

1. Vrste tla prema načinu postanka.

Mogu biti rezidualna i transportovana (gravitacija – koluvijum, voda – aluvijalna, estuarna, lakustrinska, marinska tla, glečeri – morene).

2. Rezidualna tla. Transportovana tla.

Tla, kakva se nalaze u prirodi, spadaju u klasu poznatu pod nazivom transportovana tla, ili alternativno, kao rezidualna tla.

Transportovana tla su nastala na jednom mestu, a zatim su transportovana i deponovana na drugo.

Rezidualna tla su ostala na mestu gde su nastala raspadnjem stene.

3. Frakcije zrna tla i njihove granice.

Krupnozrno tlo(zrna preko 50% većih od 0.075mm) :

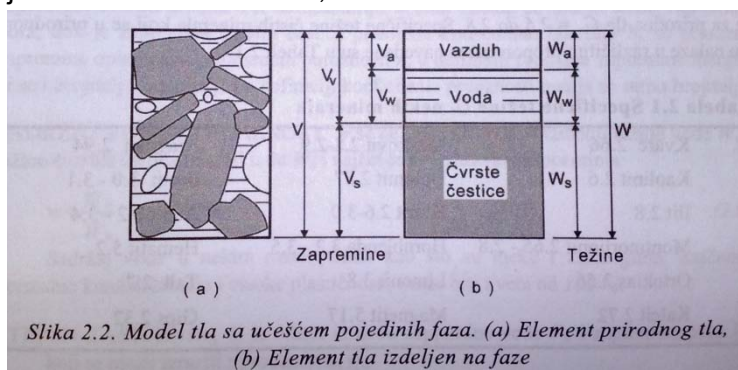
- pesak($d=0.06-2\text{mm}$),
- šljunak ($d=2-60\text{mm}$),
- obluci ($d>60\text{mm}$);

Sitnozrno tlo(zrna preko 50% manjih od 0.075mm) :

- gline ($d=0.0002-0.002\text{mm}$),
- prašine ($d=0.002-0.06\text{mm}$).

4. Faze u tlu i odnosi faza.

Tlo se sastoji od tri faze: čvrsta zrna, voda i vazduh.



Slika 2.2. Model tla sa učešćem pojedinih faza. (a) Element prirodnog tla, (b) Element tla izdijeljen na faze

Odnosi faza su iskazani različitim pokazateljima: specifična težina, poroznost, vlažnost, zasićenost, sadržaj vazduha...

5. Vlažnost, definicija i način određivanja. Step en zasićenja, definicija.

Vlažnost w je odnos između težine vode W_w i težine čvrstih čestica u uzorku W_s i izražava se u [%].

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \text{ [%]}$$

w se u nekim materijalima kao što su meke i žitke gline najčešće normalno konsolidovane u visoke plastičnosti može biti i veća od 100%.

Koeficijent zasićenja S_r je odnos između zapremine vode V_w i zapremine pora V_v koji se može izraziti u [%].

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \text{ [%]}$$

$$S_r = \frac{V_w/\gamma_w}{V_v/\gamma_w} \times 100 = \frac{W_w}{W_{w,z}} \times 100 \text{ [%]}$$

$$S_r = \frac{W_w/W_s}{W_{w,z}/W_s} \times 100 = \frac{w}{w_s} \times 100 \text{ [%]}$$

S_r se još može izraziti i preko vlažnosti w , koeficijenta poroznosti e i specifične težine G_s :

$$S_r = \frac{wG_s}{e}$$

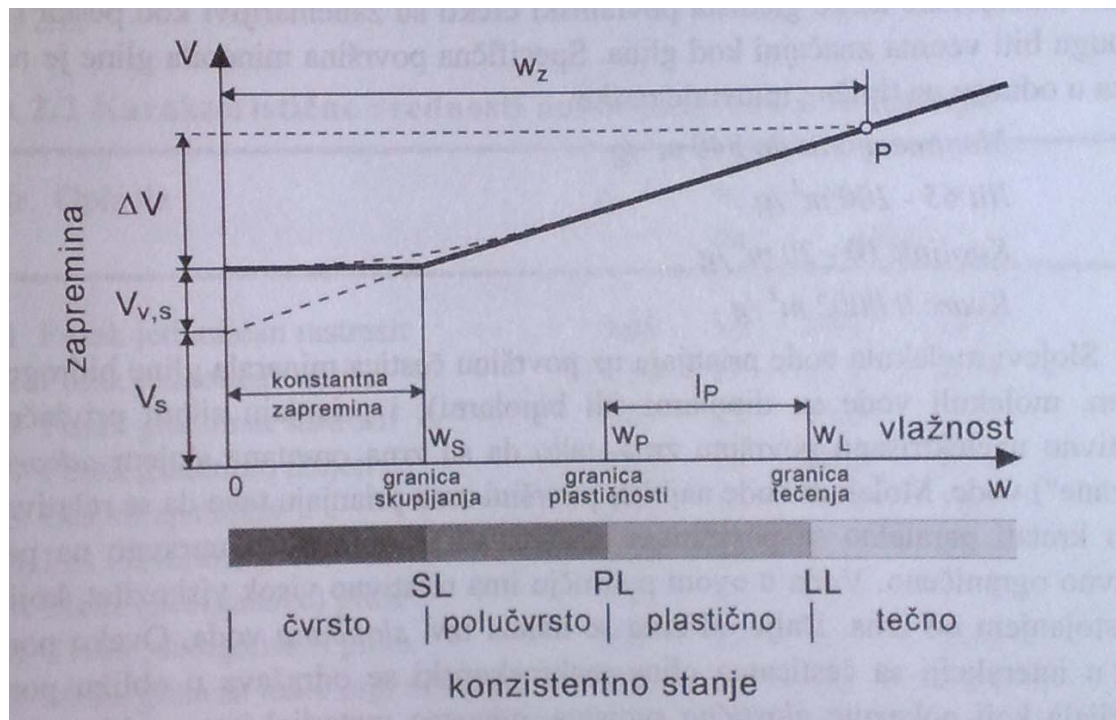
Moguća su tri karakteristična stanja uzorka koja se opisuju ovim pokazateljem:

$S_r=0$	suvo tlo
$0 < S_r < 100\%$	nezasićeno ili delimično zasićeno tlo
$S_r=100\%$	zasićeno tlo

6. Specifična površina zrna tla, značaj.

7. Aterberg, granice tečenja, plastičnosti, skupljanja, definicija i način određivanja.

Aterbergove granice konzistencije, često se koristi i uži termin - *granice plastičnosti* ili *granice konzistentnih stanja*. Ove granice se odnose isključivo na *sitnozrna tla*. Aterbergove granice služe da se bliže definišu, na indirektan način, osobine glinovitih komponenti u tlu. Za glinovite materijale je karakteristično da menjaju konzistentno stanje pri promeni sadržaja vode.



Zamislamo da smo izvesnu količinu glinovitog tla izmešali u znatnoj količini vode koja odgovara vlažnosti w_z , (tačka P na Slici), tako da dobijemo žitku tečnost koja po gustini primera radi, asocira na krem-supu, čija je smičuća čvrstoća jednaka nuli.

Ako bi na primer, ovoj masi smanjivali sadržaj vode, omogućavajući joj da se voda isparava, uz povremenu homogenizaciju mešanjem, ukupna zapremina bi se smanjila, masa postala gušća, povećao bi se viskozitet tako da bi pri nekoj vlažnosti materijal dobio izvesnu, istina sasvim malu ali merljivu smičuću čvrstoću reda veličine od $1.6 - 2 \text{ kN/m}$, kakvu, na primer, ima zubna pasta, tada možemo reći da materijal ima vlažnost na **granici tečenja w_L** ili **LL**.

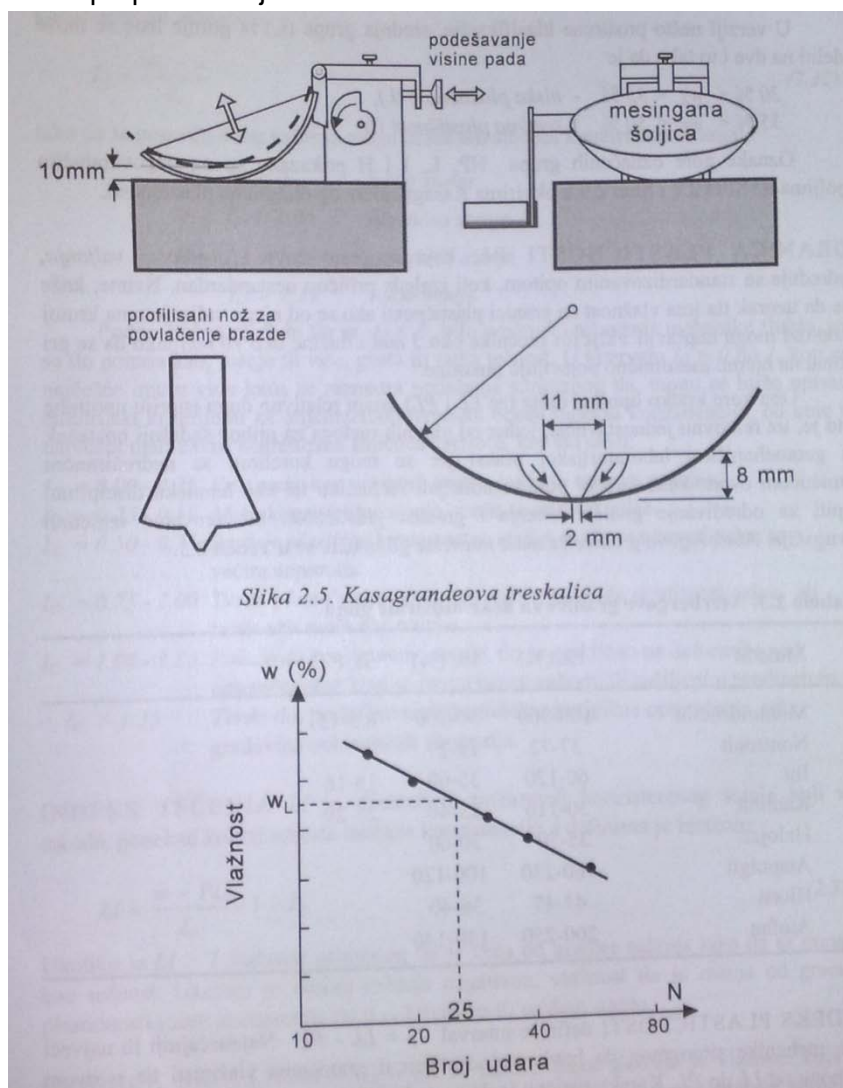
Pri daljem smanjivanju sadržaja vode masa postaje još gušća, sve do granice pri kojoj se oblik mase ne može menjati bez na-rušavanja kontinuiteta materijala, jer se pri deformisanju pojavljuju pukotine, pa se kaže da je materijal na **granici plastičnosti w_P** ili **PL** i smičuću čvrstoću reda veličine od $170 - 200 \text{ kN/m}$. U intervalu vlažnosti od **LL** do **PL** materijal je *plastičan*, kao na primer, margarin na sobnoj temperaturi, te nakon deformisanja zadržava nametnut deformisani oblik i posle prestanka delovanja opterećenja.

Ako se sušenje nastavi, smanjuje se zapremina do stanja kada se zrna počinju međusobno oslanjati na način da se zapremina više ne menja i voda se evakuiše iz pora bez promene zapremine skeleta. Kaže se da zapremina skeleta tla, koju čine zapremina čvrstih čestica i zapremine pora, ostaje približno konstantna pri svim vlažnostima manjim od **granice skupljanja w_s ili SL** .

Kada je vlažnost sitnozrnog tla u intervalu između PL i SL , materijal ima konzistenciju tvrdog sira, plastično se deformiše pri opterećivanju, ali se na njemu pri tome pojavljuju pukotine. Ukoliko je vlažnost sitnozrnog tla manja od granice skupljanja, tlo ima tvrdi konzistenciju, drobi se pri deformisanju kao tvrda bombona.

Granice između konzistentnih stanja nisu oštre. One su arbitrarno definisane pokazateljima koji se određuju standardizovanim opitima na frakciji zrna koja su manja od 0.425mm.

GRANICA TECENJA LL se određuje standardizovanim opitom u Kasagrandeovoj treskalici koja je prikazana na Slici 2.5. Kaže se da je vlažnost uzorka tla na granici tečenja w_L ako se on, nakon obrade profilisanim nožem u standardizovanoj posudi sasferičnim dnom, spoji na dužini od 10 do 11 mm posle 25 udaraca generisanih uzastopnim udarcima pri padovima posude sa visine od 10 mm i brzini od 2 udarca u sekundi. Opit se izvodi sa različitim vlažnostima, rezultati se nanose na polulogaritamski dijagram sa kojeg se očitava tražena vlažnost za propisani broj udaraca.



Pomoću ovog pokazatelja, koji se označava sa LL ili w_L , sitnozme frakcije tla mogu se podeliti na sledeće osnovne grupe:

$w_L < 20\%$ - *mplastično (NP)*

$20\% < w_L < 50\%$ - *niskaplastičnost(L)*

$w_L > 50\%$ - *visoka plastičnost (H)*.

U verziji nešto proširene klasifikacije, srednja grupa (L) iz gornje liste se može deliti na dve i to tako da je

$20\% < w_L < 35\%$ - *niskaplastičnost(L)*,

$35\% < w_L < 50\%$ - *srednja plastičnost (I)*.

GRANICA PLASTIČNOSTI PL , koja se često zove i *granicom valjanja*, određuje se standardizovanim opitom, koji izgleda prilično nestandardan. Naime, kaže se da uzorak tla ima vlažnost na granici plastičnosti ako se od njega valjanjem na krutoj podlozi mogu napraviti valjčići prečnika oko 3 mm i dužine oko 70 mm tako da se pri tome na njemu mestimično pojavljuju pukotine.

GRANICA SKUPLJANJA $w_s = SL$ sa fizicke tačke gledišta je vlažnost koja je dovoljna da vodom popuni sve pore kada je sitaozno tlo neopterećeno spoljnim naponima, (u uslovima normalnog atmosferskog pritiska), dostiglo minimalnu zapreminu pri sušenju. Drugim rečima, to je najmanja vlažnost pri kojoj se neopterećeno tlo može potpuno zasiti vodom. Pri vlažnosti koja je manja od granice skupljanja, ne dolazi do promene zapremine tla pri daljem isušivanju. Pri vlažnostima većim od granice skupljanja, svaka promena vlažnosti mora izazvati i promenu zapremine tla.

Laboratorijski opit za određivanje granice skupljanja se sastoji iz merenja težine uzorka i njegove zapremine pre i posle sušenja. Granica skupljanja se može izračunati pomoću izraza:

$$w_s = \frac{W_w - \Delta V \gamma_w}{W_s}$$

gde je

ΔV promena zapremine uzorka između dva opisana stanja,

W_s težina čvrstih čestica.

8. Indeks plastičnosti, definicija.

INDEKS PLASTIČNOSTI definiše interval $I_p = LL - PL$. Najznačajniji ili najveći deo mehanike sitnozrnog tla bavi se područjem u granicama vlažnosti tla u ovom rasponu od LL do PL . Karakteristično je da se nedrenirana smičuća čvrstoća prerađenog uzorka tla u ovom intervalu vlažnosti menja za *oko 100 puta*, ili sasvim orijentaciono, smičuća čvrstoća prerađenog uzorka tla sa vlažnošću na granici plastičnosti je za dva reda veličine veća od smičuće čvrstoće istog sitnozmog tla u prerađenom stanju sa vlažnošću na granici tečenja.

9. Stanja konsistencije, indeks konsistencije, indeks tečenja.

INDEKS KONZISTENCIJE je pokazatelj kojim se numerički definiše stanje konsistencije izrazom:

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$$

tako da se pomoću ovog indeksa mogu definisati sledeća konzistentna stanja: $I_c < 0$ *tečno stanje*

$0 < I_c < 1.00$	<i>plastično stanje</i>
$1 < I_c < 1.25$	<i>polutvrdo stanje</i>
$I_c > 1.25$	<i>tvrdost stanje</i>

Podrazumeva se da bi tlo sa $I_c < 0$ bilo predmet izučavanja mehanike fluida, jer se tlo ponaša kao, manje ili više, gusta ili retka tečnost. U intervalu $I_c = 0$ do 1 , koji se najčešće ima u vidu kada se razmatra ponašanje sitnozrnog tla, mogu se bliže opisati empirijski kriterijumi za orijentacionu terensku ocenu indeksa konsistencije, od koje u najvećoj meri zavisi nedrenirana smičuća čvrstoća, kao što sledi:

$I_c = 0.00 - 0.25$	<i>Vrlo meko konzistentno stanje, može se utisnuti pesnica.</i>
$I_c = 0.25 - 0.50$	<i>Meko konzistentno stanje, može se utisnuti palac.</i>
$I_c = 0.50 - 0.75$	<i>Srednjeplastično konzistentno stanje, može se utisnuti palac sa većim naporom.</i>
$I_c = 0.75 - 1.00$	<i>Tvrdo-plastično konzistentno stanje, ne može se utisnuti palac, ali može vrh zaoštrene olovke.</i>
$I_c = 1.00 - 1.25$	<i>Polutvrdo konzistentno stanje, tlo se praktično ne deformiše pod opterećenjima koja se mogu naneti rukom, ili zašiljenim predmetom.</i>
$I_c > 1.25$	<i>Tvrdo tlo, praktično nedeformabilno za tipična opterećenja od građevina uobičajenih dimenzija.</i>

INDEKS TEČENJA LI je alternativni pokazatelj konzistentnog stanja koji se, takođe, ponekad koristi umesto indeksa konsistencije i definisan je izrazom:

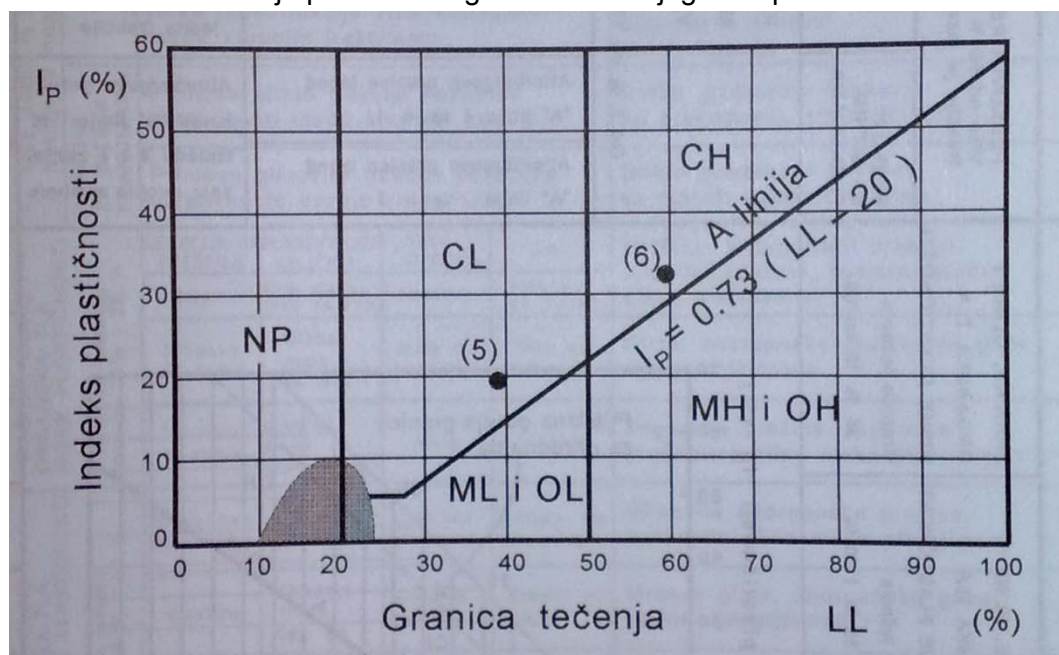
$$LI = \frac{w - PL}{I_p} = 1 - I_c$$

Ukoliko je $LI > 1$ vlažnost prirodnog tla je veća od granice tečenja tako da se ponaša kao tečnost. Ukoliko je indeks tečenja negativan, vlažnost tla je manja od granice plastičnosti i zato je sitnozrno tlo u polutvrdom ili tvrdom stanju.

