile koje su djelovale kroz zapreminu budućeg iskopa prenose na okolnu stijensku masu. Nastaje prostorna preraspodjela napona praćena pomjeranjima konture prema otvoru, odnosno konvergencijom. U neposrednoj blizini iskopa mogu istovremeno postojati zone rasterećenja, zone povećanih pritisnih napona i, u zavisnosti od geometrije i odnosa glavnih napona, lokalne zone zatezanja [Brady i Brown, 2006; Jaeger, Cook i Zimmerman, 2007].

U idealno elastičnoj sredini preraspodjela je reverzibilna: kada bi se prvobitno stanje opterećenja moglo obnoviti bez pojave loma, deformacije bi se povukle. Realne stijenske mase, međutim, sadrže diskontinuitete, mikroprsline i zone oslabljene alteracijom, pa se dio deformacija razvija nepovratno. Otvaranje postojećih pukotina smanjuje krutost, dok njihovo zatvaranje u zonama povećanog pritiska može privremeno povećati efektivnu krutost i brzinu prostiranja elastičnih talasa. Ako naponi dostignu čvrstoću stijenske mase, prelazi se iz pretežno elastičnog u elastoplastično ponašanje, a oko iskopa se formira zona popuštanja čija veličina zavisi od odnosa napona i čvrstoće, kao i od geometrije otvora.

Za razumijevanje lokalnog naponskog stanja korisno je posmatrati radijalnu i tangencijalnu komponentu. Radijalni napon djeluje upravno na zamišljene koncentrične površine oko otvora, dok tangencijalni napon djeluje duž tih površina. Na slobodnoj konturi nepodgrađenog otvora radijalni napon teži nuli, dok tangencijalni napon preuzima veći dio opterećenja. Zato se najveće koncentracije napona često javljaju upravo u neposrednoj blizini konture. Sa udaljavanjem od iskopa uticaj otvora slabi i naponsko stanje se postepeno približava početnom in situ stanju.

Važno je razlikovati naponsku koncentraciju od podzemnog pritiska na podgradu. Koncentracija napona je stanje u samoj stijenskoj masi, dok se pritisak na podgradu razvija tek kada deformišuća stijenska masa uspostavi kontakt i prenese opterećenje na konstrukciju. Veličina tog pritiska zato ne zavisi samo od dubine i početnih napona, već i od vremena ugradnje, krutosti podgrade, dopuštene konvergencije i načina iskopa. Ova razlika je ključna

za pravilno tumačenje mjerenja u tunelu i za izbor odgovarajućeg proračunskog modela [Hoek i Brown, 1980; Brady i Brown, 2006].

10.4.2 Uticaj odnosa glavnih napona i oblika podzemnog otvora

Raspodjela sekundarnih napona snažno zavisi od odnosa i orijentacije glavnih in situ napona. Kod kružnog otvora u približno hidrostatičkom polju raspodjela oko konture je simetrična, pa je tangencijalni napon jednak duž obima. Kada su udaljeni glavni naponi nejednaki, simetrija se gubi i koncentracije se pomjeraju u određene dijelove konture. Iz Kiršovog rješenja za tačku na konturi $r = a$ slijedi pojednostavljena relacija $\sigma_{\theta(a,\theta)} = p_x + p_y - 2\left(p_x - p_y\right)\cdot\cos 2\theta$. Ako je p_x veći od p_y, najveći pritisni tangencijalni napon javlja se približno u pravcu upravnom na p_x, dok se na bočnim dijelovima može javiti znatno manji pritisni, pa čak i zatezni napon kada je odnos glavnih napona dovoljno nepovoljan.

$$\sigma_{\theta(a,\theta)} = p_x + p_y - 2\left(p_x - p_y\right)\cdot\cos 2\theta$$

Za dva karakteristična položaja na konturi dobijaju se izrazi $\sigma_{\theta(a,0)} = 3p_y - p_x$ i $\sigma_{\theta\left(a,\frac{\pi}{2}\right)} = 3p_x - p_y$. Ove relacije su didaktički veoma korisne jer pokazuju da lokalni napon može biti višestruko veći od jedne od udaljenih komponenti, i da smjer najveće koncentracije nije određen samo dubinom, već odnosom glavnih napona. U praktičnoj analizi mora se voditi računa o konvenciji znaka i o tome da se stvarno naponsko polje često ne poklapa sa vertikalnim i horizontalnim pravcima.

$$\sigma_{\theta(a,0)} = 3p_y - p_x \;\; ; \sigma_{\theta\left(a,\frac{\pi}{2}\right)} = 3p_x - p_y$$

Oblik otvora dodatno mijenja koncentraciju. Kružni i glatko zaobljeni profili omogućavaju postepeniju promjenu pravca glavnih napona, dok oštri uglovi kod pravougaonih ili nepravilnih iskopa predstavljaju mjesta izrazite koncentracije. Zbog toga se u podzemnom građevinarstvu često teži zaobljenim prelazima i izbjegavanju oštrih usjeka gdje god tehnološki uslovi to dozvoljavaju. Kod potkovičastih i višelučnih tunelskih profila raspodjela je složenija: krivina svoda, prelaz svod-bok i oblik poda mogu imati različite lokalne faktore koncentracije.