10. Kasagrandeov dijagram plastičnosti.

Sitnozrna tla, tj. ona koja sadrže preko 50% zrna manjih od $0,075\text{ mm}$, ne klasifikuju se primenom pokazatelja granulometrijske kompozicije.

Prvo slovo klasifikacionog simbola je C ili M ili O, a drugo slovo je ili L ili (I) ili H. Oba slova, koja zajedno čine klasifikacioni simbol sitnozrnog tla, proističu isključivo iz pokazatelja granica konzistentnih stanja prema Kasagrandeovom dijagramu plastičnosti.



11. Koloidalna aktivnost gline po Skemptonu.

KOLOIDALNA AKTIVNOST GLINE A ili kraće aktivnost, indirektna je mera specifične površine izražena empirijskim pokazateljem koji je definisao Skempton neimenovanim brojem u obliku:

$$A = \frac{I_p}{CF}$$

gde je CF procenat zrna gline, tj. zrna manjih od $0,002\text{ mm}$.

Klase aktivnosti:

$A < 0,75$	neaktivne gline
$0,75 - 1,25$	normalne gline
$A > 1,25$	aktivne gline.

12. Poroznost i koeficijent poroznosti.

POROZNOST ili **RELATIVNA POROZNOST**, n je odnos zapremine pora i ukupne zapremine uzorka, ponekad se množi sa **100** i izražava u procentima:

$$n = \frac{V_v}{V}$$

KOEFICIJENT POROZNOSTI e predstavlja odnos između zapremine pora i zapremine čvrstih čestica:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Očigledno, s obzirom na prikazane definicije, između e i n mora da postoji jednoznačna veza. Može se pokazati da je:

$$n = \frac{e}{1 + e} (\times 100\%)$$

$$e = \frac{n}{1 - n} (\times 100\%)$$

13. Specifična težina, definicija i način određivanja.

SPECIFIČNA TEŽINA G_s u mehanici tla je naziv za odnos između jedinične težine čvrstih čestica γ_s i jedinične težine vode γ_w , te je, uprkos neadekvatnom nazivu, neimenovan broj:

$$G_s = \frac{W_s/V_s}{\gamma_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

gde je:

W_s težina suvog uzorka tla

V_s zapremina čvrstih čestica

Iz gornje definicije sledi da bi korektniji naziv za veličinu G_s bio "relativna gustina", naziv koji se povremeno počinje koristiti u novijoj literaturi.

Jedinična težina čvrstih čestica je:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = G_s \gamma_w$$

14. Zapreminska težina tla, metode određivanja.

JEDINIČNA TEŽINA TLA ili **zapreminska težina tla** γ je odnos između ukupne težine uzorka W i njegove ukupne zapremine V :

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w + V_a} [kN/m^3]$$

15. Suva i zasićena zapreminska masa tla.

U slučaju **potpuno suvog tla**, kada je $W_w = 0$ i $V_w = 0$, jedinična težina uzorka tla u suvom stanju γ_d je odnos između težine čvrstih čestica W_s i ukupne zapremine V :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s}{V_s + V_a} \quad [kN/m^3]$$

Jedinična težina tla u zavisnosti od vlažnosti:

$$\gamma = (1 + w)\gamma_d$$

Kada su **sve pore ispunjene vodom**, ($S_r = 1$), jedinična težina tla u zasićenom stanju je:

$$\gamma_z = \frac{W_z}{V} = \frac{W_s + W_{w,z}}{V_s + V_w} \quad [kN/m^3]$$

Ako je $w = w_z$, tada je težina tla u zasićenom stanju:

$$\gamma_z = (1 + w_z)\gamma_d$$

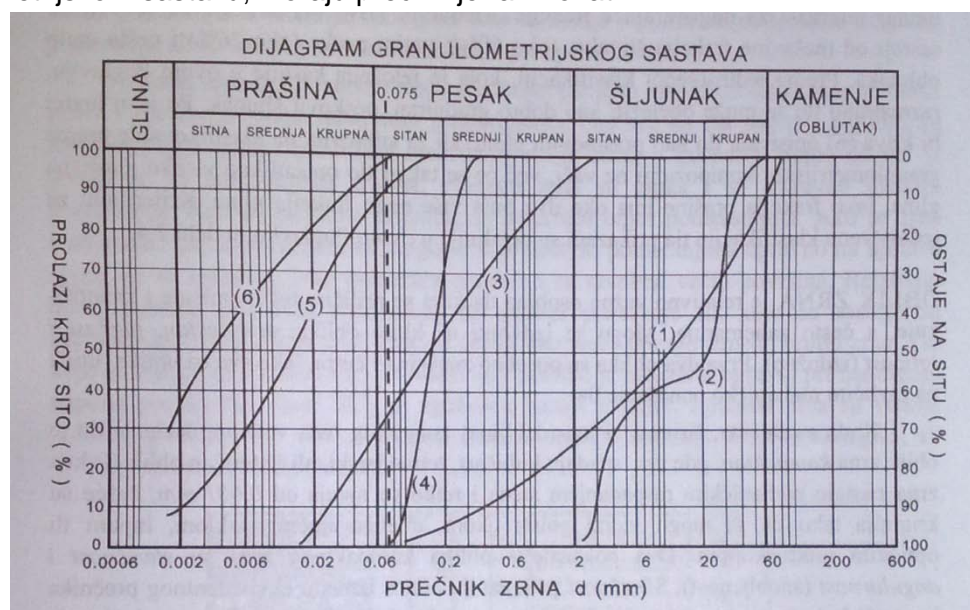
gde je w_z vlažnost uzorka tla (decimalni broj) u stanju potpunog zasićenja.

Efektivna zapreminska težina tla pri potapanju u vodu sledi iz Arhimedovog zakona, tako da je *potopljena težina tla*:

$$\gamma' = \gamma_z - \gamma_w$$

16. Granulometrijski sastav tla i metode određivanja.

Granulometrijski sastav je definisan krivom koja opisuje sadržaj zrna različite veličine izražen u procentima težine. Ovaj klasifikacioni sistem je jednostavan jer za definisanje graničnih veličina frakcija zrna, (šljunak, pesak, prašina), i njihovih relativnih veličina, (sitan, srednji, krupan), primenjuje samo brojeve 2 i 6, što se lako pamti. Međutim, realna tla se sastoje od mešavine raznih frakcija u različitim proporcijama, tako da se vrste tla, prema granulometrijskom sastavu, moraju preciznije razlikovati.



Zbog oblika mora se arbitramo definisati mera veličine zrna. Veličina zrna, koje se vide golim okom, tj. pesak i krupnija zrna, opisuje se "prečnikom" koji se pripisuje zrnima koje može da prođe kroz skup sita sa različitim otvorima kvadratnog oblika. "Prečnik", koji se pripisuje zrnima, je prečnik najveće kuglice, koja može da prođe kroz kvadratni otvor sita iste veličine kroz koji prolazi i zrnina.

Koriste se opiti sejanja (krupnija zrna), opiti hidrometrisanja i aerometrisanja.

17. Kombinovana metoda za određivanje granulometrijskog sastava tla.

18. Koeficijent uniformnosti, koeficijent zakrivljenosti.

Osim oblika granulometrijske krive, za opis krupnozmog tla upotrebljavaju se i sledeći numerički pokazatelji:

d_{10} *Efektivna veličina zrna* predstavlja najveće zmo od kojeg je 10 % materijala u uzorku manje od ove veličine. Na analogan način se definiše i veličina d_{15} .

d_{60} *Srednja veličina zrna* se za neke statističke potrebe takođe upotrebljava za jedan od pokazatelja.

Koeficijent jednoličnosti ili koeficijent uniformnosti:

$$C_u = d_{60}/d_{10}$$

Ovo je jedan od pokazatelja varijabilnosti veličine zrna u granularnoj mešavini. Kaže se da je šljunak široko graduiran ako je $C_u > 4$, a pesak ako je $C_y > 6$. U tom slučaju tlo može biti dobro graduirano ako je ispunjen dopunski uslov izražen koeficijentom zakrivljenosti.

Koeficijent zakrivljenosti se koristi za bliže definisanje graduiranosti, a definisan je izrazom:

$$C_z = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

Kaže se da tlo može biti dobro graduirano ako je $C_z = 1$ do 3.

19. Terenska identifikacija i klasifikacija krupnoznog tla.

KRUPNOZRNO TLO se lako identifikuje na terenu jer su zrna dovoljno velika tako da se mogu prepoznati golim okom. Može se smatrati da je to veličina veća od 0.1 mm. Uzorak tla se razastre na ravnoj podlozi i proceni se učešće primesa sitnoznih frakcija (ako ih ima), proceni se učešće zrna veličine do 2 mm, što su frakcije peska, a između 2 i 60 mm su frakcije šljunka. Pri tome se ima u vidu da pesak, odnosno šljunak može biti sitan, srednji i krupan. Osim učešća pojedinih frakcija na terenu se "od oka" proceni relativno učešće pojedinih frakcija, i uzorku se pripiše preliminarni klasifikacioni simbol prema jedinstvenoj klasifikaciji. Ako su sve veličine dobro zastupljene smatra se da je tlo dobro graduirano (W), a ako preovladava jedna do dve frakcije, onda je slabo graduiran (P). Ako preovladava jedna frakcija u vrlo uskom granulometrijskom području onda je tlo jednolično (U). Uz navođenje veličina zrna treba dati opis oblika i zaobljenosti zrna (loptast, kockast, pločast, ljuspast, valjkast, klinast, rogljast, polurogljast, poluzaobljen, zaobljen, sasvim zaobljen, pri čemu za frakcije peska i prašine za određivanje opisa oblika zrna može da posluži lupa na terenu, a u laboratoriji lupa i/ili optički mikroskop. Učešće primesa sitnoznih frakcija ($d < 0.075$ mm) u krupnozrnom tlu na terenu, osim "od oka", se može proceniti tako što se uzorak stavi u menzuru od jednog litra, napuni vodom i dobro izmeša. Čestice veće od 0.075 mm će se istaložiti iz suspenzije posle 20-30 sekundi dok će se sitnije čestice taložiti duže vreme.

20. Terenska identifikacija i klasifikacija sitnozrnog tla.

SITNOZRNO TLO sadrži više od 50% zrna koja se ne mogu prepoznati golim okom tako da se postupci terenske identifikacije i klasifikacije svode na jednostavne opite ispitivanjem reakcije na trešenje, plastičnosti valjčića, čvrstoće u suvom stanju i procenom sjaja svežeg preseka tla načinjenog sečivom pribora. Iskustvo omogućava da se sa manjim obimom ovih jednostavnih postupaka dobije preliminarni zadovoljavajući identifikacioni nalaz koji se naknadno konačno uobliči provođenjem odgovarajućeg broja laboratorijskih opita.

21. – 29. Jedinstveni klasifikacioni sistem za tla.

PRIMARNA OZNAKA		OPISNA OZNAKA	
Krupnozrna tla sa preko 50 % zrna većih od 0,075 mm	G (šljunak)	W	dobra
	S (pesak)	U	jednolična
		P	slaba
		F	prašine
		C	gline
Sitnozrna tla sa preko 50 % zrna manjih od 0,075 mm	M (prašina)	L	niska
	C (glina)	(I)	(srednja)
	O (organsko tlo)	H	visoka
Vlaknasta struktura		P _t	(treset)

30. Svrha terenskih istraživanja.

Svrha geotehničkih istražnih radova je da se obezbede pouzdane informacije o tlu (ili steni) u području građenja. Cilj je da se odredi prostorni položaj (dubine, debljine i prostiranje) pojedinih slojeva tla i dubine nivoa podzemne vode i obezbediti podatke o inženjerskim osobinama, kao što su čvrstoća i deformabilnost tla i drugi pokazatelji ponašanja tla u prirodnim uslovima i u uslovima nastalim izgradnjom objekta.

31. Vrste terenskih istraživanja.

Istraživanja sa površine terena: prethodna geotehnička istraživanja, geofizička istraživanja (geoelektrične, seizmičke i metode pomoću radioaktivnih izotopa).

Dubinska istraživanja: sondažne jame, bunari, zaseci, potkopi, galerije, jame.

32. Dubinska istraživanja tla, uzimanje uzoraka iz bušotine.

Postoji niz metoda za izvođenje bušotina u tlu i steni, počev od bušenja sasvim lakim ručnim alatima do dubine od nekoliko metara u tlu, do složenih i teških mašina za bušenje u steni do dubine od nekoliko kilometara za potrebe istraživanja naftnih i drugih rudnih ležišta. U načelu, i sasvim orijentaciono, istražno bušenje se može opisati kao perkusiono, rotaciono i kombinovano, iako u takvoj gruboj podeli, postoji niz varijacija u vrsti opreme.

Uzorci se iz bušotine uzimaju koristeći određene alate predviđene za tu svrhu, najčešće su u obliku kocki, prizmi i cilindara. Kvalitet uzoraka direktno zavisi od načina uzimanja uzorka iz terena. Prema mogućnostima korišćenja uzoraka za pojedine vrste laboratorijskih ispitivanja mogu se razlikovati sledeće klase nivoa kvaliteta:

Klasa 1. Klasifikacija, vlažnost, zapreminska težina, jedinična težina, smičuća čvrstoća, edometarski opit.

Klasa 2. Klasifikacija, vlažnost, zapreminska težina.

Klasa 3. Klasifikacija i vlažnost.

Klasa 4. Samo klasifikacioni opiti.

33. Vrste uzoraka tla, uzimanje, pakovanje i transport.

Uzorci tla, prema kvalitetu mogu podeliti u dve glavne kategorije: poremećeni i neporemećeni. Kvalitet uzoraka direktno zavisi od načina uzimanja uzorka iz terena.

POREMEĆENI UZORCI tla imaju isti granulometrijski sastav kao i prirodno tlo iz kojeg su uzeti, ali im je struktura delimično ili potpuno narušena. Poremećeni uzorci se uglavnom koriste za terensku identifikaciju, laboratorijska klasifikaciona ispitivanja i opite zbijanja tla. Uzorci se jednostavno dobijaju iskopom iz sondažnih jama, bunara, galerija ili sa alata za bušenje nakon završenog manevra pri izvlačenju pribora na površinu terena ili od delova

jezgra. Poremećen uzorak sitnozrnog tla može imati prirodnu vlažnost koja se može sačuvati nakon uzimanja odgovarajućim hermetičkim pakovanjem i odrediti merenjem u laboratoriji.

NEPOREMEĆENI UZORCI su oni kod kojih je sačuvana vlažnost i sve čestice, pri čemu su koeficijent poroznosti i struktura izmenjeni u najmanjoj mogućoj meri.

RUČNO UZIMANJE UZORAKA. Uzorak u obliku kocke (ređe u obliku cilindra) vadi se ručno tako da se pažljivim radom mogu dobiti najbolji uzorci. Tlo se pažljivo uklanja sa strana uzorka tako da se formira mali stub. Ukoliko je uzorak čvrst i krut može se jednostavno odvojiti od mase jednim usecanjem ašova, upakovati u plastičnu foliju ili vreću da se sačuva njegova vlažnost, staviti u odgovarajuću krutu kutiju i transportovati automobilom u laboratoriju. Ako je uzorak male čvrstoće ili ako treba da bude transportovan železnicom ili kamionom koristi se čvrsta drvena kutija sa uklonjenim dnom i poklopcem se stavi preko uzorka, odnosno oko uzorka, tako da slobodan prostor bude *5-25 mm* sa svih strana, i lako se može zapuniti topljenim parafinom. Uzorak i kutija se uklone iz iskopa, parafin se sipa na dno i vrh, a kutija ili sanduk se zatvara pričvršćivanjem dna i poklopca.

Drugi način uzimanja neporemećenog uzorka koristi čelični cilindar, pa čak i ispražnjenu konzervu, uz dopunsku zaštitu otvorenog kraja drvenim ili metalnim poklopcima, opet uz odgovarajuću zaštitu parafinom radi čuvanja vlage. Tako formirani uzorci se zatim pakuju u sanduke sa strugotinom ili piljevinom.

Neporemećeni uzorci se mogu dobiti i utiskivanjem tankozidnog cilindra u tlo uz pažljivo uklanjanje suvišnog materijala na stepenicama ili na dnu jame. Prečnik cilindra se obično kreće *40-100 mm* a njegova visina je *25-100 mm*. Ne sme se dopustiti kontakt vode sa uzorkom. Uzorak se mora zaštititi od vetra i direktnog sunčanog zračenja. Orijentacija neporemećenog uzorka i njegov položaj moraju se jasno označiti tokom uzimanja i pakovanja.

NEPOREMEĆENI UZORCI IZ BUŠOTINA. Uzimanje neporemećenih uzoraka iz bušotine, bez obzira na primenjenu metodu bušenja, vrši se nakon čišćenja dna bušotine. Neporemećeni uzorci uzimaju se pomoću cilindra različite konstrukcije i dimenzije. Radi uzimanja uzorka, alat za bušenje se izvlači iz bušotine i na sukcesivno nastavljane bušaće šipke se učvrsti cilindar. Cilindar se u dno bušotine utiskuje udarima ili kontinualnim kvazi-statičkim pritiskom

34. Istražni radovi za potrebe fundiranja mosta.

Prave se istražne bušotine dubine 30 – 50m i više, ukoliko se naiđe na stenu poželjno je da se u nju buši bar 3m, rade se bar 3 bušotine.

35. Istražni radovi za potrebe putogradnje

36. Istražni radovi za potrebe fundiranja industrijske hale.

37. Elementi geotehničkog profila terena, način prikazivanja.

Na geotehničkim profilima se slojevi tla obavezno označavaju simbolima jedinstvene klasifikacije (AC), dodaje se opis stanja i vrste tla u skladu sa opšte prihvaćenim konvencijama.

38. Standardni penetracioni opit SPT. Opit statičke penetracije CPT.

STANDARDNI PENETRACIONI OPIT (SPT) se izvodi u bušotini, pri čemu se na niz bušačkih šipki, umesto alata za bušenje učvrsti standardizovana "penetraciona kašika". Uzeti uzorak ne može se smatrati neporemećenim. Prema izvornom standardu, opit se sastoji u brojanju udara maljem od 622.3 N, odnosno 63,5 kg, koji slobodno pada sa visine od 76,2 cm ≈ 76 cm kojim se postiže prodiranje od 30,48 cm ≈ 30 cm.

Obično se broj udara, za koji je međunarodna oznaka N , registruje za napredovanje od tri (3) sukcesivna prodiranja u intervalima od po 15 cm. Za prvih 15 cm prodiranja izbrojani udarci mogu biti manji ili veći od proseka zbog eventualnih poremećaja dna | bušotine, tako da je konačan rezultat N zbir brojanja u drugom i trećem intervalu pri ukupnom prodiranju od 30 cm.

Nakon pobijanja, uz brojanje udara, kašika se izvlači na površinu, odvnu se nož i glava, a u centralnom delu kašike, koji se može otvoriti, jer se sastoji od dvodelnog cilindra, dobija se reprezentativan poremećen uzorak.

Standardno se primenjuje međusobno odstojanje opita po dubini od 1.5 m a maksimalni interval ne treba da bude veći od 3.0 m.

Za orijentacionu procenu stanja konsistencije sitnozrnog tla, odnosno, relativnu zbijenost krupnozrnog tla, prevashodno peska, mogu se koristiti kriterijumi dati u sledećoj tabeli:

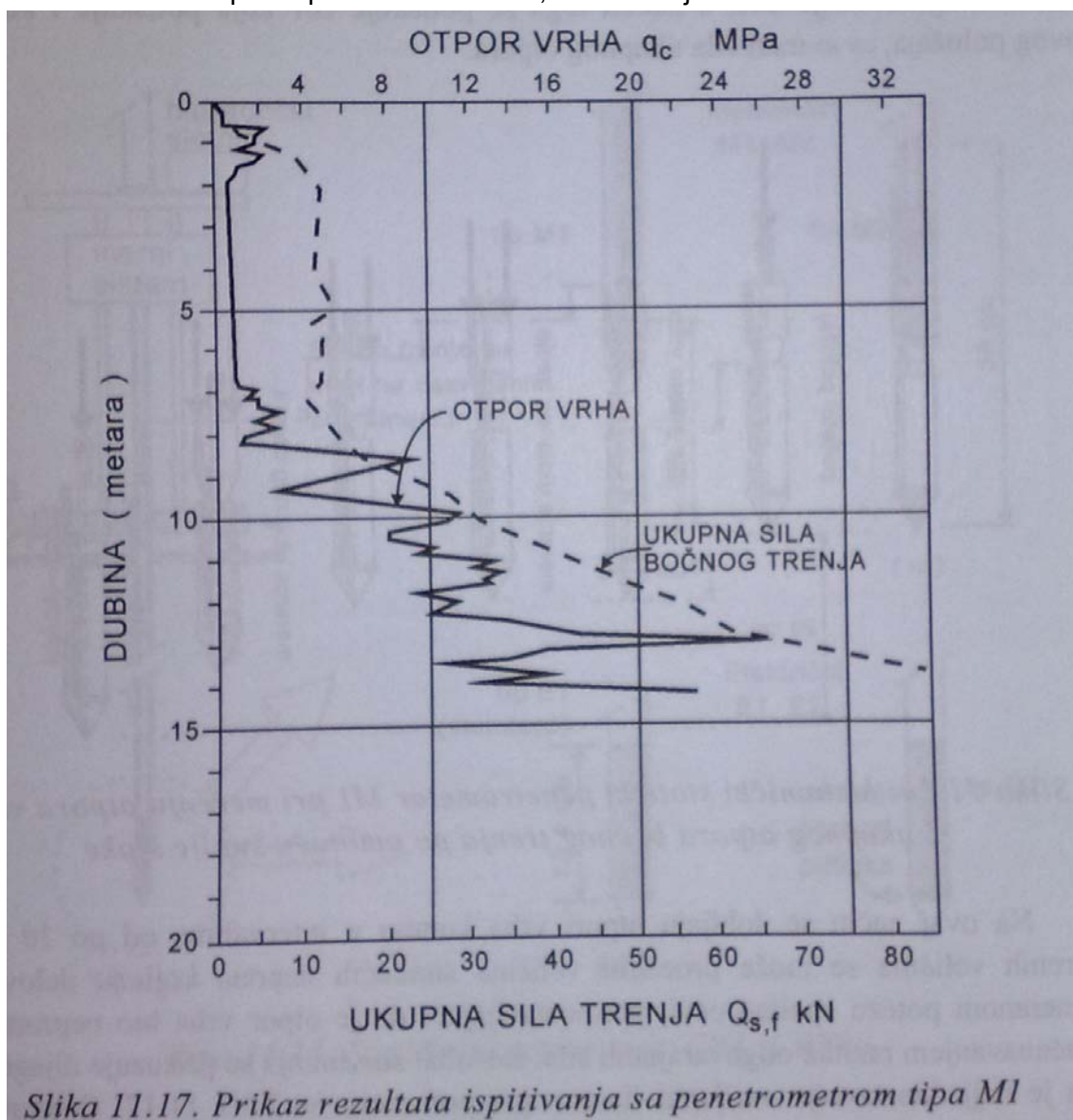
Broj udara malja N	Sitnozrno tlo	Broj udara malja N	Pesak
	Stanje konsistencije		Relativna zbijenost
0 - 2	tečno	0 - 4	vrlo rastresit
2 - 4	vrlo mekano	4 - 10	rastresit
4 - 8	mekano	10 - 30	srednje zbijen
8 - 15	polučvrsto	30 - 50	zbijen
15 - 30	čvrsto	> 50	vrlo zbijen

STATIČKI PENETRACIONI OPIT (CPT). Opitom statičke penetracije se meri otpor koji tlo pruža pri utiskivanju konusnog vrha penetrometra sa uglom od 60° i površinom projekcije osnove konusa od 10-15 cm². Merena veličina otpora vrha penetrometra ima dimenziju napona i označava se sa q_c , pri čemu brzina utiskivanja iznosi oko 2 cm/s.

Izvođenje CPT opita obično nije moguće u veoma tvrdim glinama, u šljunku i u krupnozrnog tlu, gde bi rezultat standardnog penetracionog opita N bio veći od oko 50, iako

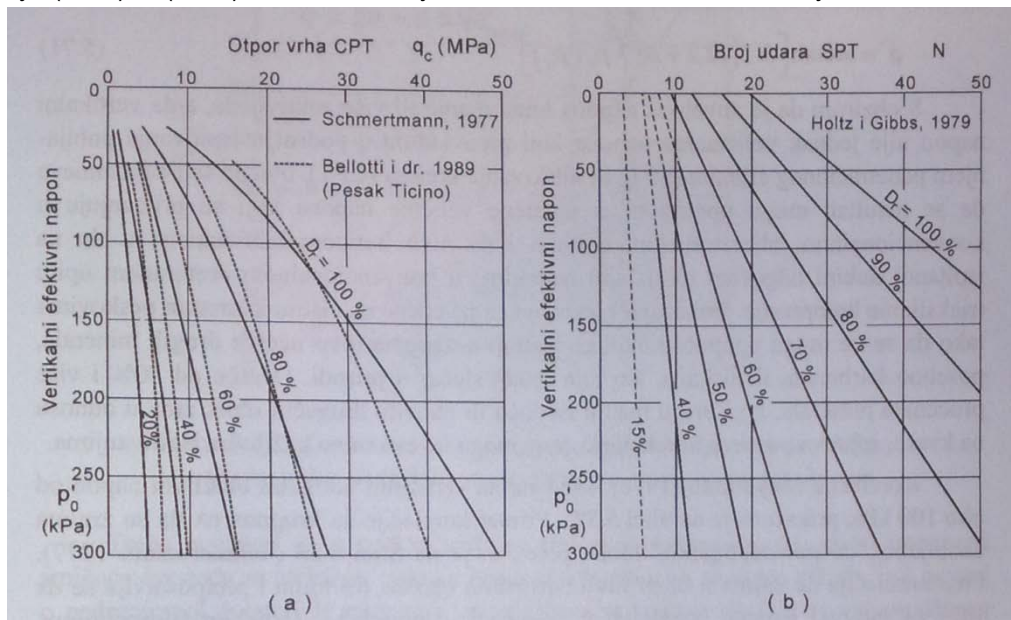
je deklarirani kapacitet pritiskne sile obično najmanje 50 do 100 kN, a češće i do 200 kN, osim u slučaju kada se upotrebi specijalno teška oprema, kamion sa kabinom u tovarnom delu iz koje se provodi utiskivanje i merenje. Očit se izvodi do dubine na kojoj se iscrpljuje navedena veličina raspoložive sile, odnosno do neke propisane dubine, ako se sila ne dostigne. U tipičnim slučajevima se očekuje da izvođač mora da obezbedi sav potreban pribor za izvođenje opita do dubine ne manje od 25 metara.

Veoma je preporučljivo da se izvestan broj penetracionih sondi locira u blizini bušotina. Ukoliko je bušotina izvedena pre penetracionog sondiranja, zbog mogućih poremećaja okolnog tla, CPT treba izvesti na odstojanju jednakom 20 prečnika bušotine, da bi se utvrdila vrsta tla u kojem su merene veličine q_c i f_s . Iz većeg broja komparativnih sondiranja moguće je ustanoviti vrstu tla preko pomenutih veličina, odnosno njihovih odnosa.



39. Korelacije rezultata statičkih i standardnih penetracionih ispitivanja.

Alternativa direktaoj korelaciji rezultata penetracionih ispitivanja sa uglom smičuće otpomosti je postupak kojim se, najpre uspostavlja zavisnost između rezultata penetracionih ispitivanja (SPT) ili (CPT) i relativne zbijenosti D_r odnosno indeksa zbijenosti I_d .



U primeni ove korelacije (a) pretpostavljen je koeficijent bočnog pritiska $K_0=0.45$. Ukoliko se proceni da je usled zbijanja ili prekonsolidacije horizontalni napon veći od tako pretpostavljenog, veličinu relativne zbijenosti treba očitati za vrednost vertikalnog efektivnog napona koji odgovara korigovanoj vrednosti horizontalnog početnog napona. Empirijski izraz u funkciji horizontalnog napona opisuje ovakvu zavisnost izrazom:

$$D_r \approx \frac{1}{2,38} \ln \left[\frac{q_c}{248(\sigma'_{h0})^{0,55}} \right] \times 100[\%]$$

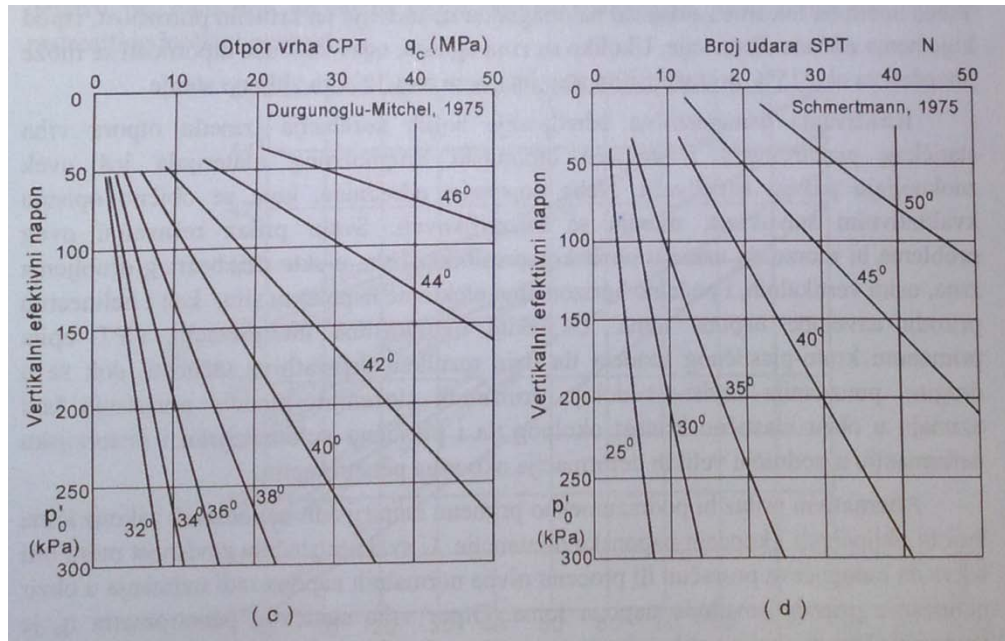
gde su obe veličine, koje imaju dimenzije napona, izražene u kPa.

Dovoljno tačna aproksimacija ovog dijagrama (b) upotrebljiva u praksi ima oblik:

$$D_r \approx \left(\frac{N}{0,23p'_0 + 16} \right)^{0,5} \times 100[\%]$$

gde je veličina vertikalnog efektivnog napona izražena u kPa.

Zavisnost ugla smičuće otpornosti od rezultata statičkog penetracionog opita:



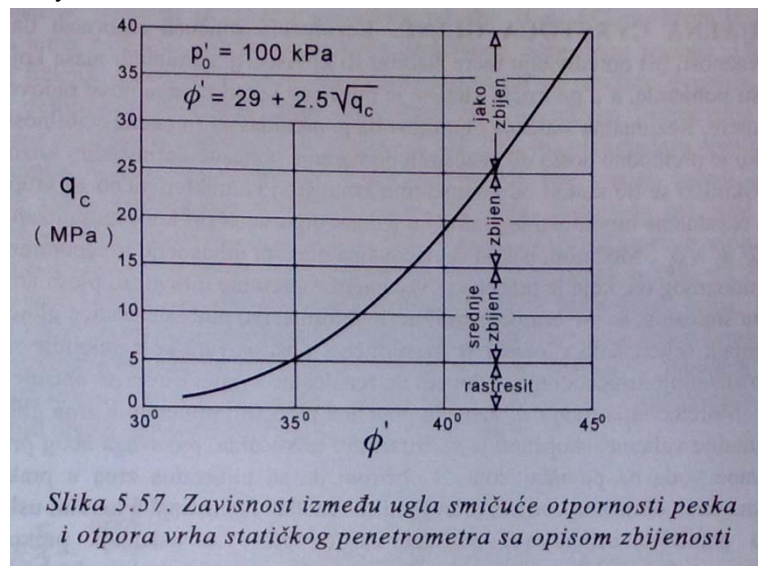
Za korelaciju otpora vrha statičkog penetrometra i ugla smičuće otpornosti, koji su za oko 2° veći od datih na dijagramu (c), mogu se aproksimirati empirijskom formulom:

$$\phi' = \arctan[0,1 + 0,38 \log(q_c/p'_0)]$$

Empirijska korelacija (d) između rezultata standardnog penetracionog opita N i ugla smičuće otpornosti za peskove može se aproksimirati izrazom:

$$\phi' = \arctan[N/(12,2 + 20,3 q_c/p'_0)]$$

Korelacija Majerhofa:



Slika 5.57. Zavisnost između ugla smičuće otpornosti peska i otpora vrha statičkog penetrometra sa opisom zbijenosti

40. Krilna sonda, način provođenja opita, rezultati, primenljivost.

Opit krilnom sondom se primenjuje za određivanje nedrenirane smičuće čvrstoće neispucalih i potpuno zasićenih glina *in situ*. Opit nije pogodan za ispitivanje drugih vrsta tla. Ovaj opit je posebno pogodan za ispitivanje mekih glina ($I_c < 0,25$) čija struktura može biti poremećena u procesu uzimanja uzorka i rukovanja uzorkom u pripremi za izvođenje opita, ili zbog meke do žitke konzistencije gline, uzimanje uzorka iz bušotine nije moguće konvencionalnim sredstvima, ali se upotrebljava i za gline sa nedreniranom čvrstoćom do 100 kPa.

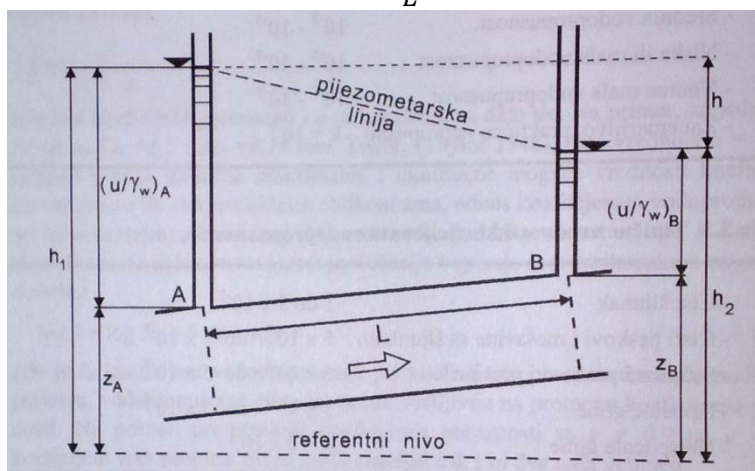
Sonda se pomoću šipke utisne u tlo, obično u dno bušotine, do dubine koja je bar tri puta veća od prečnika bušotine, a u mekim glinama, opit se može provoditi i direktno sa terena, bez primene bušenja. Na gornji kraj šipke se postepeno nanosi momenat torzije preko odgovarajućeg mehanizma, sve dok ne dođe do smičućeg loma gline usled rotacije sonde. Smicanje se odvija po omotaču i po bazama cilindra koje krilca sonde opisuju pri rotaciji. Brzina rotacije je između 6° i 12° u minuti.

Ova vrsta ispitivanja uvedena je jer se pokazalo da laboratorijska ispitivanja i sasvim malo poremećenih uzoraka gline daju znatno manje veličine nedrenirane smičuće čvrstoće od praktično neporemećenih.

41. Darsijev zakon filtracije.

Kada postoji razlika pijezometarskih nivoa između dve tačke, kao što je to prikazano na Slici 3.8, voda se kreće, teče, od tačke sa višim nivoom ka tački sa nižim pijezometarskim nivoom. Razlika totalnih pijezometarskih nivoa između tačaka A i B je $h_1 - h_2$, a odstojanje između njih je L . Hidraulički gradijent se definiše kao:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L}$$



Prema Darsijevom zakonu, (Darcy 1856), koji važi za strujanje u zasićenoj poroznoj sredini, količina vode koja protekne kroz presek sa površinom A , ili jednostavno protok Q , proporcionalan je hidrauličkom gradijentu:

$$Q = k i A = k \frac{h_1 - h_2}{L} A$$

gde je k konstanta proporcionalnosti koja ima dimenziju brzine.

Ova konstanta se naziva *koeficijentom vodopropusnosti* ili *koeficijentom filtracije*, a određuje se eksperimentom, merenjem za razmatrano tlo. Veličina Q se izražava zapreminom u jedinici vremena. Ako se ova veličina izrazi zapreminom vode koja u jedinici vremena protekne kroz presek jedinične površine, Darsijev zakon se izražava brzinom:

$$v = \frac{Q}{A} = k i$$

Gornji izraz se može napisati i u obliku:

$$v = k \frac{dh}{dL}$$

Gornji izraz ne opisuje stvarnu brzinu kretanja vode kroz pore, već neku fiktivnu brzinu koja daje protok kroz ukupan presek u tlu. S obzirom da se voda kreće samo između zrna, stvarna brzina kretanja čestica vode kroz pore tla je znatno veća.

42. Metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti tla.

Ne može se izračunati za opšti slučaj, pa se zbog toga određuje putem opita.

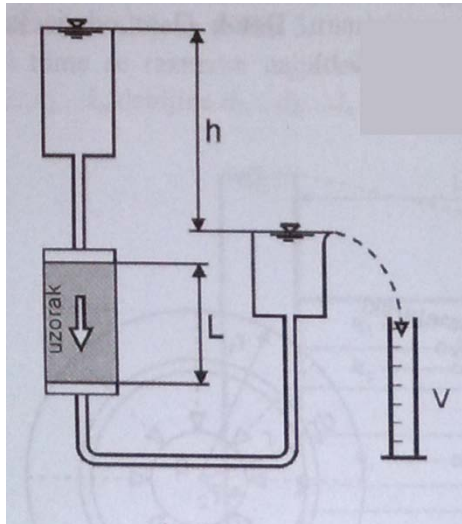
Može se određivati **opitom sa konstantnim pritiskom** ili **opitom sa opadajućim pritiskom**.

Za potrebe *in situ* određivanja može se dobiti opitom crpljenjem.

43. Ispitivanje vodopropusnosti tla sa konstantnim pritiskom.

Opit sa konstantnim pritiskom: uzorak tla se stavlja u cilindar visine L sa poprečnim presekom površine A . Voda teče pod pritiskom visine stuba vode h koja je tokom opita konstantna. Zapremina vode V , koja protekne u vremenu t , određuje se merenjem količine vode u menzuri. Koeficijent vodopropusnosti je:

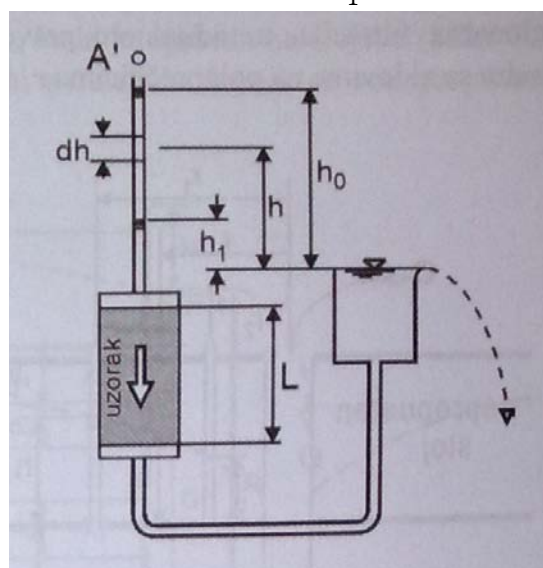
$$k = \frac{VL}{Aht}$$



44. Ispitivanje vodopropusnosti tla sa opadajućim pritiskom.

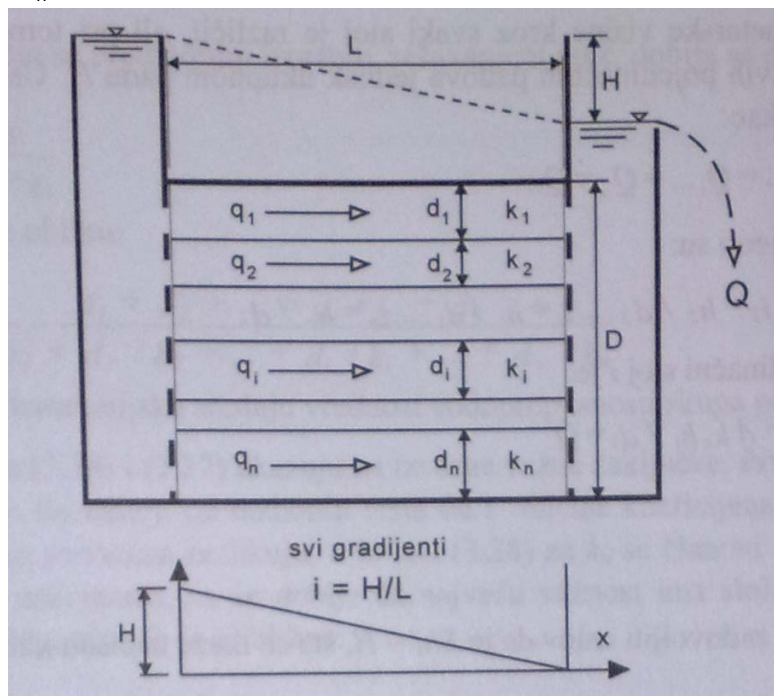
Opit sa opadajućim pritiskom koristi se za tla manje vodopropusnosti. Ovaj opit se upotrebljava za merenje manjih vodopropusnosti koje su svojstvene prašinama i glinama. Voda teče pod početnim pritiskom stuba vode visine h_0 . Nivo vode u bireti opada tokom opita tako da se na kraju vremenskog intervala t izmeri visina stuba vode h_1 . Količina istekle vode V se meri u bireti čija je površina unutarnjeg preseka A' . Koeficijent vodopropusnosti je:

$$k = \frac{A'L}{At} \ln \frac{h_0}{h_1}$$



45. Vodopropustnost horizontalno uslojenog tla u horizontalnom pravcu.

Razmatra najjednostavniji slučaj paralelnih slojeva sa vodopropusnošću $k_1, \dots, k_2, \dots, k_n$ debljine $d_1, \dots, d_2, \dots, d_n$.