Geometrija nije samo pitanje poprečnog presjeka. Blizina čela iskopa uvodi trodimenzionalni efekat. Neposredno ispred čela dio početnog naponskog luka još postoji; na samom čelu dolazi do rasterećenja, a nekoliko prečnika iza čela stanje se približava ravanskoj deformaciji, pod uslovom da se poprečni presjek i geološki uslovi ne mijenjaju značajno. Zato mjerenja

deformacija i brzina talasa treba vezivati za položaj čela u trenutku mjerenja. Dva mjerenja na istoj stacionaži mogu dati različite rezultate ako su izvršena u različitim fazama napredovanja iskopa i ugradnje podgrade.

10.4.3 Uloga diskontinuiteta, anizotropije i zone oštećene iskopom

Klasična elastična rješenja polaze od homogenog i izotropnog kontinuuma, dok je stijenska masa u prirodi najčešće diskontinuirana. Pukotine, slojne površine, folijacija i rasjedi određuju pravce manje krutosti i potencijalnog klizanja. Ako je skup diskontinuiteta nepovoljno orijentisan prema konturi iskopa, lokalna stabilnost može biti kontrolisana kinematikom blokova, a ne samo veličinom kontinuumskih napona. U takvoj situaciji relativno mali napon može izazvati pomjeranje bloka ako je ravnoteža duž diskontinuiteta narušena, dok masivna stijena sa malo pukotina može prenijeti znatno veće koncentracije prije pojave loma [Jaeger, Cook i Zimmerman, 2007; Ulusay i Hudson, 2007].

Anizotropija se može javiti i bez jasno izdvojenih velikih diskontinuiteta. Slojevite, škriljave i folirane stijene često imaju različit modul deformacije i čvrstoću u različitim pravcima. Posljedica je nesimetrična konvergencija i različit domet zone poremećaja po radijalnim pravcima. Upravo zato je u ovoj vježbi predviđeno mjerenje u osam pravaca: poređenjem profila može se uočiti da li neki smjer sistematski pokazuje nižu brzinu, veću oštećenost ili drugačiji položaj granice zone povećanih napona.

Posebno treba razlikovati prirodno oslabljen masiv od zone oštećene iskopom, često označene kao excavation damaged zone (EDZ). EDZ nastaje kao posljedica promjene naponskog stanja i tehnološkog postupka iskopa. Kod miniranja dodatno se mogu formirati nove mikroprsline, proširiti postojeće pukotine i smanjiti brzina talasa u neposrednoj okolini konture. Mehanički iskop u pojedinim stijenama može proizvesti užu zonu tehnološkog oštećenja, ali naponsko rasterećenje i dalje postoji. Širina EDZ zato nije univerzalna i ne može se odrediti samo prema vrsti mašine ili eksploziva.

Uticaj vode dodatno komplikuje ponašanje diskontinuiteta. Voda može smanjiti efektivni normalni napon na pukotini, omekšati ispunu, promijeniti trenje i uticati na brzine P i S talasa. Promjena zasićenja može povećati P-brzinu i bez ikakvog povećanja mehaničkog napona, pa bi jednostavno tumačenje “veća brzina = veći napon” bilo pogrešno. Zbog toga profil brzine treba analizirati zajedno sa podacima o litologiji, pukotinskom sistemu, vlažnosti i tehnologiji iskopa. Kada su ti podaci dostupni, radijalna seizmička mjerenja postaju mnogo pouzdaniji indikator prostorne promjene svojstava stijenske mase.

10.4.4 Elastoplastično ponašanje i interakcija stijenske mase sa podgradom

Ako je nivo koncentrisanih napona dovoljno nizak u odnosu na čvrstoću, oko iskopa može dominirati elastično ponašanje. Sa porastom dubine, nepovoljnijim odnosom glavnih napona ili smanjenjem čvrstoće, dio stijenske mase uz konturu može preći u stanje popuštanja. Tada se naponi više ne mogu opisivati samo elastičnim Kiršovim rješenjem. Zona popuštanja prenosi opterećenje prema spoljašnjoj elastičnoj zoni, a deformacije konture postaju znatno veće. U slabijim i izrazito deformabilnim masivima ovaj proces može dovesti do snažnog zatvaranja profila, dok se u čvrstim, krtim stijenama, može ispoljiti kao ljuskanje, odlamanje ploča i naglo oslobađanje energije.

Koncept karakteristične krive stijenske mase opisuje vezu između radijalnog pritiska na konturi i konvergencije otvora. Nepodgrađen otvor odgovara malom ili nultom pritisku na konturi i većoj deformaciji, dok rana ugradnja veoma krute podgrade ograničava deformaciju, ali može preuzeti veće opterećenje. Podgrada ima sopstvenu karakterističnu krivu koja zavisi od njene krutosti, geometrije i trenutka aktiviranja. Ravnotežno stanje sistema određuje se njihovim zajedničkim odgovorom. Ovaj princip je osnova metoda koje podzemni iskop posmatraju kao interakciju stijenske mase i konstrukcije, a ne kao dva potpuno odvojena problema [Hoek i Brown, 1980; Brady i Brown, 2006].

Vrijeme ugradnje je zato projektantski parametar. Ako se podgrada ugradi odmah iza čela, ona sprječava veliki dio konvergencije, ali se u njoj mogu razviti veće sile. Ako se ugradnja odloži, stijenska masa se djelimično rastereti i preraspodjeli napone prije aktiviranja podgrade, ali preveliko odlaganje može dovesti do nepovratnog oštećenja i gubitka samonosivosti. Optimalno rješenje zavisi od kvaliteta stijenske mase, brzine napredovanja, oblika iskopa i dopuštenih pomjeranja. U tunelima se zato ponašanje sistema često prati konvergencijskim mjerenjima, ekstenzometrima, ćelijama pritiska i drugim instrumentima.

Za potrebe ove vježbe najvažnija posljedica elastoplastičnog ponašanja jeste da granice zona na osnovu brzine talasa ne treba poistovjećivati sa preciznom granicom plastične zone. Seizmički profil reaguje na stanje pukotina, zasićenje i elastične osobine, dok plastična zona predstavlja oblast u kojoj je dostignut određeni kriterijum čvrstoće. Te oblasti mogu se preklapati, ali nisu nužno identične. Zbog toga izraz “zona povećanih napona” u interpretaciji brzina treba razumjeti kao inžinjersku, indikatorsku zonu, a ne kao direktno izmjerenu površinu jednakog napona.

10.4.5 Seizmički pokazatelji naponsko-deformacionog stanja i ograničenja tumačenja

Seizmička ispitivanja u i oko podzemnih prostorija zasnivaju se na činjenici da se brzina elastičnih talasa mijenja sa efektivnom krutošću medijuma. U ispucaloj stijenskoj masi talas nailazi na kontakte i diskontinuitete koji mogu biti otvoreni, djelimično zatvoreni ili potpuno nalegli. Povećanje pritisnog napona često zatvara tanke pukotine i povećava kontaktni kruti odziv, pa brzina P talasa raste. Pri rasterećenju i otvaranju pukotina trend može biti obrnut. Ovaj mehanizam objašnjava zašto radijalni profil oko tunela često pokazuje malu brzinu neposredno uz konturu, zatim maksimum na izvjesnom rastojanju i na kraju približavanje referentnoj vrijednosti udaljenog masiva [ISRM, 1988].

Međutim, brzina nije jednoznačna funkcija napona. Na nju istovremeno utiču mineralni sastav, poroznost, tip ispune, zasićenje, temperatura, orijentacija diskontinuiteta, frekvencija talasa i dužina putanje. P-brzina u zasićenoj pukotinskoj stijeni može biti viša nego u istoj suvoj stijeni i bez promjene naponskog stanja. Slično tome, pravac talasa paralelan slojevitosti može dati drugačiju brzinu od pravca upravnog na slojevitost. Zato se apsolutna vrijednost V_p ne smije koristiti kao univerzalni kriterijum granice naponske zone.

Pouzdanije je posmatrati oblik profila i ponovljivost obrasca. Nagli porast brzine od konture može označiti izlazak iz jako oštećene zone, lokalni maksimum može ukazivati na područje zatvorenijih pukotina i povećane krutosti, a stabilizacija ka približno konstantnoj vrijednosti može označiti prelaz u udaljeni, manje poremećen masiv. Ako se isti obrazac javlja u većini radijalnih pravaca, interpretacija je znatno pouzdanija. Ako se pravci značajno razlikuju, treba tražiti geološko ili tehnološko objašnjenje umjesto da se granice zona vještački predstave kao koncentrični krugovi.

Statistička obrada dodatno pomaže tumačenju. Srednja vrijednost V_p na istom rastojanju daje reprezentativan radijalni trend, dok standardna devijacija i koeficijent varijacije pokazuju koliko je masiv anizotropan ili prostorno nehomogen. Visok koeficijent varijacije u određenom radijalnom pojasu može ukazati na izražene lokalne diskontinuitete ili neujednačeno oštećenje. Ipak, statistički pokazatelj sam po sebi ne objašnjava uzrok razlike; on samo pokazuje da je raspodjela između pravaca neujednačena.

Najbolja praksa je kombinovanje više nezavisnih pokazatelja. Radijalne seizmičke profile treba, kada je moguće, povezati sa kartiranjem pukotina, RQD ili sličnim opisnim pokazateljima, konvergencijskim mjerenjima, ekstenzometrima, mjerenjima napona i pritiscima na podgradu. Saglasnost više metoda povećava pouzdanost zaključka o granicama

oštećene i naponski izmijenjene zone. U nastavnom zadatku takav skup podataka nije dostupan, pa se interpretacija namjerno zadržava na nivou indikatorske procjene iz oblika $V_{p(r)}$ profila, uz obavezno navođenje ograničenja.