U slučaju daje kretanje vode paralelno sa prostiranjem slojeva, kao što je to prikazano na Slici 3.11, ukupan protok kroz slojeve je jednak zbiru protoka kroz sve slojeve pri konstantnom gradijentu filtracije $i_i = i = H/L$ odnosno:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \frac{H}{L} \sum_{i=1}^n d_i k_i$$

Traži se prosečan ekvivalentni koeficijent vodopropusnosti k_x za koji je zadovoljen uslov da je protok kroz ceo paket slojeva, čija je debljina jednaka zbiru debljina pojedinačnih slojeva, isti kao i zbir protoka kroz pojedinačne slojeve, ili

$$Q = k_x \frac{H}{L} \sum_{i=1}^n d_i$$

Izjednačavanjem tako izraženih protoka i rešavanjem po k dobija se:

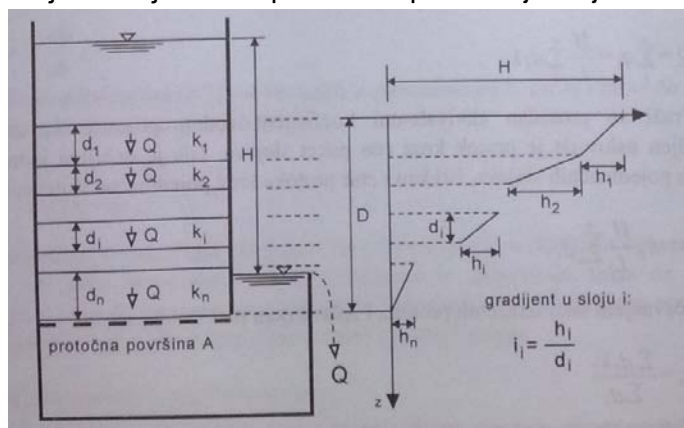
$$k_x = \frac{\sum d_i k_i}{\sum d_i}$$

Vidi se da je prosečna ili ekvivalentna vodopropusnost u pravcu paralelno sa pružanjem slojeva jednaka aritmetičkoj sredini, što se u razvijenom obliku može napisati kao:

$$k_x = \frac{k_1 d_1 + k_2 d_2 + \dots + k_i d_i + \dots + k_n d_n}{d_1 + d_2 + \dots + d_i + \dots + d_n}$$

46. Vodopropustnost horizontalno uslojenog tla u vertikalnom pravcu.

Moguća je situacija tečenja vode upravno na prostiranje slojeva.



U ovom slučaju protok Q prolazi kroz svaki sloj, pad pijezometarske visine kroz svaki sloj je različit, ali pri tome je zadovoljen uslov da je zbir svih pojedinačnih padova jednak ukupnom padu H . Uslov kontinuiteta se može napisati kao:

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_i = \dots = Q_n = Q$$

Hidraulički gradijenti su:

$$i_1 = h_1/d_1; i_2 = h_2/d_2; \dots i_i = h_i/d_i; \dots i_n = h_n/d_n$$

Protok vode kroz pojedinačni sloj i je:

$$Q_i = Ak_i i_i = \frac{Ak_i h_i}{d_i} = Q$$

odakle je:

$$h_i = \frac{Q d_i}{Ak_i}$$

pri čemu se mora zadovoljiti uslov da je $\sum h_i = H$, što se može napisati kao:

$$\frac{Q}{A} \sum \frac{d_i}{k_i} = H$$

Odavde se dobija protok:

$$Q = \frac{AH}{\sum d_i/k_i}$$

Koristeći koncept prosečne vodopropusnosti paketa slojeva u vertikalnom pravcu k_z koji zadovoljava uslov da je:

$$Q = \frac{Ak_z H}{\sum d_i}$$

i izjednačavanjem sa prethodnim izrazom, rešavanjem po k_z dobija se da je:

$$k_z = \frac{\sum d_i}{\sum d_i/k_i}$$

ili u razvijenom obliku:

$$k_z = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_i + \dots + d_n}{d_1/k_1 + d_2/k_2 + \dots + d_i/k_i + \dots + d_n/k_n}$$

što predstavlja harmonijsku srednju vrednost vodopropusnosti skupa paralelnih slojeva.

47. Faktori koji utiču na vodopropusnost tla.

Vodopropusnost zavisi od sledećih pet faktora:

1) zavisi od veličine zrna. Ukoliko su zrna veća, veće su i pore između njih, pa je i vodopropusnost veća. Ova zavisnost se može napisati u obliku $k = f(d_r)$ gde je d veličina zrna. Eksperimentalna istraživanja vodopropusnosti peskova koje je proveo Hazen (1911) su pokazala da se dobijeni rezultati mogu opisati formulom:

$$k = C(d_{10})^2$$

gde je d_{10} efektivni prečnik zrna izražen u centimetrima a C je koeficijent sa vrednošću između 100 i 150. Vodopropusnost je u cm/s . Gornji izraz važi za rastresite jednolične, uniformne peskove uz uslov da je $d_{10} > 0.05 mm$ i kod kojih je koeficijent jednoličnosti $C_u = d_{60}/d_{10}$ manji od 5. Za peskove sa većim koeficijentom $C_u = 10-20$ koeficijent C se smanjuje na oko 70.

2) zavisi od koeficijenta poroznosti. Koeficijent filtracije opada sa povećanjem zbijenosti tla, tj. sa smanjenjem poroznosti. Za peskove se ova zavisnost može opisati izrazom:

$$k = a \frac{e^3}{1 + e}$$

gde je e koeficijent poroznosti i a je konstanta za dato tlo. Za gline i glinovite materijale ova zavisnost je složenija i opisuje se logaritamskom zavisnošću u obliku:

$$\log k = \log k_0 + b(e - e_0)$$

gde je k_0 koeficijent vodopropusnosti pri koeficijentu poroznosti e_0 . Za razliku od peskova, vodopropusnost glina je znatno osetljivija na promenu koeficijenta poroznosti.

3) zavisi od viskoziteta vode koja pak zavisi od temperature. Rezultati se prikazuju za standardnu temperaturu $t = 20^\circ C$, što ne isključuje mogućnost da se ispitivanja i analize vrše i pri nekim drugim temperaturama. Zavisnost koeficijenta filtracije k_t na temperaturi t u odnosu na koeficijent filtracije k_{20} , pri temperaturi vode od 20° , data je u sledećoj tabeli:

$t(^{\circ}C)$	30	20	15	10	5
k_t/k_{20}	1.25	1.00	0.87	0.77	0.66

4) zavisi i od oblika zrna, njihove raspodele i povezanosti, tj. od strukture tla. Ovaj faktor se teško može kvantifikovati.

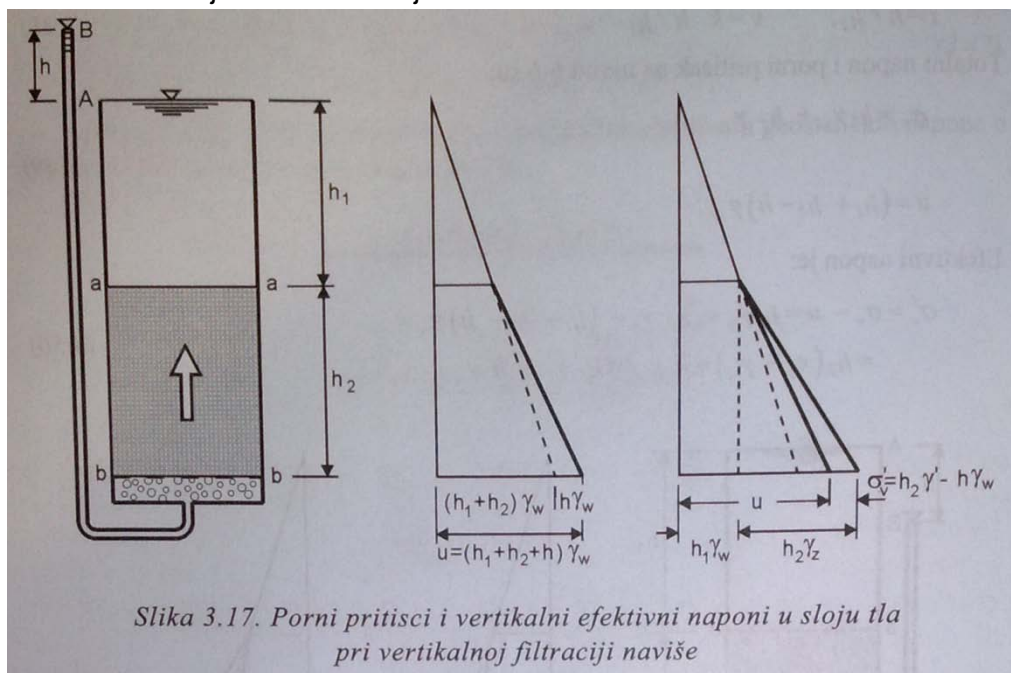
5) zavisi od količine vazduha ili gasa u porama. Prisustvo vazduha smanjuje vodopropusnost. Mehurići smanjuju efektivno slobodan presek za protok vode na sličan način kao i čvrsto zrno skeleta tla.

48. Kapilarno penjanje vode u tlu, red veličine visine kapilarnog penjanja.

49. Geostatički naponi u tlu – horizontalni teren sa nivoom podzemne vode.

50. Jednodimenzionalno kretanje vode naviše, kritični gradijent.

Vertikalno kretanje vode kroz sloj tla naviše:



Totalni napon i porni pritisak na nivou $b-b$ su:

$$\begin{aligned}\sigma_v &= h_1\gamma_w + h_2\gamma_z \\ u &= (h_1 + h_2 - h)\gamma_w\end{aligned}$$

Efektivni napon je:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = h_1 \gamma_w + h_2 \gamma_z - (h_1 + h_2 - h) \gamma_w = h_2 (\gamma_z - \gamma_w) + h \gamma_w = h_2 \gamma' + h \gamma_w$$

h je gornja granica za veličinu pijezometarske visine. Ako se h postepeno povećava, porni pritisak u preseku $b-b$ bi se mogao povećati do veličine koja je jednaka težini stuba tla i vode iznad razmatranog preseka, tj.:

$$(h_1 + h_2 - h) \gamma_w = h_1 \gamma_w + h_2 \gamma_z$$

ili:

$$\sigma'_v = h_2 \gamma' + h \gamma_w = 0$$

Kada je efektivni napon jednak nuli, nema kontakta između zrna tla i dolazi do pojave "*ključanja tla*" ili *fluidizacije*. Gornja jednačina daje:

$$h_2\gamma' = h\gamma_w$$

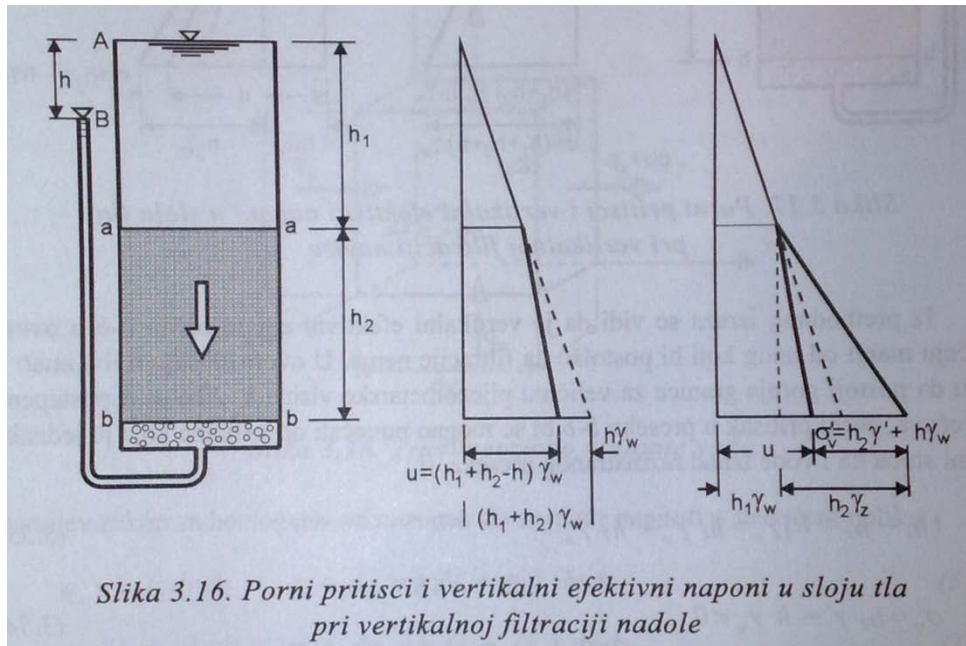
iii:

$$\frac{h}{h_2} = i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

što definiše veličinu kritičnog vertikalnog gradijenta filtracije i_{cr} pri kojem dolazi do ključanja (fluidizacije) tla.

51. Jednodimenzionalno kretanje vode naniže, totalni i efektivni naponi.

Voda se kreće kroz sloj prašinatog peska i ulazi u niži sloj peska i šljunka.



Gubitak pijezometričke visine pri filtraciji između nivoa *a-a* i *b-b* je *h*. Na nivou *a-a* porni pritisak je $h_1\gamma_w$ a na nivou *b-b* je $(h_1+h_2-h)\gamma_w$. Gradijent filtracije i brzina su:

$$i = h/h_2 \quad v = k \frac{h}{h_2}$$

Totalni napon i porni pritisak na nivou *b-b* su:

$$\begin{aligned} \sigma_v &= h_1\gamma_w + h_2\gamma_z \\ u &= (h_1 + h_2 - h)\gamma_w \end{aligned}$$

Efektivni napon je:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = h_1\gamma_w + h_2\gamma_z - (h_1 + h_2 - h)\gamma_w = h_2(\gamma_z - \gamma_w) + h\gamma_w = h_2\gamma'_z + h\gamma_w$$

52. Diferencijalna jednačina filtracije.

Za nestišljiv skelet:

$$\left(k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) dx dy dz = 0$$

Za stišljiv skelet:

$$\left(k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) dx dy dz = \frac{d\varepsilon_z}{dt}$$

Rešenje je:

$$h = -\frac{H}{L}x + H$$

Rešenje ukazuje da pijeziometarska visina h opada linearno od H za $x=0$ do 0 za $x=L$. Pošto je brzina proporcionalna veličini dh/dx , znači da je brzina konstantna u datom domenu.

53. Strujna mreža, principi konstruisanja.

Jedna od relativno jednostavnih metoda za rešavanje zadataka filtracije u ravni koristi aproksimativan grafički postupak koji se sastoji u probanju i korekciji skica strujne mreže koje zadovoljavaju granične uslove.

U izotropnom domenu strujanja treba zadovoljiti uslov da se strujnice i ekvipotencijale seku pod pravim uglom. Osim toga pogodno je usvojiti da je strujna mreža takva da je $\Delta\psi$ ista vrednost između dve susedne strujnice i da je $\Delta\phi$ ista vrednost između dve susedne ekvipotencijale. Pogodno je usvojiti da je $\Delta s = \Delta n$ tako da strujnice i ekvipotencijale čine mrežu "zakrivljenih kvadrata". U tom slučaju je za svaki zakrivljeni kvadrat $\Delta\psi = \Delta\phi$, iz čega sledi $\Delta\psi = \Delta q$ i $\Delta\phi = k\Delta h$, tako da je proticaj između dve susedne strujnice $\Delta q = k\Delta h$ pri hidrauličkom gradijentu $i = \Delta h/\Delta s$.

Za celokupnu strujnu mrežu je:

H razlika visina između prve i poslednje ekvipotencijale

N_e broj intervala padova ekvipotencijala od kojih svaki predstavlja jednaku vrednost pada Δh

N_f broj "kanala" između susednih strujnica kroz koji teče isti protok Δq .

Iz gore navedenih definicija se lako može zaključiti da je razlika pijeziometarskih visina između svake dve susedne ekvipotencijale:

$$\Delta h = \frac{H}{N_e}$$

i da je ukupni protok u jedinici vremena za jediničnu dimenziju upravnu na ravan filtracije:

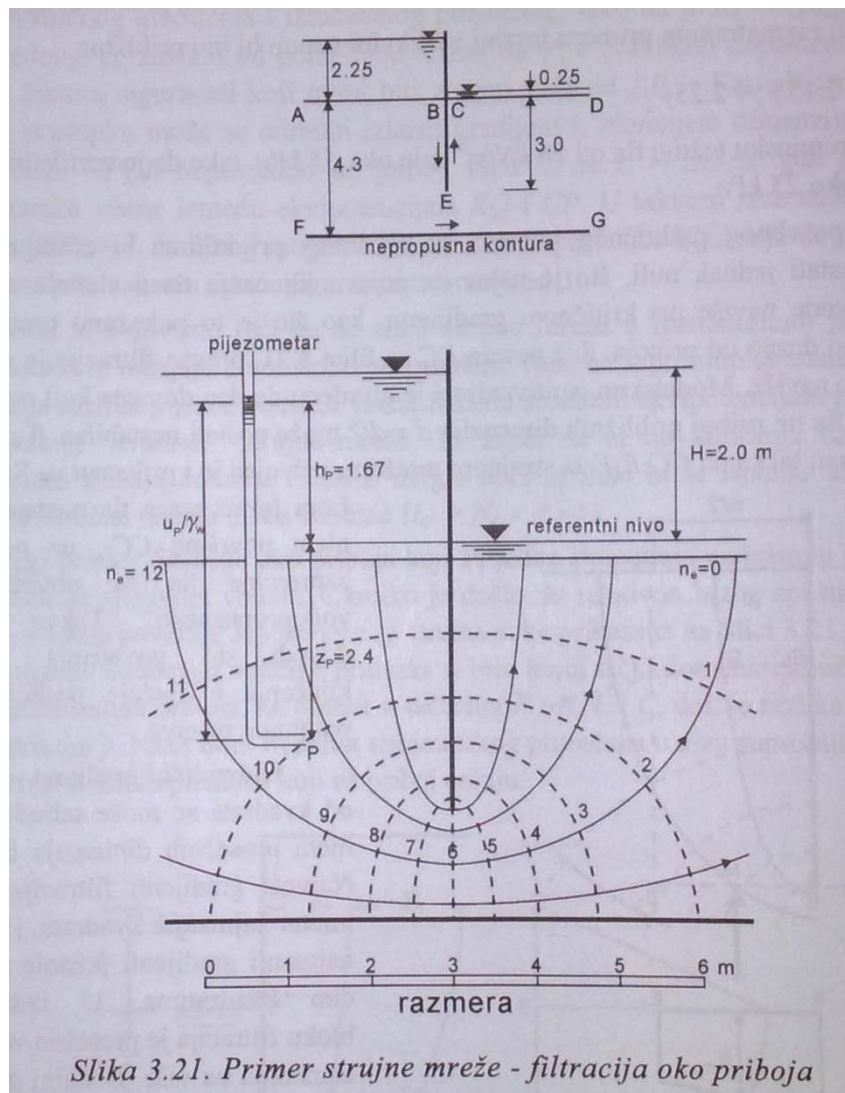
$$q = \sum_1^{N_f} \Delta q = N_f \Delta q$$

što se može prikazati i u konačnom obliku u funkciji odnosa N/N_e :

$$q = kH \frac{N_f}{N_e}$$

Primer:

Principi konstruisanja strujne mreže ilustriraju se primerom. Priboj pobjen $3,0\text{ m}$ u sloj vodopropusnog tla debljine $4,3\text{ m}$, koji se nalazi na nepropusnoj podlozi; sa jedne strane priboja voda je duboka $2,25\text{ m}$, a sa druge strane nivo je crpljenjem spušten do dubine od $0,25\text{ m}$. Najpre se razmotre granični uslovi. U svakoj tački na konturi AB pijezometarska visina je konstanta i zbog toga je AB ekvipotencijala, a slično tome je i CD ekvipotencijala. U problemima filtracije pogodno je za referentni nivo usvojiti nizvodni nivo vode, tako da je ukupna pijezometarska visina na ekvipotencijali CD jednaka nuli. Ukupna pijezometarska visina na ekvipotencijali AB je $2,0\text{ m}$. U tački B voda mora teći naniže, duž uzvodne konture priboja BE , oko vrha priboja E a zatim naviše duž nizvodne konture priboja EC . Iz tačke F tok se odvija duž nepropusne konture FG . Zato su BEC i FG granične strujnice.



Dalji postupak rešavanja obično podrazumeva probno crtanje neke strujnice, a zatim konstruisanje ostalih strujnica u njoj okolini. Pri tome se mora imati u vidu da nacrtane strujnice treba da zaklapaju prav ugao sa ekvipotencijalama koje su već delimično date graničnim uslovima, kao i da nove ekvipotencijale seku pretpostavljene strujnice pod pravim uglovima tako da se, na kraju, dobija mreža iskrivljenih kvadrata. Konačno ispravan i prihvatljiv rezultat se može dobiti sukcesivnim probanjem, crtanjem i brisanjem uz korišćenje

meke olovke i dobre gumice za brisanje. Alternativno, do rešenja se može doći i eksplicitnim nizom skica strujnih mreža, pri čemu svaka nova probna konstrukcija predstavlja poboljšanje prethodnog rešenja. Treba imati u vidu da broj celih kanala može da se kao rešenje pojavi samo slučajno. U opštem slučaju površina između poslednje strujnice i donje konture ne mora biti izdvojena na kvadrate, već na pravougaonike, ali se tu podrazumeva da odnos između dužina srednjih linija ovih pravougaonika duž kanala mora biti približno konstantan. Praktično je pravilo da nije preporučljivo crtati preveliki broj strujnica; najčešće je za praktične potrebe sasvim dovoljno 4 do 5 strujnica.

Strujna mreža se sastoji od 4,3 kanala i 12 intervala padova između ekvipotencijala. Prema tome, odnos N/N_e je 0,36. Ekvipotencijale su numerisane sa n počev od nule na nizvodnoj konturi.

54. Strujna mreža, određivanje protoka.

Za celokupnu strujnu mrežu je:

H razlika visina između prve i poslednje ekvipotencijale

N_e broj intervala padova ekvipotencijala od kojih svaki predstavlja jednaku vrednost pada Δh

N_f broj "kanala" između susednih strujnica kroz koji teče isti protok Δq .

Iz gore navedenih definicija se lako može zaključiti da je razlika pijezometarskih visina između svake dve susedne ekvipotencijale:

$$\Delta h = \frac{H}{N_e}$$

i da je ukupni protok u jedinici vremena za jediničnu dimenziju upravnu na ravan filtracije:

$$q = \sum_{1}^{N_f} \Delta q = N_f \Delta q$$

što se može prikazati i u konačnom obliku u funkciji odnosa N/N_e :

$$q = kH \frac{N_f}{N_e}$$

55. Strujna mreža, određivanje pornog pritiska.

Porni pritisak tacke P se racuna po formuli:

$$u_p = \gamma w(h_p \pm h_z)$$

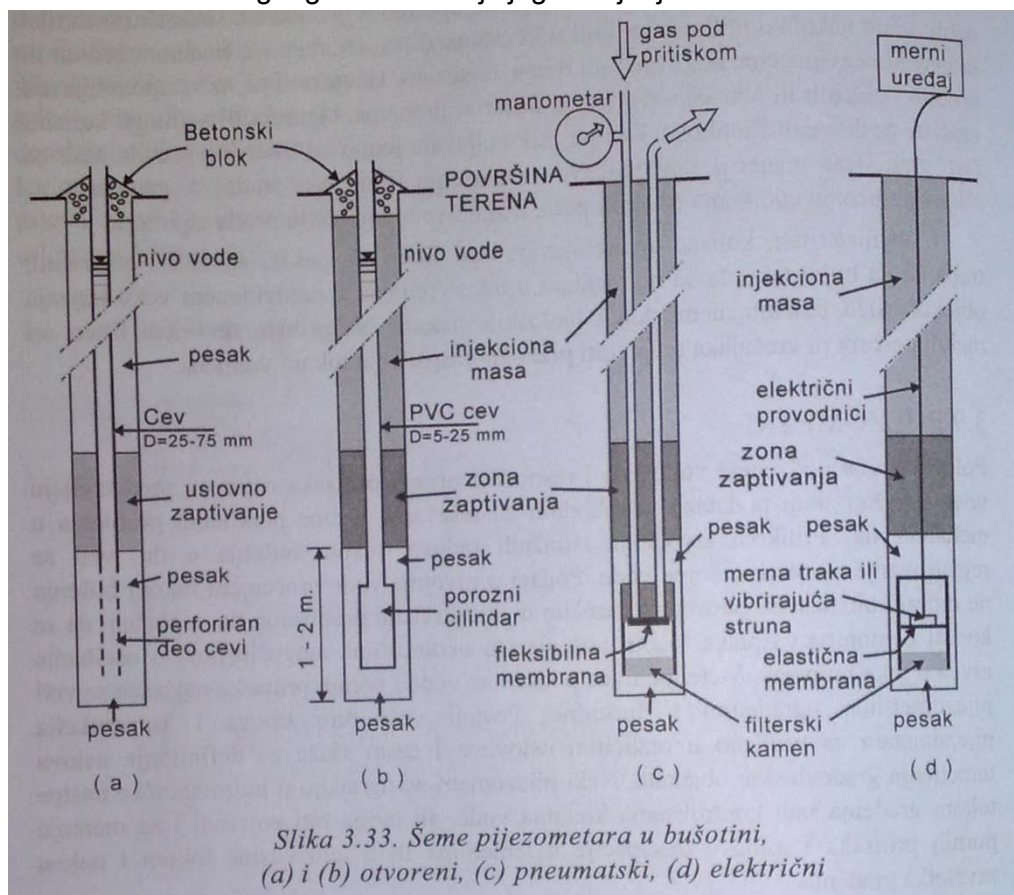
Znak plus će biti ukoliko se tačka P nalazi ispod refentnog nivoa (pijezometarske kote), a znak minus ukoliko se tačka P nalazi iznad referentnog nivoa (pijezometarske kote).

56. Pijezometar, vrste i principi merenja.

Merenja nivoa podzemne vode i pornih pritisaka najčešće se vrši pijezometrima ugrađenim u bušotine. Postoji veći broj tipova i konstrukcija pijezometara za primenu u različitim uslovima i često služe za definisanje uslova temeljenja građevinskih objekata. Neki pijezometri se ugrađuju u hidrotehničke nasipe tokom građenja radi kontrolisanja kretanja vode, ali mogu biti potrebni i za merenje pornih pritisaka i njihove discipacije u temeljima ili u telu nasipa tokom i nakon završetka građenja.

Pijezometar se ponaša kao bunar koji omogućava vertikalnu vezu između slojeva kroz koje prolazi i merenja mogu navesti na pogrešne zaključke. Zato se takav pijezometar može opravdati samo ako se ugrađuje u homogen vodopropustan sloj, kada se može pretpostaviti da porni pritisak raste linearno sa dubinom. Radi pouzdanijeg merenja potrebno je izvesti zaptivanje iznad perforiranog dela cevi.

Primenjuju pijezometri sa zatvorenim hidrauličkim sistemom, (hidraulički, pneumatski, električni), koji na promenu pijezometarskog pritiska reaguju sa rminimalnom prome-nom zapremine u sistemu i zbog toga bez značajnijeg kašnjenja.



Primenjuju se:

Hidraulički pijezometar je razvijen za potrebe merenja pornih pritisaka u nasutim branama. Pijezometarski element od fine porozne keramike je spojen sa dve cevi (sa manometrima na oba kraja), što omogućava i da se iz sistema eliminiše vazduh cirkulacijom vode pod pritiskom.

Pneumatski pijezometar (Slika 3.33-c) se sastoji od dve cevi. Pri merenju se na jednom kraju cevi nanese pritisak gasa i meri veličina pritiska potrebna da otvori ventil izložen pornom pritisku. Pri tome se izmeri veličina pritiska u momentu naglog pada pritiska gasa koji na površinu izlazi kroz drugu cev.

Električnim pijezometrima se meri deformacija baždarene elastične membrane izložene pritisku vode (Slika 3.33-d). Deformacija se pretvara u signal primenom elastične strune, merne trake ili merenjem promene električnog otpora u mernom uređaju.

Hidraulički, pneumatski i električni uređaji, za razliku od otvorenog pijezometra, mogu se ugrađivati u nasipe i nasute brane polaganjem merne ćelije u sloj tla tokom nasipanja, bez izvođenja bušotine, pri čemu merno mesto može biti na izvesnom horizontalnom odstojanju i ispod nivoa tačke u kojoj se meri porni pritisak.

57. Filterska pravila, zonirani filteri.

Za drenažni materijal se iz razloga sigurnosti bira tlo sa takvim granulometrijskim sastavom koji onemogućava iznošenje čestica, a da se pri tome i gradijenti filtracije svedu na minimalnu meru.

Drenažni sistemi, koji se grade u tlu radi kontrolisanog kretanja vode, moraju da zadovolje sledeća dva konfliktna zahteva:

A. Veličine pora filtera moraju biti dovoljno male kako bi sprečile iznošenje materijala iz susedne, branjene zone.

B. Vodopropusnost mora biti dovoljno velika kako bi se omogućila brza evakuacija vode koja u filter utiče sa relativno malim gradijentima.

Ovi zahtevi se ispunjavaju zadovoljavanjem eksperimentalno i empirijski utvrđenih *filterskih pravila*, od kojih je znatan broj specifikovan za pojedine tipove materijala. Ako je D veličina zrna filtera, a d je veličina zrna branjenog tla, najčešće se podrazumeva da su zadovoljene sledeće tri grupe uslova:

Uslov 1.a

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5 \text{ ili } D_{15} < 5d_{85}$$

Uslov 1.a kojim se ispunjava zahtev A, osigurava da se migracija čestica finijeg tla u pore skeleta krupnijeg filtera može sprečiti ukoliko je oko 15 % zrna d_{85} branjenog materijala veće od efektivne veličine pora filtera. Efektivna veličina pora odgovara približno $D_{15}/5$. Ovaj uslov sadrži implicitno i faktor sigurnosti od oko 2, jer je granična vrednost gore navedenog odnosa oko 9.

Uslov 1.b

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} < 25 \text{ ili } D_{50} < 25d_{50}$$

Kriterijum izražen odnosom 25 važi za dobro građuirana tla ukoliko se primenjuje filter sa koeficijentom jednoličnosti $C_u = 6$. Teorijske vrednosti datog odnosa su 30 za $C_u = 8$, 40 za $C_u = 15$, i 50 za $C_u = 18-20$. Ukoliko su oba materijala u kontaktu dobro građuirana, sa poluzaobljenim zrnima, odnos je 12 do 58, a sa rogljastim 9 do 30. Ukoliko su oba materijala jednolična, tako da je $D_{15} < 8 D_5$, odnos je 5 do 10.

Uslov 1.c

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} < 20 \text{ ili } D_{15} < 20d_{15}$$

Gore naveden odnos izražen brojem 20 ukoliko su oba materijala u kontaktu dobro graduirana, sa poluzaobljenim zrnima, odnos je 12 - 40, a sa rogljastim 6 -18.

Uslov 2.

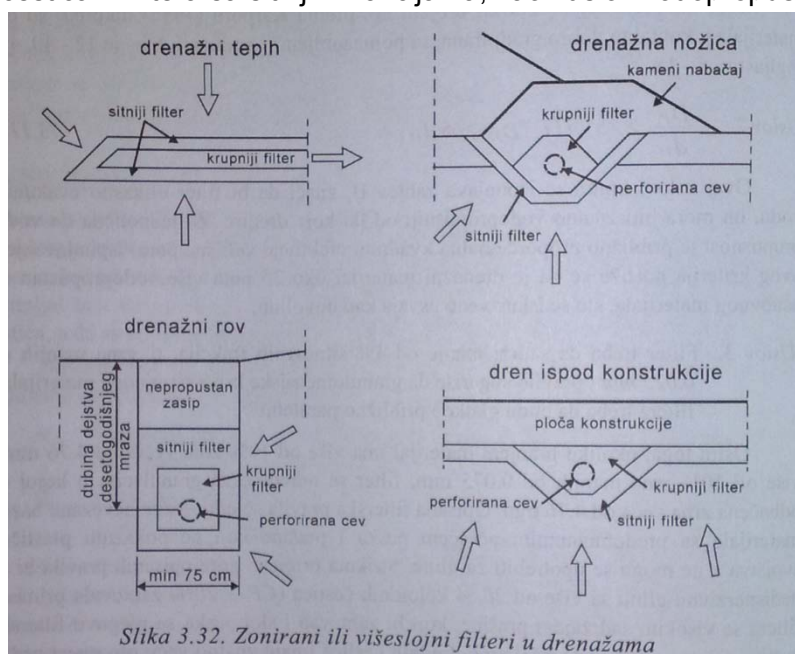
$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 5 \text{ ili } D_{15} > 5d_{15}$$

Ovaj uslov, kojim se ispunjava zahtev B, znači da bi filter efikasno evakuisao vodu, on mora biti znatno vodopropusniji od tla koje drenira. Za jednolična tla vodo-propusnost je približno proporcionalna kvadratu efektivne veličine pora. Ispunjavanjem ovog kriterija postiže se da je drenažni materijal oko 25 puta više vodopropustan od osnovnog materijala, što se iskustveno usvaja kao dovoljno.

Uslov 3. Filter treba da sadrži manje od 5% sitnozrnih frakcija, tj. zrna manjih od 0.075 mm i pravilo sugeriše da granulometrijske krive branjenog materijala i filtera treba da budu glatke i približno paralelne.

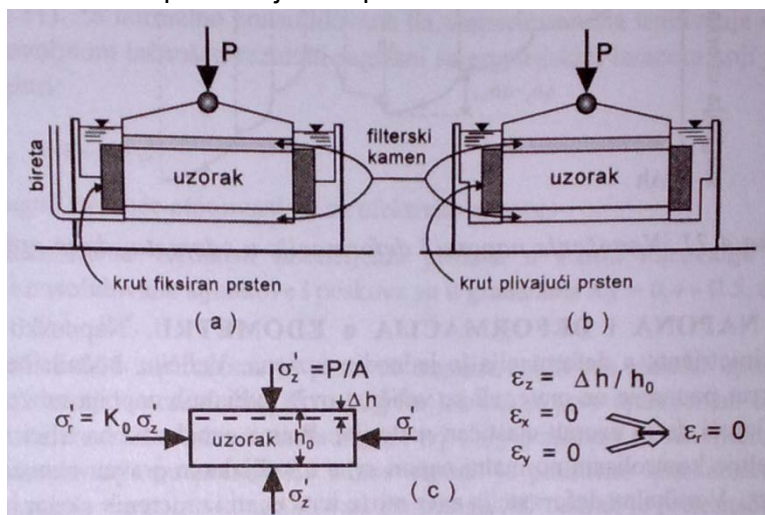
Opisana filterska pravila se odnose na nevezane bazne materijale sa predominantnim učešćem peska i prašine koji ne pokazuju plastična svojstva a ne mogu se upotrebiti za gline. Striktna primena gore opisanih pravila bi za nedisperzivnu glinu sa više od 20 % koloidnih čestica (CF > 20%) zahtevala primenu filtera sa visokim sadržajem prašine, koji bi zahtevao i sloj peska za njegovu filtersku zaštitu.

U nekim okolnostima, sa raspoloživim materijalima koji bi bili predviđeni za filtere, nije moguće zadovoljiti navedene uslove sa jednim slojem filtera, najčešće zbog prevelikog učešća sitnozrnih frakcija prašine. Ukoliko se pokaže da je eliminisanje sitnih frakcija ispiranjem ili sejanjem nepraktično ili neekonomično, predviđaju se višeslojni filteri, koji na svojim granicama treba da zadovolje odgovarajuće filterske kriterijume. U slučaju dvoslojnog filtera, filterski sloj u kontaktu sa branjenim materijalom zadovoljava uslov kojim se sprečava ispiranje zrna, dok sledeći, krupniji filter, mora zadovoljiti oba uslova, tj. uslov sigurnosti protiv ispiranja čestica iz filtera sa sitnijim frakcijama, kao i uslov vodopropusnosti.

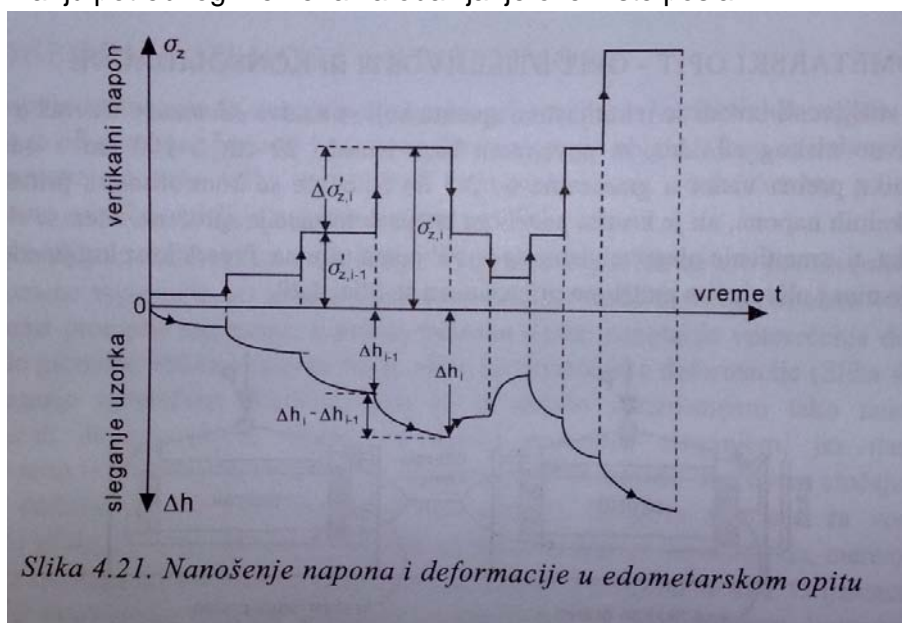


58. Edometar, aparat, način provođenja opita.

Opit stišljivosti izvodi se u kutijastom aparatu koji se naziva *edometar*. Uzorak u obliku relativno niskog cilindra, sa površinom baze između 20 cm^2 i 100 cm^2 i odnosom prečnika prema visini u granicama od 2.5 do 5, izlaže se kontrolisanim priraštajima vertikalnih napona, ali je krutim prstenom bočna deformacija sprečena. Meri se sleganje uzorka, tj. smanjenje njegove visine sa povećanjem napona.