10.4.6 Prakticna interpretacija sekundarnog naponskog stanja

Pri praktičnom rješavanju problema sekundarnog naponskog stanja preporučljivo je najprije jasno odvojiti poznate podatke od pretpostavki. Poznati mogu biti geometrija iskopa, dubina, litologija, rezultati laboratorijskih i terenskih ispitivanja, položaj diskontinuiteta i izmjerene brzine talasa. Pretpostavke su, na primjer, homogenost sredine, ravanska deformacija, elastičnost ili određeni kriterijum čvrstoće. Svaka pretpostavka sužava oblast važenja modela i mora biti navedena kada se rezultat prenosi na realan objekat.

Za kružni otvor elastično rješenje je odlična referentna tačka jer pokazuje osnovni mehanizam koncentracije i omogućava kontrolu reda veličine. Ako numerički model za jednostavan elastični slučaj daje raspodjelu koja bitno odstupa od Kiršovog rješenja, potrebno je provjeriti granične uslove, mrežu i konvenciju napona. U složenijem geološkom modelu odstupanje od analitičkog rješenja može biti očekivano, ali tada razlog mora biti fizički objašnjiv: slojevitost, pukotine, nelinearnost, heterogenost, blizina površine ili drugih iskopa.

Kod interpretacije terenskih mjerenja važna je i vremenska komponenta. Stijenska masa reaguje tokom napredovanja čela, ugradnje podgrade, promjene podzemne vode i eventualnog puzanja ili vremenski zavisnog zatvaranja pukotina. Jednokratno mjerenje daje samo snimak jednog stanja. Serija mjerenja u vremenu omogućava da se razlikuje stabilizovano stanje od progresivne promjene i zbog toga ima veću vrijednost za procjenu sigurnosti. U praksi se zato rezultati mjerenja ne posmatraju izolovano, već kao dio sistema opažanja ponašanja podzemnog objekta.

Sa stanovišta projektovanja, cilj nije da se sekundarno naponsko polje odredi sa prividnom matematičkom preciznošću, već da se dovoljno pouzdano prepoznaju kritične zone i mehanizmi mogućeg loma. Analitička rješenja, empirijska iskustva, geološko kartiranje, geofizička mjerenja i numerički modeli imaju različite nivoe idealizacije i najbolje rezultate daju kada se koriste zajedno. U ovoj vježbi Kiršovo rješenje daje teorijsku osnovu, podjela na tri zone daje mehaničku interpretaciju, a radijalni profili P-talasa predstavljaju indirektan terenski pokazatelj promjena u stijenskoj masi. Takvo povezivanje teorije i mjerenja je osnov za odgovorno tumačenje sekundarnog naponskog stanja.

10.5 Obrada radijalnih profila

- Za svaki radijalni pravac nacrtati $V_{p(r)}$ i sve profile prikazati u istoj skali radi poređenja.
- Na svakoj udaljenosti izračunati srednju vrijednost brzine i, po mogućnosti, standardnu devijaciju ili koeficijent varijacije između osam pravaca.
- Unutrašnju granicu zone povećanih napona procijeniti tamo gde se završava nagli porast brzine iz oštećene zone.
- Spoljašnju granicu procijeniti tamo gde se brzina vraća približno stabilnoj referentnoj vrijednosti udaljene stijenske mase.
- Provjeriti da li se granice značajno razlikuju po pravcima; takva razlika može ukazivati na anizotropiju, geološke diskontinuitete ili nejednako primarno naponsko polje.

Preraspodjela napona nakon formiranja podzemnog otvora

Prije iskopa stijenska masa nosi primarno naponsko polje. Formiranjem podzemnog otvora uklanja se materijal koji je ranije prenosio dio opterećenja, pa se naponi moraju preusmjeriti oko konture. Na slobodnoj površini iskopa normalni napon približno pada na vrijednost unutrašnjeg pritiska, dok se u okolnoj stijeni javljaju koncentracije tangencijalnog i smičućeg napona. Ova preraspodjela je osnovni razlog nastanka sekundarnog naponskog stanja i može dovesti do loma čak i kada je primarno polje bilo stabilno.

Za kružni otvor u homogenoj linearno elastičnoj beskonačnoj sredini Kiršovo rješenje daje analitički opis napona oko konture. Iako su pretpostavke idealizovane, rješenje jasno pokazuje uticaj odnosa glavnih napona i njihovog pravca. Na pojedinim tačkama oboda tangencijalni napon može biti višestruko veći od dalekog napona, dok radijalni napon na nepodgrađenoj slobodnoj konturi teži nuli. Zato geometrija otvora stvara koncentraciju bez ikakvog dodatnog spoljnog opterećenja.

Sa udaljavanjem od otvora poremećaj opada i naponi teže primarnom stanju. Karakteristična širina zone uticaja zavisi od oblika i veličine iskopa, odnosa napona, ponašanja stijenske mase i prisustva drugih otvora. Kada se više tunela ili komora nalazi blizu, njihove zone preraspodjele mogu se preklapati i stvoriti stubove sa visokim naponom. Zbog toga se razmak i redosljed izvođenja podzemnih prostorija ne određuju samo iz geometrije, već i iz međusobne naponske interakcije.