Porozne pločice na bazama uzorka omogućavaju evakuaciju vode u procesu konsolidacije, dok se promena zapremine registruje merenjem promene visine uzorka. Opterećenje se nanosi stepenasto. U početnom stanju uzorak se opterećuje malim naponom od oko 5 do 10 kPa koji obezbeđuje kontakt između ploče za opterećivanje, poroznih pločica i uzorka. Ovo malo "nulto" opterećenje se uzima kao početno, nulto, a nakon toga se opterećivanje vrši stepenasto, pri čemu je uobičajeno da je odnos veličina vertikalnih napona između dve susedne stepenice opterećenja oko 2, na primer: 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa, itd. Uobičajeno je da svaka stepenica opterećenja traje 24 časa, izuzetno i do 48 časova. Praktično neizbežan nedostatak je da opiti relativno dugo traju, što se mora imati u vidu pri planiranju potrebnog vremena za obavljanje ove vrste posla.



Slika 4.21. Nanošenje napona i deformacije u edometarskom opitu

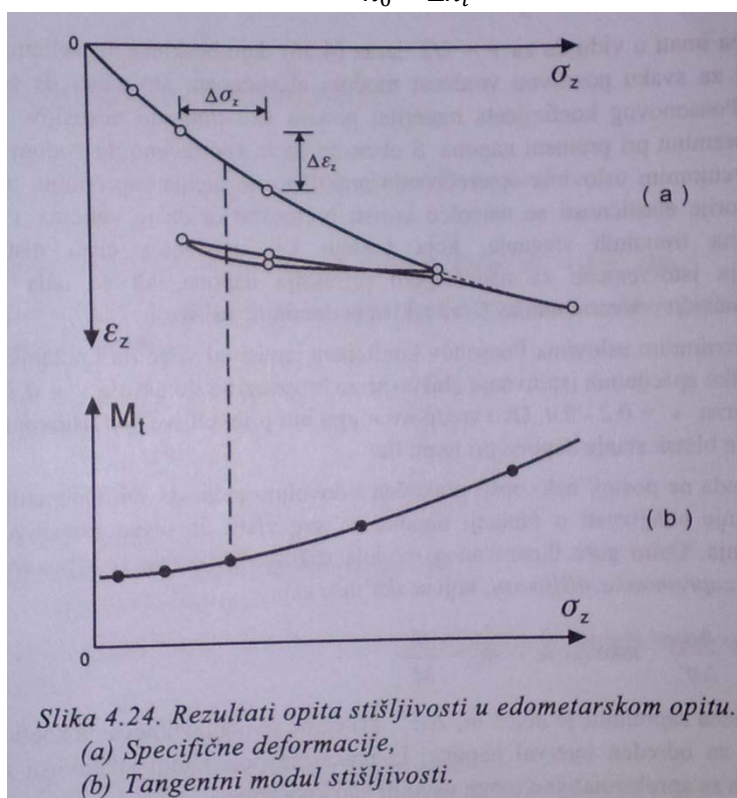
59. Modul stišljivosti M_v , koeficijent zapreminske stišljivosti m_v .

Zbog toga što se tlo može samo aproksimativno tretirati kao elastičan materijal, za interval napona $\Delta\sigma'_z = \sigma'_{z,i} - \sigma'_{z,i-1}$ može se definisati tangenti, odnosno **sekantni modul stišljivosti** kao:

$$M_v = \frac{\Delta\sigma'_z}{\Delta\varepsilon_z}$$

Ako je neoptereće uzorak tla u edometru imao početnu visinu h_0 i pri stepenici opterećenja "i" smanjio visinu za Δh_i , specifična deformacija je:

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{\Delta h_i - \Delta h_{i-1}}{h_0 - \Delta h_i}$$



Slika 4.24. Rezultati opita stišljivosti u edometarskom opitu.
(a) Specifične deformacije,
(b) Tangentni modul stišljivosti.

Za opisivanje stišljivosti se pored modula stišljivosti M_v , koristi i **koeficijent zapreminske stišljivosti m_v** :

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon_z}{\Delta\sigma'_z} \text{ tako da je } m_v = \frac{1}{M_v}$$

60. Odnosi glavnih napona u edometarskom opitu, elastično i realno tlo.

61. Veza između modula stišljivosti i modula elastičnosti.

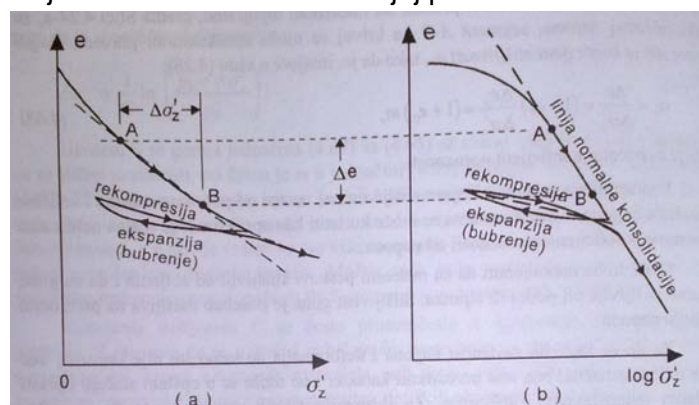
Veza između M_v i modula elastičnosti E' :

$$M_v = \frac{1 - \nu'}{(1 - 2\nu')(1 + \nu')} E'$$

što znači da za elastičan materijal M_v zavisi od Poasonovog koeficijenta ν' i E' .

62. Indeks stišljivosti C_c , indeks rekompresije C_r , indeks bubrenja C_s .

Prednost polu-logaritamskog dijagrama je u tome što je za većinu glinovitih materijala jedan deo krive približno prava linija, kao što je A-B. Krivina na dijagramu $e-\log \sigma'_z$ odražava istoriju napona kojima je uzorak bio izložen u svojoj prošlosti.



Nagib prave A-B definisan je veličinom **indeksa stišljivosti** C_c koja predstavlja promenu koeficijenta poroznosti za desetostruko povećanje napona tako da je:

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\log[(p'_0 + \Delta \sigma'_z)/p'_0]}$$

Negativan znak samo pokazuje da e opada sa porastom efektivnih napona, ali se u praktičnoj primeni ovaj znak obično podrazumeva i izostavlja.

Specifična deformacija je:

$$\varepsilon_z = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{p'_0 + \Delta \sigma'_z}{p'_0}$$

Histerezisna petlja pri rasterećenju (dekompresiji) i ponovnom opterećenju (rekompresiji) je aproksimirana jednom linijom čiji je nagib definisan indeksom bubrenja C_s ili indeksom rekompresije C_r koji je, slično definiciji indeksa stišljivosti C_c , jednak:

$$C_r = - \frac{\Delta e}{\log(p'_c/p'_0)} \approx C_s$$

Ako je $p'_0 + \Delta \sigma'_z \leq p'_c$ tada je specifična deformacija:

$$\varepsilon_z = \frac{C_r}{1 + e_0} \log \frac{p'_0 + \Delta \sigma'_z}{p'_0}$$

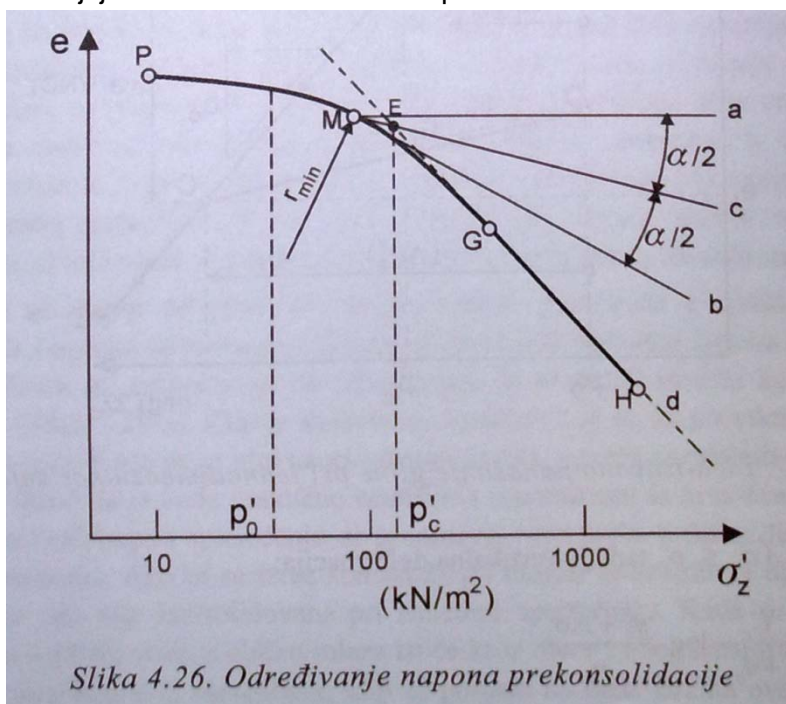
Ako je $p'_0 + \Delta \sigma'_z > p'_c$ tada je specifična deformacija:

$$\varepsilon_z = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{p'_0}{p'_c} + \frac{C_r}{1 + e_0} \log \frac{p'_0 + \Delta \sigma'_z}{p'_c}$$

63. Određivanje napona prekonsolidacije (p_c) prema Kasagrandeu.

Najjednostavniji postupak za određivanje napona prekonsolidacije, a koji je i u najširoj primeni je metod koji je dao Casagrande (1936). On je izveo geometrijsku konstrukciju prikazanu na Slici 4.26, iz koje bi se odredila tačka E sa koeficijentom poroznosti pri maksimalnom efektivnom naponu u prošlosti prirodnog tla p'_c na koje deluje neki manji napon, koji se označava sa p'_0 kada je opterećivanjem uzorka tla u edometru dobijena zavisnost opisana krivom PGH . Ovaj postupak podrazumeva konstrukciju koja se sastoji od sledećih koraka:

1. Izabrati tačku M na mestu maksimalne zakrivljenosti krive PGH
2. Povuci horizontalnu liniju a u tački M
3. Povuci tangentu b na krivu PGH u tački M
4. Nacrtati simetralu ugla α , između pravih a i b , koja je označena sa c
5. Produžiti GH , linearni segment krive PGH do preseka sa c u tački E
6. Tačka E definiše napon prekonsolidacije p'_c , veličinu maksimalnog vertikalnog efektivnog napona koji je na uzorak tla delovao u prošlosti.



64. Veličina specifične deformacije u slučaju delimične prekonsolidacije.

65. Konstanta stišljivosti C.

Predstavlja opis nelinearne veze između napona i deformacije i može se upotrebiti ako je promena visine uzorka podeljena sa početnom visinom približno prava linija u polu – logaritamskom dijagramu. Računa se formulom:

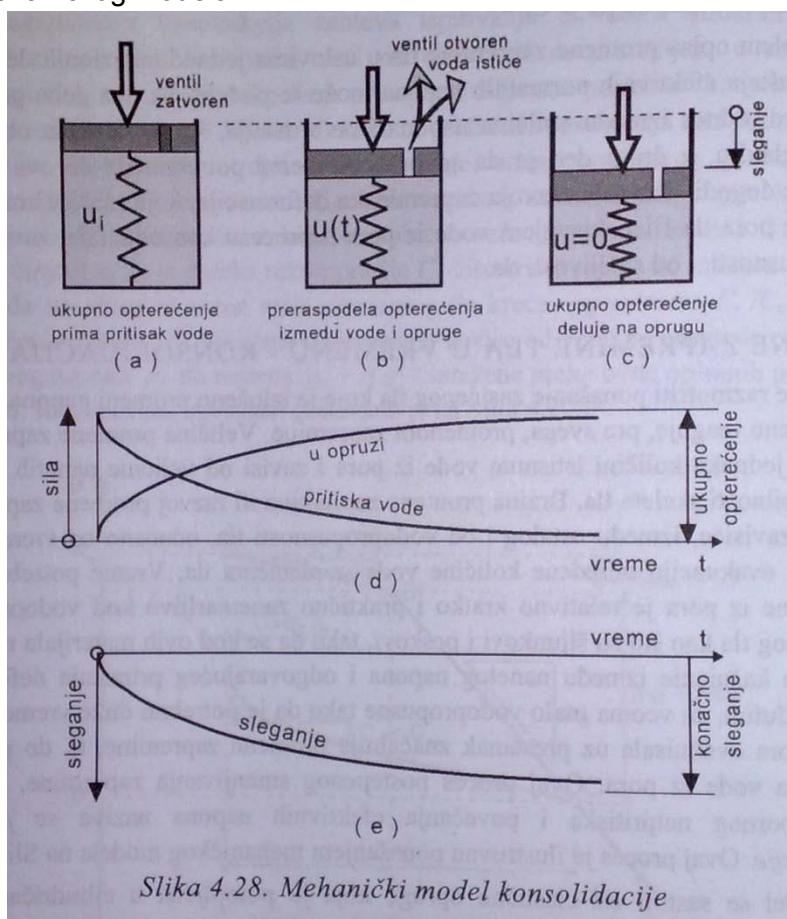
$$C = \frac{\ln \left(\frac{p'_0 + \Delta \sigma'_z}{p'_0} \right)}{\Delta \varepsilon'_z}$$

Specifična deformacija je:

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{1}{C} \ln \frac{p'_0 + \Delta \sigma'_z}{p'_0}$$

66. Konsolidacija tla – mehanička analogija.

Proces postepenog smanjivanja zapremine, opadanja veličine porednog natpritisaka i povećanja efektivnih napona naziva se **procesom konsolidacije**. Ovaj proces je ilustrovan ponašanjem mehaničkog modela.



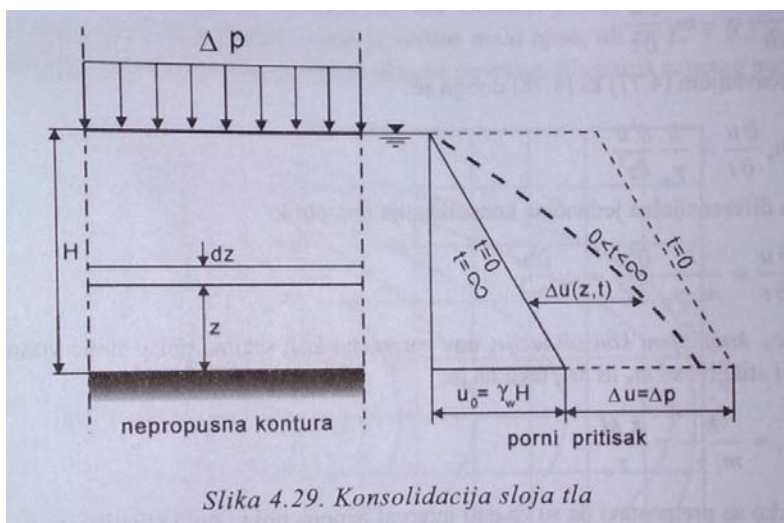
Model se sastoji od elastične opruge koja je potopljena u cilindričan sud sa vodom. Voda i opruga su potpuno zatvorene klipom koji savršeno zaptiva sud po svom obimu, pri čemu se pretpostavlja da nema trenja na kontaktu između konture klipa i zidova suda (Slika 4.28-a). Klip je snabdeven ventilom koji je, na početku posmatranja procesa, zatvoren. Kada

se na klip nanese centrična sila, poveća se pritisak u vodi. Pošto je pretpostavljeno da je voda praktično nestišljiva u poređenju sa krutošću opruge, klip se ne pomera i celokupno opterećenje se prenosi na vodu preko pritiska Δu , dok opruga ostaje neopterećena. Ako bi se izraz **konsolidacija** mogao upotrebiti za oprugu, moglo bi se reći da ona nije konsolidovana pri nanetom opterećenju. Kada se zatim ventil otvori (Slika 4.28-b), voda u obliku mlaza ističe kroz otvor i zbog smanjivanja količine vode u prostoru koji klip ograničava, klip se pomera na niže. Brzina ovog pomeranja zavisi od brzine isticanja vode, odnosno od veličine otvora. Ako se za otvor može upotrebiti izraz koji odgovara vodopropusnosti tla, tada bi vrlo mali otvor simulirao nisku *vodopropusnost* tla. Pri isticanju vode klip se pomera naniže, opruga se skraćuje i pri tome prima sve veći deo nanetog opterećenja, dok pritisak u vodi opada. Povećavanje sile u opruzi je analogno povećanju efektivnih napona u tlu, a smanjenje pritiska u vodi odgovara opadanju pomog pritiska. Nakon dovoljno dugog vremena klip dolazi u nov stabilni položaj (Slika 4.28-c), pritisak vode na klip postaje jednak nuli i celokupno naneto opterećenje prima opruga.

Koristeći izraz *konsolidacija* za oprugu, sada se može reći da je ona konsolidovana pod nanetim opterećenjem. Veličina pomeranja na kraju ovog procesa zavisi od krutosti opruge. Krutost opruge predstavlja stišljivost skeleta tla. Ukoliko je opruga mekša, predstavljajući stišljivije tlo, utoliko će pomeranje, odnosno sleganje klipa biti veće, pa je potrebno istisnuti i veću količinu vode, te će i vreme potrebno da se proces završi, biti duže. Prema tome, proces između dva položaja klipa će trajati duže ukoliko je otvor za isticanje vode manji (manja vodopropusnost tla) i ukoliko je opmga gipkija (deformabilnije, mekše tlo). Promena rezultujućih sila koje deluju na klip, odnosno oprugu, prikazana je na Slici 4.28-d. To su simetrične krive od kojih je jedna rastuća, a druga opadajuća, tako da je zbir veličina komponenti u svakom vremenskom preseku konstantan. Sleganje klipa tokom vremena teži asimptotskoj vrednosti konačnog sleganja prema Slici 4.28-e.

67. Pretpostavke Tercagijeve teorije konsolidacije.

68. Diferencijalna jednačina jednodimenzionalne konsolidacije.



Slika 4.29. Konsolidacija sloja tla

Po Darsiju, hidraulički gradijent je $-dh/dz$, porni pritisak je $u = \gamma_w h$, tako da je brzina filtracije:

$$v = ki = -k \frac{dh}{dz} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z}$$

Jednačina kontinuiteta za specijalan slučaj jednodimenzionalnog kretanja vode:

$$-\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{d\varepsilon_v}{dt}$$

Gradijent promene zapremine se može izraziti i preko gradijenta efektivnog normalnog napona:

$$\frac{d\varepsilon_v}{dt} = m_v \frac{\partial \sigma'_z}{\partial t}$$

koji mora biti jednak negativnoj vrednosti gradijenta pornog pritiska:

$$\frac{d\varepsilon_v}{dt} = -m_v \frac{\partial u}{\partial t}$$

Izjednačavanjem prethodne dve jednačine dobijamo:

$$m_v \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Diferencijalna jednačina konsolidacije ima oblik:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

gde je c_v koeficijent konsolidacije, nov parametar koji sažima pokazatelje vodopropusnosti k i stišljivosti m_v ili M_v , tako da je:

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} = \frac{k M_v}{\gamma_w}$$

Ako se pretpostavi da su za dati interval napona pokazatelji stišljivosti m_v ili M_v i koeficijent vodopropusnosti k konstante, sledi da je i koeficijent konsolidacije c_v konstanta, i diferencijalna jednačina jednodimenzionalne konsolidacije glasi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

69. Rešenje diferencijalne jednačine konsolidacije.

Rešenje diferencijalne jednačine $u = u(z, t)$ opisuje raspodelu veličine pornog natpritisaka po visini sloja u vremenu u obliku:

$$u(z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{2u_i}{N} \sin \frac{Nz}{H} \right] e^{(-N^2 T_v)}$$

gde je:

u_i početna veličina pornog pritiska i konstanta tj. $u_i = \Delta p$

n ceo broj

$$N = \pi(2n + 1)/2$$

T_v vremenski faktor, broj bez dimenzija

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2}$$

70. Koeficijent konsolidacije c_v , vremenski faktor T_v .

Koeficijent konsolidacije c_v , je parametar koji sažima pokazatelje vodopropusnosti k i stišljivosti m_v ili M_v , tako da je:

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} = \frac{k M_v}{\gamma_w}$$

Vremenski faktor T_v , broj bez dimenzija

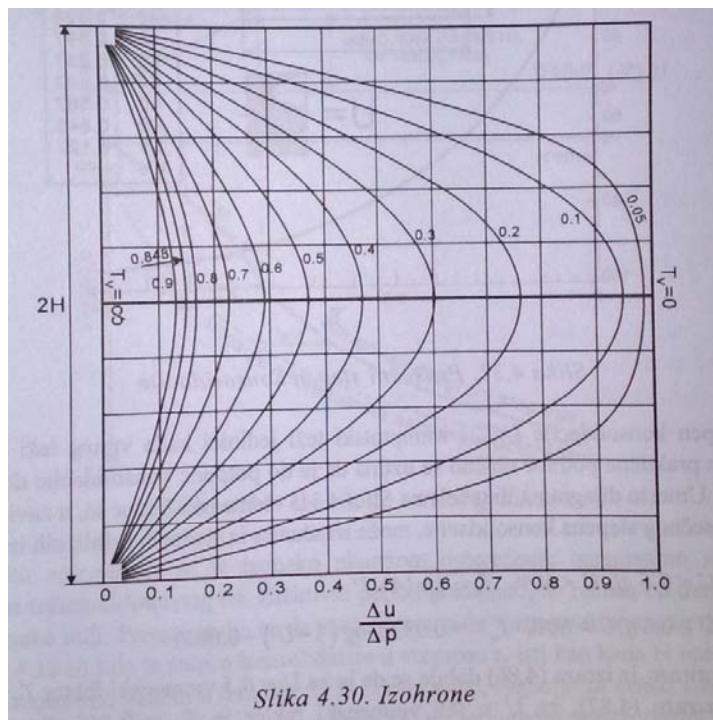
$$T_v = \frac{c_v t}{H^2}$$

71. Izohrona.

Izraz:

$$u(z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{2u_i}{N} \sin \frac{Nz}{H} \right] e^{(-N^2 T_v)}$$

Za fiksirano vreme t , odnosno vremenski faktor T_v opisuje zavisnost pornog pritiska od z , odnosno raspored pornih nadpritisaka iznad hidrostatičke veličine po debljini sloja krivom koja se naziva **izohrona**. Može se videti da je za $t = T_v = 0$ izohrona konstanta jer opisuje početnu vrednost pornih pritisaka, za vrednost $T_v = 0.05$ porni pritisak u središtu sloja je veoma malo opao, ali za $T_v = 0.2$ površina dijagrama ispod izohrone je oko polovine ukupne površine dijagrama nanetog napona.