Uticaj oblika otvora i orijentacije glavnih napona

Kružni otvor ima povoljnu geometriju jer nema oštre uglove, ali stvarni podzemni iskopi često imaju potkovičast, pravougaon ili nepravilni profil. Oštri prelazi i mali radijusi zakrivljenja stvaraju lokalne koncentracije napona. Zbog toga za istu površinu poprečnog presjeka oblik može znatno promijeniti vršne napone na konturi. Za velike komore oblik i orijentacija se često optimizuju tako da smanje nepovoljne koncentracije u odnosu na regionalno naponsko polje.

Ako je najveći primarni glavni napon horizontalan, zone maksimalnog tangencijalnog napona oko približno kružnog otvora javljaju se na karakterističnim dijelovima oboda različitim od slučaja dominantnog vertikalnog napona. To znači da smjer potencijalnog ljuštenja, spallinga ili otvaranja pukotina zavisi od orijentacije tunela prema glavnim naprezanjima. Rotacija trase u prostoru može zato promijeniti mehanički odgovor, iako su stijena i dubina isti.

Geometrija mora biti razmatrana zajedno sa diskontinuitetima. Elastično rješenje može predvidjeti visoku koncentraciju na mjestu gdje strukturalno stabilan blok ipak ostaje dobro uklješten, ili relativno umjeren napon na mjestu gdje nepovoljno orijentisana pukotina omogućava kinematsko ispadanje bloka. Sekundarno naponsko stanje i strukturalna geologija zato se ne analiziraju odvojeno. Kod većine realnih iskopa oba mehanizma istovremeno utiču na izbor podgrade.

Elastična, plastična i oštećena zona oko iskopa

Ako preraspodijeljeni naponi ostanu ispod granice čvrstoće, okolna stijena može se ponašati približno elastično i deformacije su male. Kada lokalni napon dostigne kriterijum loma, razvija se plastična ili oštećena zona u kojoj krutost i čvrstoća više nisu iste kao u netaknutoj stijenskoj masi. U krtoj stijeni oštećenje se može manifestovati kroz spalling i lom ploča, dok u slabijoj, duktilnijoj masi dominiraju kontinuirane plastične deformacije i gnječenje.

Zona oštećena iskopom, EDZ, može nastati i zbog samog načina izvođenja. Miniranje stvara nove pukotine i širi postojeće u blizini konture, dok mehaničko iskopavanje obično daje drugačiji profil oštećenja. EDZ povećava deformabilnost i propustljivost neposredne zone, što je posebno važno kod podzemnih skladišta, tunela pod pritiskom i objekata gdje kontrola procjeđivanja ima veliki značaj. Zbog toga kvalitet konture i tehnologija iskopa utiču na kasnije naponsko-deformaciono ponašanje.

Plastična zona nije nužno znak neprihvatljivog stanja. Kontrolisano popuštanje može redistribuirati napone i smanjiti vršna opterećenja na podgradu. Problem nastaje kada je zona prevelika, kada deformacije ugrožavaju profil ili kada dolazi do progresivnog gubitka nosivosti. Projektni cilj zato nije uvijek očuvati potpuno elastičnu stijenu, već postići stabilan sistem stijenska masa–podgrada sa prihvatljivim deformacijama i faktorom sigurnosti.

Interakcija stijenske mase i podgrade

Podgrada ne djeluje nezavisno od stijenske mase. Nakon iskopa kontura se počinje deformisati i dio opterećenja redistribuira u okolinu. Ako se podgrada ugradi rano i ima veliku krutost, ona preuzima veći dio reakcije pri maloj konvergenciji. Ako se ugradi kasnije ili je podatnija, stijenska masa može razviti više deformacije prije nego što podgrada postane aktivna. Ovaj princip je osnova konvergencija–konfiniranje pristupa.

Karakteristična kriva stijenske mase povezuje unutrašnji pritisak na konturi sa radijalnom deformacijom, dok kriva podgrade opisuje reakciju obloge, ankera ili čeličnih lukova na konvergenciju. Presjek tih krivih predstavlja približno ravnotežno stanje. Iako je koncept najjednostavniji za kružne tunele i simetrična naprezanja, veoma je koristan za razumijevanje vremena ugradnje podgrade. “Jača” podgrada nije uvijek optimalna ako se ugradi bez razmatranja deformacionog procesa.

Ankeri, mlazni beton i obloge djeluju različitim mehanizmima. Ankeri povezuju zone stijene i ograničavaju otvaranje blokova, mlazni beton obezbjeđuje površinsku vezu i raspodjelu opterećenja, a masivnija obloga pruža veće konfiniranje i konačnu nosivost. Njihov efekat zavisi od kontakta sa stijenskom masom i redosljeda izvođenja. Zato projekt podgrade treba uskladiti sa očekivanim sekundarnim naponskim stanjem, a ne birati elemente samo prema tabličnim klasifikacijama.

Seizmički pokazatelji, monitoring i praktična interpretacija

Promjena napona i oštećenja može uticati na brzinu i prigušenje elastičnih talasa. Zatvaranje pukotina pod kompresijom često povećava brzine, dok razvoj novih pukotina i rast oštećene zone može ih smanjiti. Zbog toga ponovljena seizmička ili ultrazvučna mjerenja mogu poslužiti kao indikator promjene stanja oko iskopa. Međutim, brzina zavisi i od zasićenja, temperature i putanje talasa, pa jednu promjenu ne treba automatski pripisati samo naprezanju.