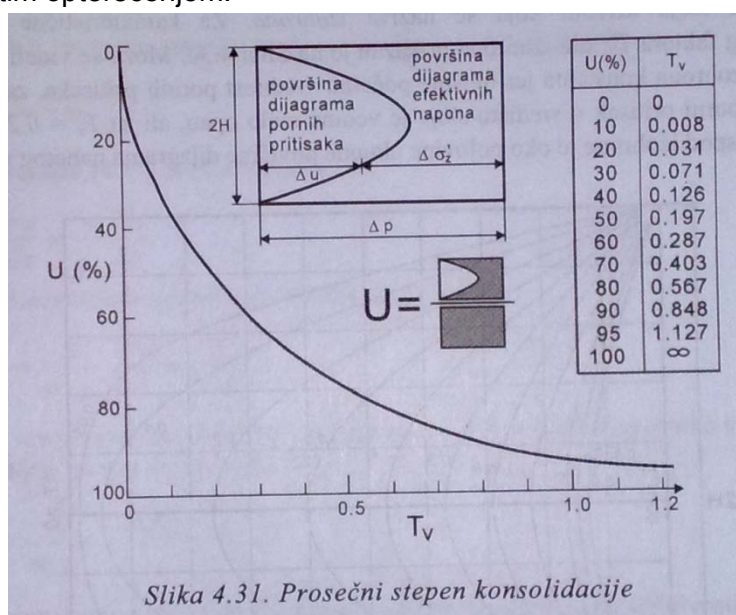
Slika 4.30. Izohrone

72. Prosečan stepen konsolidacije U.

Prosečni stepen konsolidacije $U=U(t)=U(T_v)$ se može dobiti integrisanjem, a konačan rezultat je prikazan dijagramom i tabelom karakterističnih vrednosti. Razvoj sleganja u vremenu $s(t)$ sloja debljine D , za konstantnu vrednost koeficijenta zaprerninske stišljivosti m_v ili modula stišljivosti M_v je:

$$s(t) = s_c U(t) = \frac{\Delta \sigma'_z}{M_v} D U(T_v)$$

gde je s_c konsolidaciono sleganje sloja pri potpunoj disipaciji pomih pritisaka generisanih nanetim opterećenjem.



Slika 4.31. Prosečni stepen konsolidacije

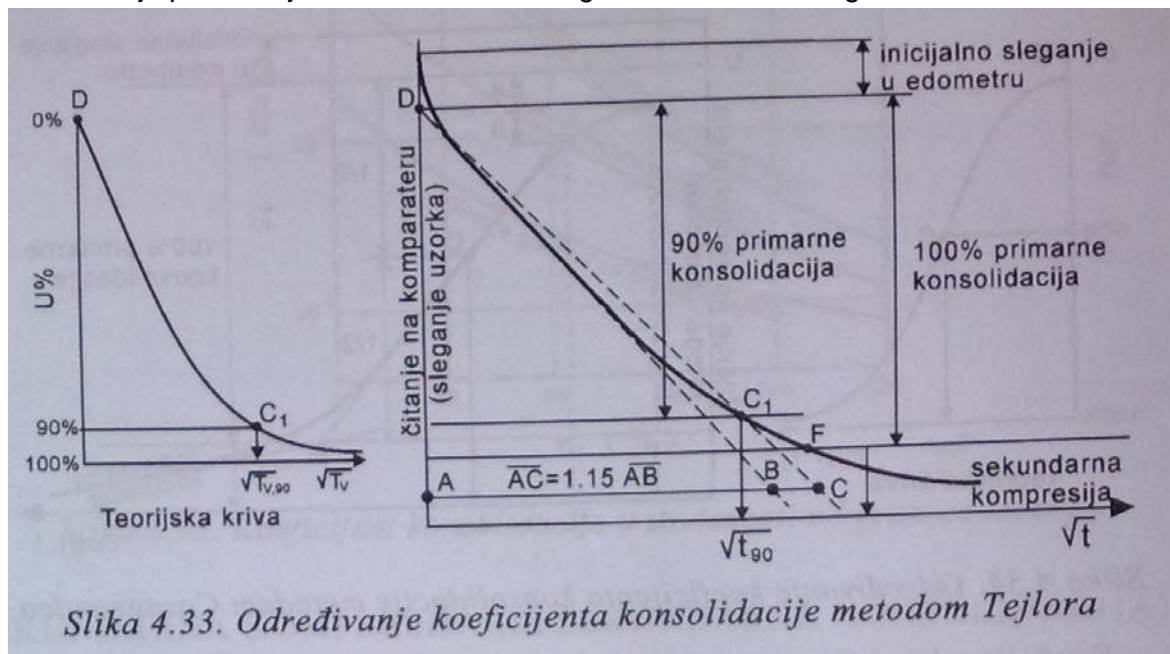
Stepen konsolidacije $U(T_v)$ asimptotski teži jedinici kada vreme teži beskonačnosti. Za praktične potrebe obično se uzima da je do potpune konsolidacije došlo kada je $T_v > 3$. Umesto dijagrama ili tabele na Slici 4.31, vremenski faktor se, u zavisnosti od nivoa prosečnog stepena konsolidacije, može izračunati iz sledećih približnih izraza:

$$\text{za } U < 0,6 \text{ tj. } U < 60\% \quad T_v = (\pi/4)U^2$$

$$\text{za } U \geq 0,6 \text{ tj. } U \geq 60\% \quad T_v = -0,9332 \log(1 - U) - 0,0851$$

73. Metoda Tejlora (kvadratnog korena) za određivanje koeficijenta konsolidacije.

METODA KVADRATNOG KORENA (metoda Taylora). Čitanja na komparateru su naneta na ordinati, vreme u minutima je u razmeri kvadratnog korena, a prosečan stepen konsolidacije prikazan je u razmeri kvadratnog korena vremenskog faktora.



Slika 4.33. Određivanje koeficijenta konsolidacije metodom Tejlora

Teorijska kriva je praktično prava linija do oko 60% konsolidacije, što uostalom i proizlazi iz analitičkog izraza (4.86) koji je dat za ovaj interval, dok je za 90% konsolidacije apscisa $AC = 1.15 AB$, gde je AB na produžetku rečene prave linije. Ova osobina se koristi za određivanje tačke na eksperimentalnoj krivoj kojoj odgovara 90% konsolidacije. Tačka D koja odgovara $U = 0$ dobija se produženjem prave do preseka sa ordinatom za vreme jednako nuli. Ova tačka predstavlja "korigovanu nulu", koja se može malo razlikovati od stvarne za veličinu inicijalnog sleganja nastalog kompresijom manje količine vazduha u porama uzorka. Povlači se prava linija DC tako da je vrednost apscise 1.15 puta odgovarajuće apscise linearnog dela eksperimentalne krive. Presek linije DC sa eksperimentalnom krivom dobija se tačka C_1 kojoj odgovara $U = 90\%$ tako da se može očitati veličina $\sqrt{t_{90}}$. Vrednost T_v za $U = 90\%$ iznosi 0.848 tako da je koeficijent konsolidacije:

$$c_v = 0.848 \frac{H^2}{t_{90}}$$

Može se povući horizontala na nivou deformacije koja je za 1/9 veća od deformacije koja odgovara deformaciji primarne konsolidacije od 90 %, što bi definisalo i iznos od 100 % primarne konsolidacije, koja je određena tačkom F . Deformacija u opitu se nastavlja krivom sekundarne kompresije i iza tačke F koja odgovara 100% primarne konsolidacije.

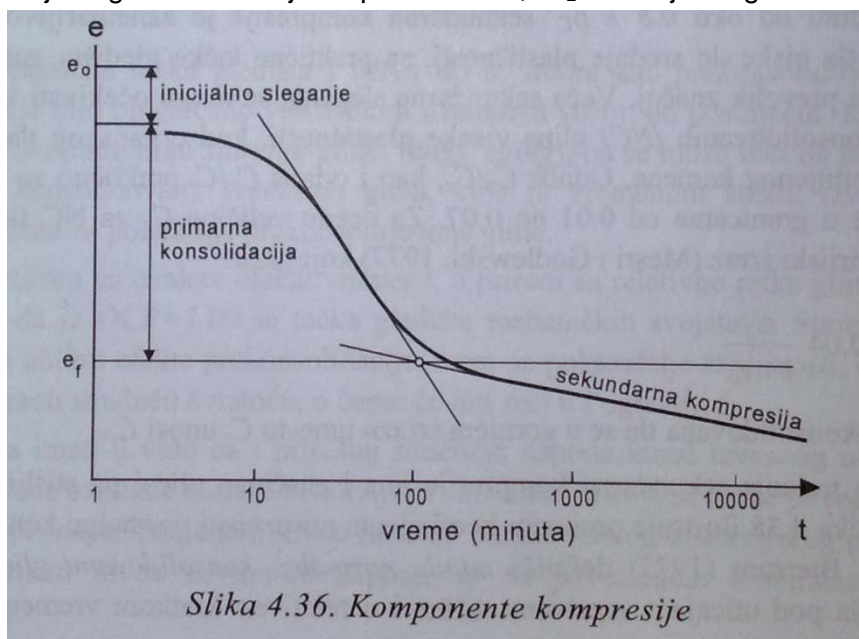
U izrazima za izračunavanje koeficijenta konsolidacije figuriše veličina H . To je promenljiva veličina koja zavisi i od početne visine uzorka, vremena i opterećenja. Za primenu u gore datim izrazima, dovoljno je tačno usvojiti polovinu prosečne visine uzorka pri razmatranoj stepenici opterećenja.

75. Sekundarna kompresija.

Nakon praktično potpune disipacije poreznih pritisaka i završetka procesa primarne konsolidacije, komprimovanje tla ne prestaje. Smanjenje zapremine se nastavlja veoma polako, sve manjom i manjom brzinom. Priroda razvoja deformacije se može identifikovati u polu-logaritamskom dijagramu u obliku jedne (a po nekad i dve prave linije). Jednostavniji je prikaz jednom linijom (Slika 4.36) tako da se promena koeficijenta, za svaku poroznost manju od e_f može opisati izrazom:

$$\Delta e = -\alpha(\log t_2 - \log t_1) = -\alpha \log(t_2/t_1)$$

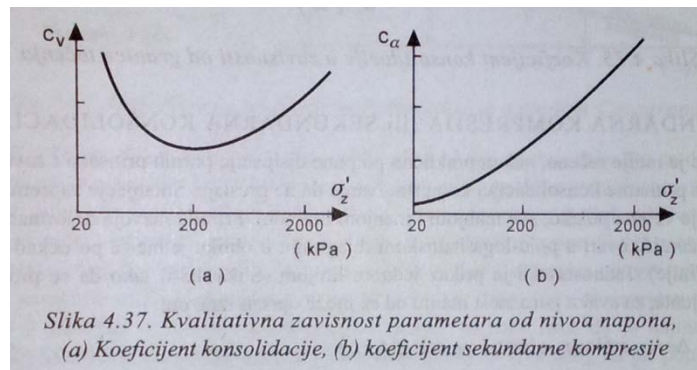
gde je α koeficijent brzine sekundarne kompresije, t_1 vreme kraja primarne konsolidacije koja odgovara koeficijentu poroznosti e_f a t_2 bilo koje drugo vreme $t_2 > t_1$.



Alternativno, ako se uvede koeficijent sekundarne kompresije, takav da je $C_\alpha = \alpha/(1 + e_f)$, deformacija jednodimenzionog i volumetrijskog puzanja je:

$$\varepsilon_z = C_\alpha \log(t_2/t_1)$$

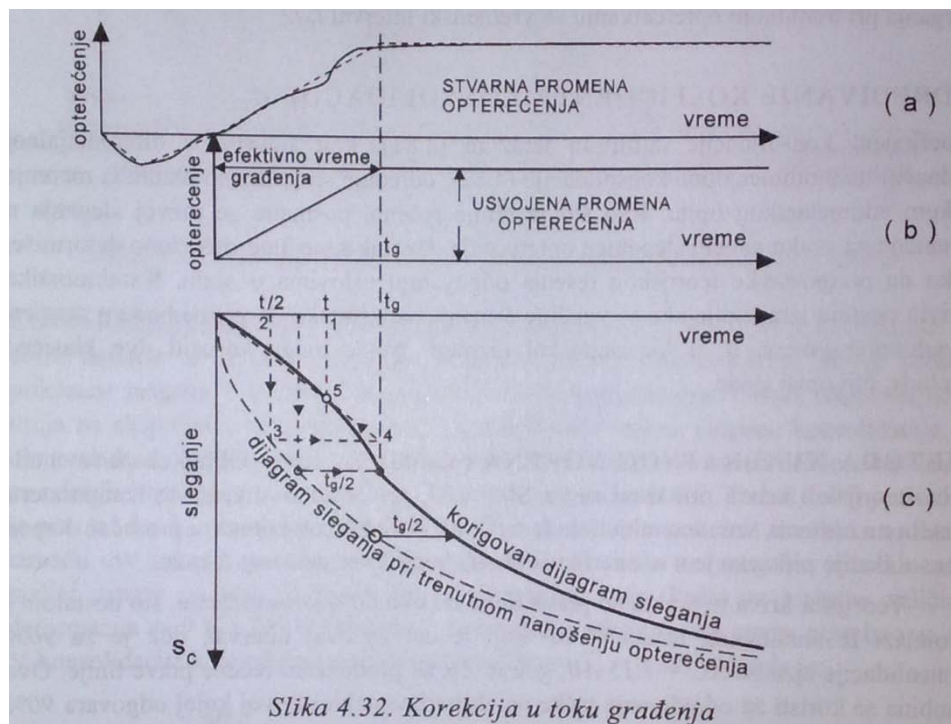
Prethodni izrazi prepostavljaju da se sekundarna kompresija ili volumetrijsko puzanje može opisati pravom linijom u polulogaritmamskom dijagramu, pri čemu se mora imati u vidu da su α ili C_α parametri koji zavise od nivoa normalnih napona. Ova tzv. sekundarna kompresija (ili sekundarna konsolidacija) je posledica plastične reorijentacije zrna usled izmenjenog nivoa napona, progresivnog loma veza između zrna kao i progresivnog loma pojedinačnih zrna. Proces sekundarne kompresije se odvija istovremeno sa primarnom konsolidacijom, ali tek po završetku primarne konsolidacije postaje jasno uočljiv.



Brzina sekundarne kompresije zavisi od prethodne istorije napona, veličine priraštaja napona i vrste tla. Za sva prekonsolidovana tla kod kojih priraštaj napona ne prelazi veličinu od oko $0.8 \times p_c'$ sekundama kompresija je zanemarljivo mala. Za neorganska tla niske do srednje plastičnosti, sa praktične tačke gledišta, najčešće ova pojava nema prevelik značaj. Veća sekundama sleganja se mogu očekivati kod mladih normalno konsolidovanih (NC) glina visoke plastičnosti, kod organskog tla, ali i kod nasipa od lomljenog kamena.

76. Razvoj konsolidacionog sleganja pri postepenom nanošenju opterećenja.

U praksi se najčešće opterećenje objekta na tlo ne nanosi odjednom, već tokom nekog vremena koje odgovara trajanju građenja objekta. Na početku se tlo rasterećuje izvođenjem iskopa za temelje tako da dolazi do bubrenja gline. Do znatnijeg sleganja ne dolazi dok naneto opterećenje ne postane veće od ranijeg opterećenja sopstvenom težinom iskopanog tla.



Neto opterećenje p' je jednako ukupnom opterećenju umanjenom za pritisak sopstvene težine uklonjenog tla. Efektivni period građenja t_g se računa od trenutka kada je p'

jednako nuli. Pretpostavlja se da opterećenje raste linearno u vremenu do trenutka t_g (Slika 4.32-b) i da je stepen konsolidacije u vremenu t_g isti kao kada bi opterećenje u punom iznosu bilo naneto u trenutku $t_g/2$. Prema tome, sleganje za svako vreme u toku građenja je jednako sleganju koje bi se dogodilo pri trenutnom opterećivanju u polovini tog vremena; međutim, pošto opterećenje koje deluje nije totalno opterećenje, tako dobijeno sleganje se mora redukovati odnosom tekućeg i konačnog neto opterećenja.

Za vremenski period nakon završetka građenja kriva sleganja će biti pomerena za polovinu efektivnog trajanja građenja. Prema tome, za bilo koje vreme posle završetka građenja, korigovano vreme, koje odgovara veličini sleganja, jednako je ukupnom vremenu, umanjenom za polovinu vremena građenja.

Prvo se nacrtaja dijagram sleganja pod pretpostavkom da je opterećenje naneto trenutno, odjednom u vremenskoj nuli neto promene opterećenja. Za neko izabrano vreme $t < t_g$ (tačka 1) povuče se vertikalna linija, a zatim povuče i vertikalna za vremenski presek $t/2$ (tačka 2) do linije sleganja pod pretpostavkom o trenutaom nanošenju opterećenja (tačka 3), a zatim povuče horizontala do vremenskog preseka t_g (tačka 4). Spajanjem koordinataog početka sa tačkom 4 u preseku sa vertikalom kroz tačku 1 dobija se veličina sleganja u vremenu t (tačka 5). Ovaj postupak se ponovi za nekoliko tačaka u intervalu $t < t_g$ da bi se dobila korigovana kriva sleganja u ovom vremenskom intervalu. Za vreme $t > t_g$ korigovana kriva sleganja se dobija jednostavnim horizontalnim pomeranjem krive sleganja pri trenutaom opterećivanju za vremenski interval $t_g/2$.

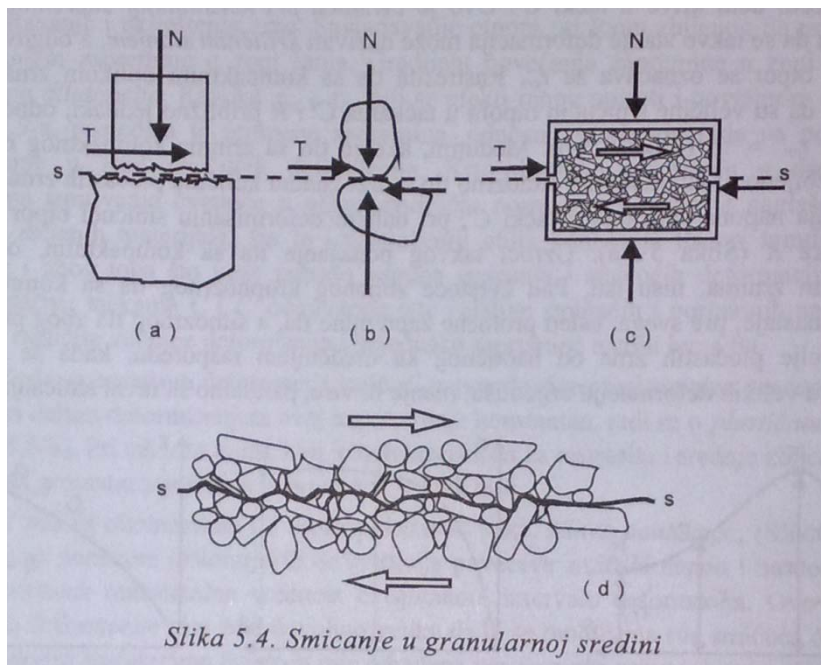
77. Elastičan materijal, veza napona i deformacije, mehanički model.