Direktni monitoring deformacija obuhvata konvergenciju tunela, ekstenzometre, mjerenja napona u podgradi i, po potrebi, mikroseizmičko praćenje. Najveća vrijednost monitoringa je u poređenju sa unaprijed definisanim očekivanim rasponom ponašanja. Ako deformacije ostaju unutar predviđenog trenda, model dobija potvrdu. Ako ubrzavaju ili prelaze pragove, potrebno je provjeriti geologiju, naponske pretpostavke i efikasnost podgrade. Mjerenje bez unaprijed definisanog plana interpretacije daje znatno manje koristi.

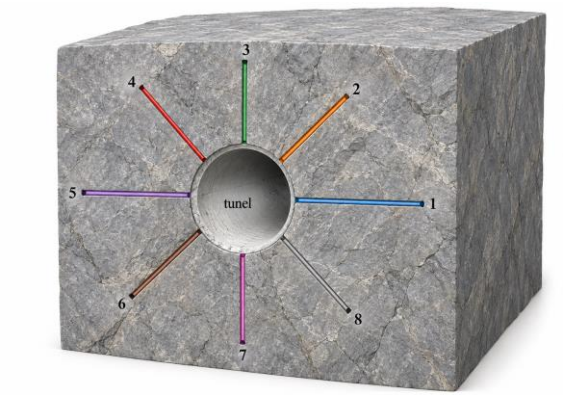
Sekundarno naponsko stanje je dinamičan rezultat interakcije primarnog napona, geometrije, geologije, tehnologije iskopa, vremena i podgrade. Zato konačna interpretacija treba da objedini analitička rješenja, numerički model, kartiranje stvarne konture i podatke monitoringa. Jednostavno Kiršovo rješenje ostaje vrijedan početni model jer pokazuje osnovni mehanizam preraspodjele, ali projektna odluka mora uzeti u obzir stvarne diskontinuitete i nelinearno ponašanje. Najpouzdaniji pristup je iterativan: predvidjeti, izmjeriti, uporediti i po potrebi prilagoditi model i podgradu.

10.6 Osnovni podaci

U hidrotehničkom tunelu izvršena su mjerenja brzine longitudinalnih talasa u osam radijalnih pravaca. Udaljenost r mjerena je od konture tunelskog otvora, a brzina V_p je data u km/s.

Tabela 10.1. Brzine prostiranja longitudinalnih talasa u osam radijalnih pravaca

r (m)	Pravac 1	Pravac 2	Pravac 3	Pravac 4	Pravac 5	Pravac 6	Pravac 7	Pravac 8
0,30	2,20	2,10	1,80	2,00	2,40	2,05	1,90	2,15
0,50	4,00	4,10	3,10	4,00	4,10	4,00	3,20	4,10
0,85	4,80	5,00	4,00	5,10	5,10	5,05	4,10	5,05
1,10	5,80	5,55	4,50	5,40	5,60	5,40	4,30	5,45
1,35	5,40	5,30	4,80	5,20	5,50	5,20	4,70	5,25
1,60	5,00	5,00	4,60	5,00	5,00	4,95	4,40	5,10
2,10	4,40	4,50	4,20	4,40	4,50	4,45	4,20	4,50
2,60	4,30	4,20	3,80	4,00	4,40	4,25	3,70	4,30
3,10	4,20	4,30	3,70	3,80	4,20	4,25	3,50	4,20
4,60	4,25	4,25	3,65	3,90	4,30	4,20	3,45	4,20

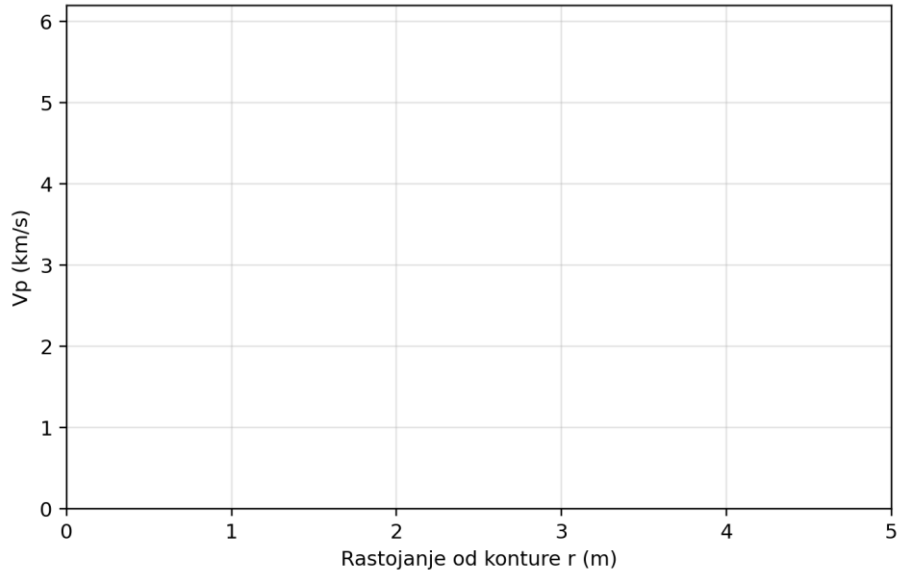


Slika 10.3. Raspored osam radijalnih pravaca mjerenja.

Tabela 10.2. Radna tabela za statističku obradu po udaljenosti

***r* (m)**	**Srednja V_p (km/s)**	***sV*$_p$ (km/s)**	***CV* (%)**
0,30			
0,50			
0,85			
1,10			
1,35			
1,60			
2,10			
2,60			
3,10			
4,60			

10.7 Radni dijagram



Slika 10.4. Radni dijagram za profile $V_{p(r)}$. Sve pravce prikazati u istoj skali.

10.8 Zadatak

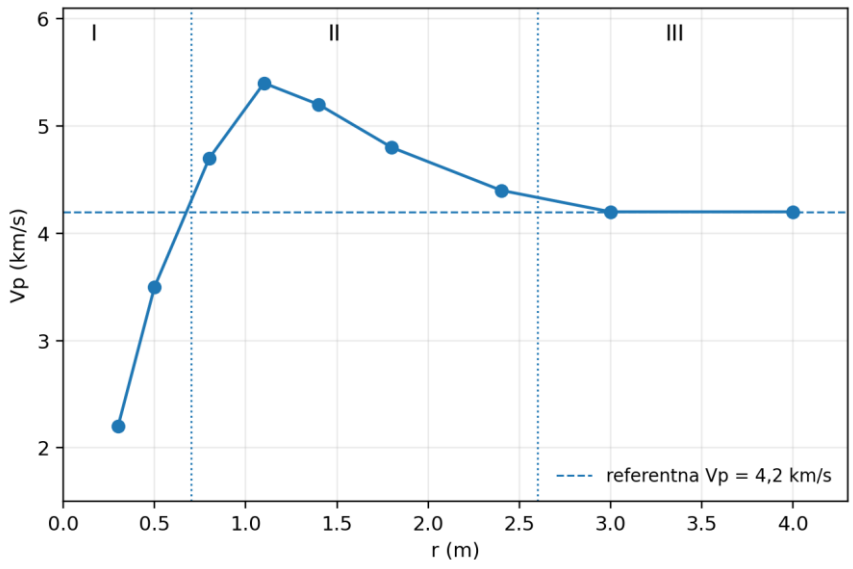
- Grafički prikazati $V_{p(r)}$ za svih osam radijalnih pravaca.
- Popuniti Tabelu 10.2 srednjim vrijednostima, standardnom devijacijom i koeficijentom varijacije.
- Na osnovu oblika profila procijeniti granicu rasterećene/oštećene zone i spoljašnju granicu zone povećanih napona, posebno za svaki pravac i kao reprezentativnu prosječnu granicu.
- Uporediti pravce 3 i 7 sa ostalim pravcima i komentarisati da li pokazuju sistematski niže brzine.
- U zaključku navesti ograničenja tumačenja naponskih zona samo na osnovu brzine P talasa, i koje bi dodatne podatke bilo korisno imati.

10.9 Riješeni primjer

Sljedeći primjer koristi jedan nezavisan, pojednostavljen radijalni profil: r = 0,3; 0,5; 0,8; 1,1; 1,4; 1,8; 2,4; 3,0; 4,0 m, a V_p = 2,2; 3,5; 4,7; 5,4; 5,2; 4,8; 4,4; 4,2; 4,2 km/s. Za udaljenu stijensku masu usvojena je referentna brzina 4,2 km/s.

Korak 1 - prepoznati tri dijela profila

Do približno 0,7 m brzina je znatno ispod referentne i brzo raste - to se tumači kao rasterećena/oštećena zona. Od oko 0,8 do 2,4-2,6 m brzina je iznad referentne, sa maksimumom oko 1,1 m - to je indikacija zone zatvaranja pukotina i povećanih napona. Poslije približno 2,6 m profil se približava i stabilizuje oko referentne vrijednosti.



Slika 10.5. Ilustrativno određivanje zona iz jednog radijalnog profila.

Korak 2 - kontrola interpretacije

Granice 0,7 m i 2,6 m nisu dobijene univerzalnim pragom, već kombinacijom promjene nagiba, maksimuma i povratka ka referentnoj brzini. U realnom zadatku granice treba uporediti u svih osam pravaca. Ako su značajno različite, kružni prikaz zona je samo aproksimacija.

Zaključak: seizmička brzina je koristan indirektan indikator oštećenja i zatvaranja pukotina, ali nije direktno mjerenje napona. Tumačenje treba povezati sa geologijom, načinom iskopa, stanjem vode i, kada je moguće, direktnim deformacionim ili naponskim mjerenjima.

Literatura:

1. Brady, B. H. G., Brown, E. T. (2006) Rock Mechanics for Underground Mining. 3rd ed. Springer, Dordrecht.
2. Elezović, D., Nedeljković, B., Jakšić, M. (2001) Mehanika stena i tla. Rudarsko-metalurški fakultet, Kosovska Mitrovica.
3. Hoek, E., Brown, E. T. (1980) Underground Excavations in Rock. Institution of Mining and Metallurgy, London.
4. ISRM (1988) Suggested Method for Seismic Testing Within and Between Boreholes. International Society for Rock Mechanics.
5. Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., Zimmerman, R. W. (2007) Fundamentals of Rock Mechanics. 4th ed. Blackwell Publishing, Oxford.
6. Kostić, S., Vasović, N., Kuzmanović, D. (2023) Mehanika stena i tla sa osnovama geomehanike. Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet, Prijedor.
7. Ulusay, R., Hudson, J. A. (eds.) (2007) The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. ISRM Turkish National Group, Ankara.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

624.131(075.8)(076)(0.034.2)

ТРИВАН, Јелена, 1978-
Praktikum iz Mehanike stijena i tla [Elektronski izvor] / Jelena Trivan, Srđan Kostić. - Onlajn izd. - El. knjiga. - Banja Luka : Univerzitet u Banjoj Luci : Rudarski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, 2026

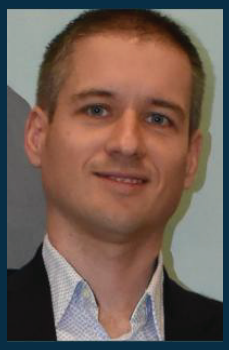
Način pristupa (URL):
https://blupress.unibl.org/rf/catalog/book/215. - Насл. са насл. екрана. - Опис извора дана 5.11.2026. - Ел. публикација у ПДФ формату опсега 153 стр. - Библиографија уз поглавља.

ISBN 978-99997-45-52-9

COBISS.RS-ID 144998145



Jelena Trivan je docent na Rudarskom fakultetu Prijedor Univerziteta u Banjoj Luci. Diplomirala je 2004. na Rudarskom odsjeku Tehnološkog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci. Magistarski rad iz oblasti mehanike stijena, posvećen stabilnosti kosina i sanaciji površinskog kopa uglja „Bogutovo Selo" – Ugljevik, odbranila je 2013. na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Doktorsku disertaciju iz oblasti kompleksnog izučavanja otpora kopanja za primjenu BTO sistema u uslovima čvrstih stijena na površinskim kopovima odbranila je 2021. na Rudarskom fakultetu Prijedor. U univerzitetskoj nastavi angažovana je od 2005, a od 2009. na Rudarskom fakultetu Prijedor, gdje je izvodila nastavu iz predmeta „Geomehanika", „Mehanika stijena i tla", „Ventilacija u rudarstvu" i „Odvodnjavanje u rudarstvu". Autor je pet radova u referentnim međunarodnim časopisima i više od 30 saopštenja na međunarodnim skupovima; njeni radovi citirani su oko 90 puta bez autocitata, h = 3.



Srđan D. Kostić je naučni savetnik i šef Sektora za geologiju Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi", zamenik predsednika Naučnog veća Instituta i vanredni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Bavi se inženjerskom geologijom, geomehanikom, mehanikom stena i tla, nelinearnom dinamikom i numeričkim modelovanjem geoloških procesa. Diplomirao je geotehniku na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu 2010. godine sa prosečnom ocenom 10 kao student generacije i najbolji diplomac Univerziteta u Beogradu, a doktorirao 2013. godine. Postdoktorski se usavršavao na Univerzitetu u Mariboru i na Institutu za fiziku Ruske akademije nauka u Nižnjem Novgorodu. Od 2014. kontinuirano je angažovan u univerzitetskoj nastavi, kao docent i vanredni profesor, na predmetima iz oblasti mehanike stena i tla, geomehanike i inženjerske geologije. Autor je više od 120 naučnih i stručnih radova, uključujući oko 40 radova u časopisima sa SCI liste, četiri univerzitetska udžbenika i dve monografije, a koautor je tri tehnička rešenja. Njegovi radovi citirani su oko 600 puta bez autocitata, uz h-indeks 15. Član je uređivačkih odbora časopisa *Frontiers in Earth Science* i *Frontiers in Physics*, a bio je gost urednik časopisa *Mathematics* i *Discover Geoscience*. Recenzirao je predloge međunarodnih i nacionalnih projekata, i oko 90 radova u referentnim međunarodnim časopisima, među kojima su *Acta Geotechnica, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Lithosphere, Physics and Chemistry of the Earth, Environmental Earth Sciences, Nonlinear Dynamics, Chaos, Solitons & Fractals, Journal of Hydroinformatics* i *Neural Computing and Applications*. Držao je predavanja po pozivu i bio član naučnog odbora međunarodnih naučno-stručnih skupova. Kao glavni geološki inženjer rukovodio je geotehničkim istraživanjima za velike infrastrukturne projekte: beogradski metro i interceptor, gasovod Turski tok, HE Kruševo, Moravski koridor, rekonstrukcija odbrambenih nasipa Kolubare, Tamnave, Rasine, Bjelice i dr. Dopisni je član Akademije inženjerskih nauka Srbije od 2022.