78. Kruto – plastično telo, veza napona i deformacije, mehanički model.

79. Elasto – plastično telo, veza napona i deformacije, mehanički model.

80. Smičuća čvrstoća tla, linearni i nelinearni kriterijum loma.

Smičuća čvrstoća predstavlja najveći smičući napon koji se može naneti strukturi tla u određenom pravcu.

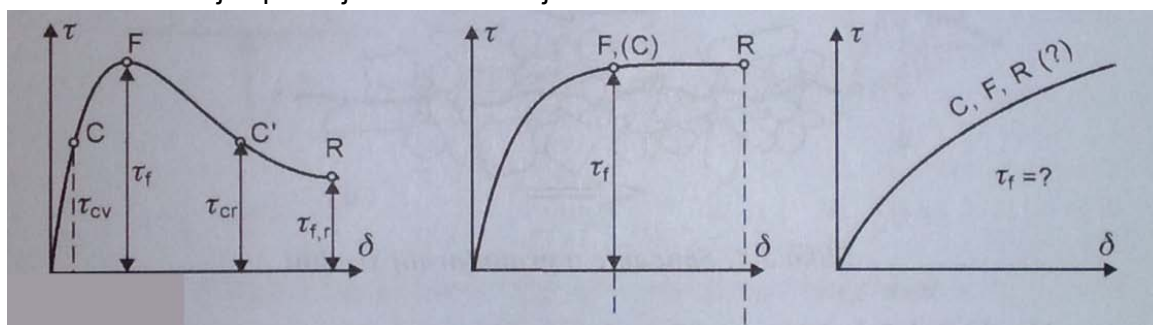


Kada je dostignut najveći moguć smičući napon, praćen plastičnim deformacijama, kaže se da je došlo do loma, pri čemu je mobilisana sva smičuća čvrstoća tla. Tada smičući naponi imaju tendenciju da pomere deo mase u odnosu na ostalu masu tla ukoliko je lom lokalizovan samo u ravni smicanja tj. gde se pojavljuje klizna površ.

81. Vršna i rezidualna smičuća čvrstoća tla.

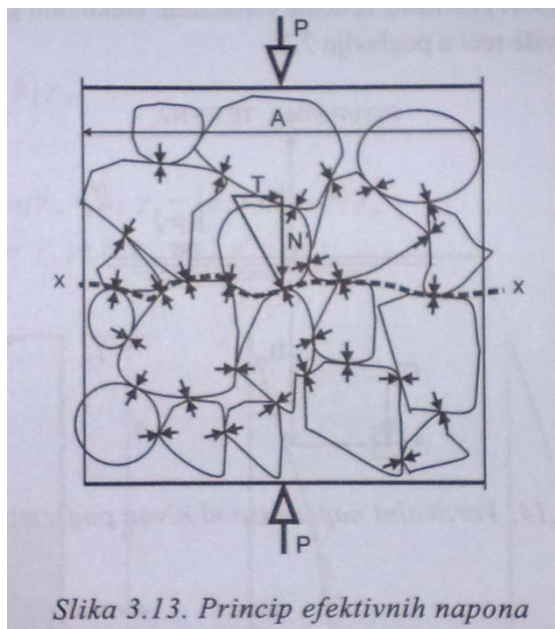
Vršna čvrstoća τ_f (tačka F) je je maksimalna vrednost napona smicanja. Ukoliko se posebno ne naglasi, kada se govori o čvrstoći tla, podrazumeva se vršna čvrstoća.

Rezidualna čvrstoća, $\tau_{f,r}$ (tačka R) ili čvrstoća pri velikim deformacijama, dostiže se uz opadanje čvrstoće od tačke F do tačke R i ostaje konstantna nakon dostizanja određene veličine deformacija i pri daljem deformisanju.



84. Princip efektivnih napona.

Princip efektivnih napona je najvažniji fundamentalni princip mehanike tla. Ovaj princip, koji važi za zasićeno tlo, prvi je formulisao Terzaghi (1936), a sastoji se od dva osnovna stava:



Slika 3.13. Princip efektivnih napona

Stav I. Efektivni normalni napon σ'_n jednak je razlici totalnog normalnog napona σ_n i poreznog pritiska u , ili $\sigma'_n = \sigma_n - u$.

Porezni pritisak je sferni tenzor, odnosno komponente poreznog pritiska su hidrostatske prirode i jednake su u svim pravcima tako da princip važi za komponentalne normalne napone i za glavne napone, tj.:

$$\sigma'_x = \sigma_x - u; \quad \sigma'_y = \sigma_y - u; \quad \sigma'_z = \sigma_z - u$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u; \quad \sigma'_2 = \sigma_2 - u; \quad \sigma'_3 = \sigma_3 - u$$

Razmotrimo "talasastu ravan" $x-x$ koja prolazi samo kroz kontakte između zrna. Ova površina se ne razlikuje mnogo od ravni u stvarnoj razmeri s obzirom na relativno malu veličinu zrna tla. Normalna sila P koja deluje na površini A jednim delom se prenosi preko kontakata između zrna a drugim preko pritiska u u pomoć vodi. Sile između zrna su haotične kako po veličini tako i po orijentaciji u masi tla, ali se u svakoj tački kontakta na talasastoj ravni mogu rastaviti na komponente normalne i tangencijalne u odnosu na razmatranu ravan koju aproksimiramo. Te komponente su N' i T . Efektivni normalni napon se može interpretirati kao zbir svih komponenti N' na površini A , podeljen sa površinom A , tj.:

$$\sigma' = \frac{\sum N'}{A}$$

Ukupan ili totalni normalni napon je $\sigma = P/A$. Ako se pretpostavi da su površine kojima su zrna u kontaktu praktično tačke, ili sasvim zanemarljivo male površine u odnosu na ukupnu površinu A , porezni pritisak deluje po celoj površini A . Uslovi ravnoteže u pravcu normale na $x-x$ daju:

$$P = \sum N' + uA$$

$$\frac{P}{A} = \frac{\sum N'}{A} + u$$

Stav II. Svi merljivi efekti promene napona, kao što su promene zapremine, promene oblika i promena smičuće čvrstoće zavise isključivo od efektivnih napona. To praktično znači da dva osnovna oblika ponašanja tla od interesa za prenošenje opterećenja i napona, čvrstoća i stišljivost, zavise od efektivnih normalnih napona, što se simbolično može napisati kao:

$$\text{promena zapremine} = f_1(\sigma)$$

$$\text{smičuća čvrstoća} = f_2(\sigma)$$

Zavisnosti $f_1(\sigma)$ i $f_2(\sigma)$ nisu jednostavne analitičke funkcije jer sadrže niz različitih zavisnosti koje se eksperimentalno određuju laboratorijskim i terenskim ispitivanjima, da bi se mogle uobličiti u teorijske modele ponašanja tla primenljive u građevinskoj praksi.

85. (82. 83.) Morovi krugovi za totalne i efektivne napone.

Smičuća čvrstoća tla se može izraziti i preko glavnih efektivnih napona σ_1 i σ_3 pri lomu u posmatranoj tački. Prava linija, opisana jednačinom :

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad \text{(veza između glavnih napona i napona u datoj ravni)}$$

c' – kohezija za efektivne napone

ϕ' – ugao smičuće otpornosti

σ'_n – efektivni normalni napon koji deluje na datu ravan ili ravan loma

će tangirati Morove krugove efektivnih napona. Koordinate tangentne tačke $F (\tau_f, \sigma'_{ff})$

su:

$$\tau_f = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \sin 2\theta$$

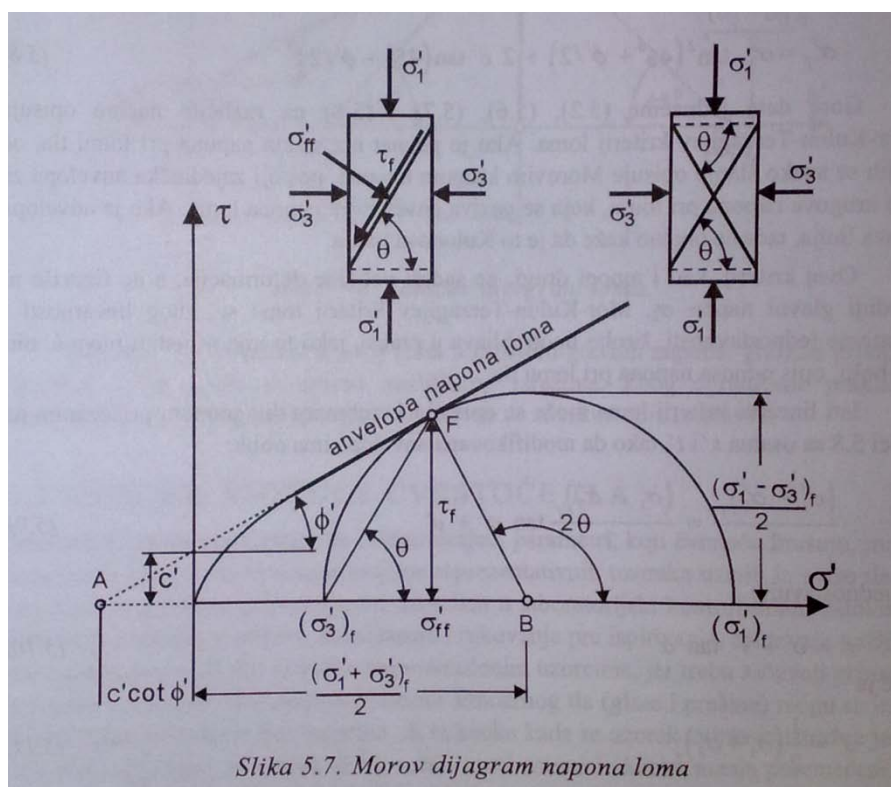
$$\sigma'_{ff} = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} + \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \cos 2\theta$$

gde je θ ugao između ravni u kojoj deluje maksimalni glavni napon i ravni loma i određuje se formulom:

$$\theta = \pm(45^\circ + \frac{\phi'}{2})$$

Veze između glavnih efektivnih napona i parametara čvrstoće:

$$\sin \phi' = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2 \cot \phi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3)}$$



Ukoliko se umesto efektivnih koriste normalni naponi u formulama se uzimaju njihove vrednosti, a dijagram se modifikuje za vrednost pornog pritiska.

86. Lameov dijagram za totalne i efektivne napone.

Linearni kriterij loma može se opisati i Lameovim dijagramom sa osama s' i t' tako da modifikovana anvelopa ima oblik:

$$\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \tan \alpha' + a'$$

ili jednostavnije:

$$t' = a' + s' \tan \alpha'$$

gde je

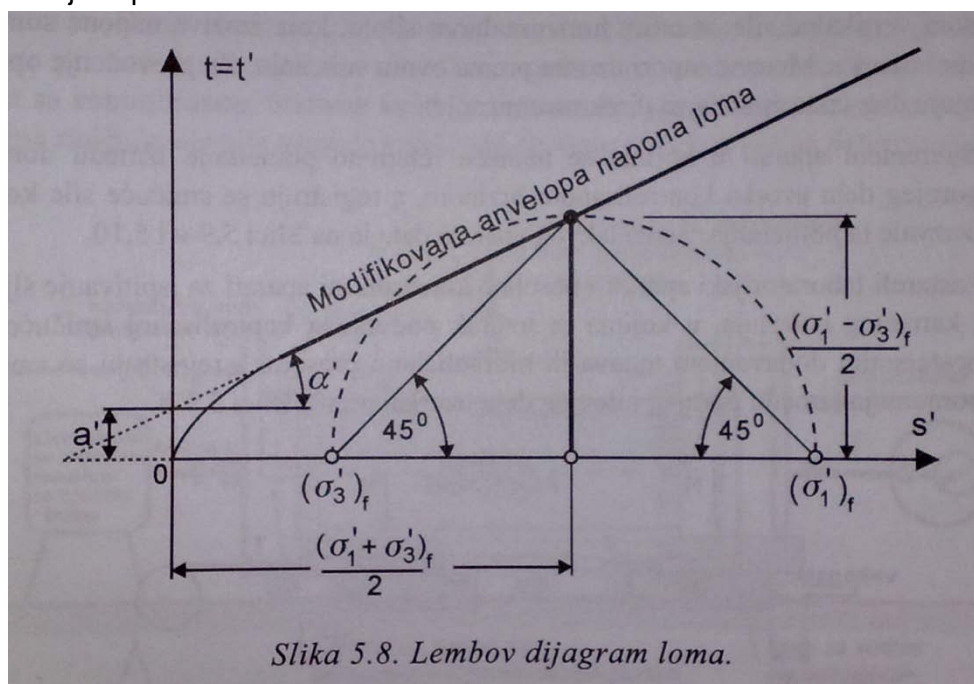
$$s' = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)_f$$

$$t' = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f$$

$$\sin \phi' = \tan \alpha'$$

$$\phi' = \arcsin (\tan(\alpha')) \text{ i } c' = a' / \cos (\phi')$$

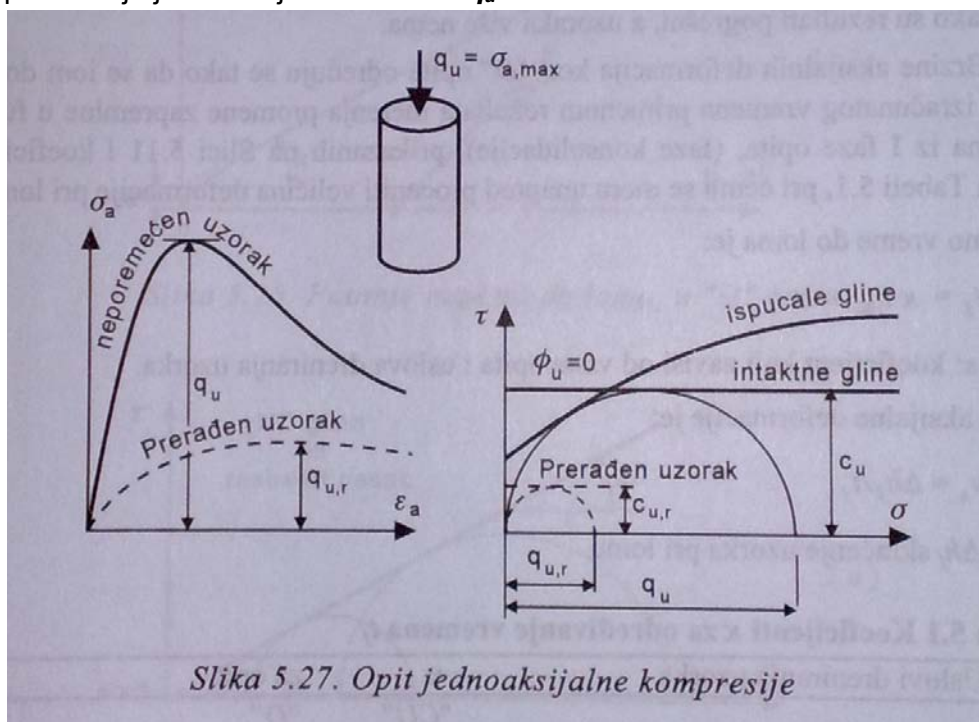
Lameov dijagram ima izvesne prednosti u prikazivanju napona, kada se ne mora voditi računa o njihovoj orijentaciji ili rotaciji, i kada se ne vodi računa o veličini srednjeg glavnog napona, jer se umesto Morovog kruga, stanje napona može prikazati jednom naponskom tačkom. Promena napona se, umesto nizom Morovih krugova, može prikazati linijom koja opisuje putanju napona.



Ukoliko se umesto efektivnih koriste normalni naponi u formulama se uzimaju njihove vrednosti, a dijagram se modifikuje za vrednost pornog pritiska.

87. Jednoaksijalna čvrstoća tla, primenljivost rezultata.

Opit se najčešće provodi na neporemećenim uzorcima vodom zasićenih sitnozrnih materijala uzetih iz terena. Cilindričan uzorak, opterećuje se povećanjem aksijalnog napona $\sigma_1 = \sigma_a$ do loma, pri čemu su bočni naponi $\sigma_r = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Maksimalna vrednost aksijalnog napona predstavlja jednoaksijalnu čvrstoću q_u .



Slika 5.27. Opit jednoaksijalne kompresije

Opit se provodi relativno brzo, sa brzinom aksijalne deformacije većom od 1% visine uzorka u minuti, tako da je opit praktično nedreniran. Pošto je $\Phi_u = 0$, smičuća čvrstoća je nedrenirana kohezija c_u . Iz Morovog dijagrama proističe da je nedrenirana kohezija jednaka polovini jednoaksijalne čvrstoće tj. $c_u = q_u/2$. Ovaj opit daje korekta rezultate, praktično iste kao "U" opit triaksijalne kompresije u slučaju intaktnih, neispucalih normalno konsolidovanih i malo prekonsolidovanih glina. Opit nije pogodan za ispitivanje jako prekonsolidovanih, ispucalih glina. Nedrenirana čvrstoća zavisi od zbijenosti uzorka, a pošto se uzorak ispituje u zasićenom stanju, znači da zavisi od vlažnosti, ali i ne samo od nje. Neporemećeni uzorci i prerađeni uzorci istog tla sa istom vlažnošću najčešće imaju različitu nedreniranu čvrstoću, jer je prerađivanjem izmenjena originalna struktura neporemećenog uzorka tla. Odnos ove dve čvrstoće $c_u/c_{u,r}$ se naziva *senzitivnost* ili *osetljivost*, a označava se sa S_t .

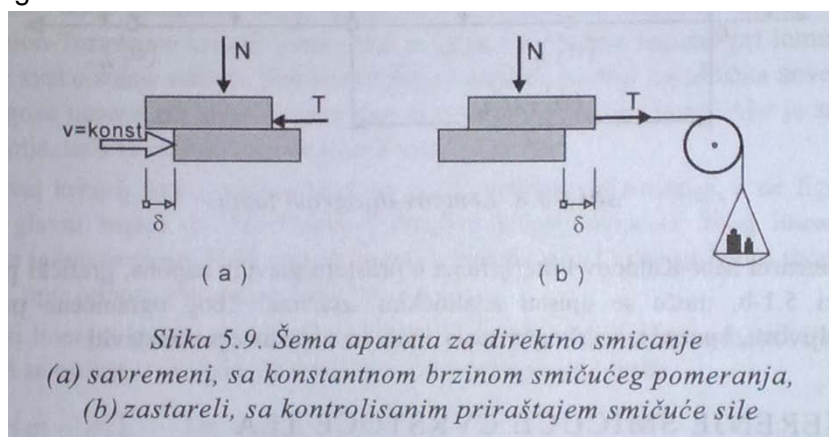
Krupnozrna nevezana tla, (pesak, šljunak i kameni nabačaj), nemaju jednoaksijalnu čvrstoću.

88. Opit direktnog smicanja, aparat i način provođenja opita.

U opitu direktnog smicanja uzorci tla se opterećuju normalnim naponom primenom vertikalne sile, a zatim horizontalnom silom, koja izaziva napone smicanja po sredini uzorka. Mere se otpori uzorka prema ovom smicanju. Za provođenje opita se primenjuju dve vrste aparata za direktno smicanje:

(a) Savremeni aparati u kojima se nameće relativno pomeranje između donjeg i gornjeg dela uzorka kontrolisanom brzinom, a registruju se smičuće sile koje su izazvale ta pomeranja.

(b) Zastareli laboratorijski aparati i posebno konstruisani aparati za ispitivanje šljunka i kamenog nabačaja, u kojima se uzorak podvrgava kontrolisanoj smičućoj sili postepenim dodavanjem tegova ili hidrauličkom presom, a registruju se smičuća pomeranja između gornjeg i donjeg dela uzorka.



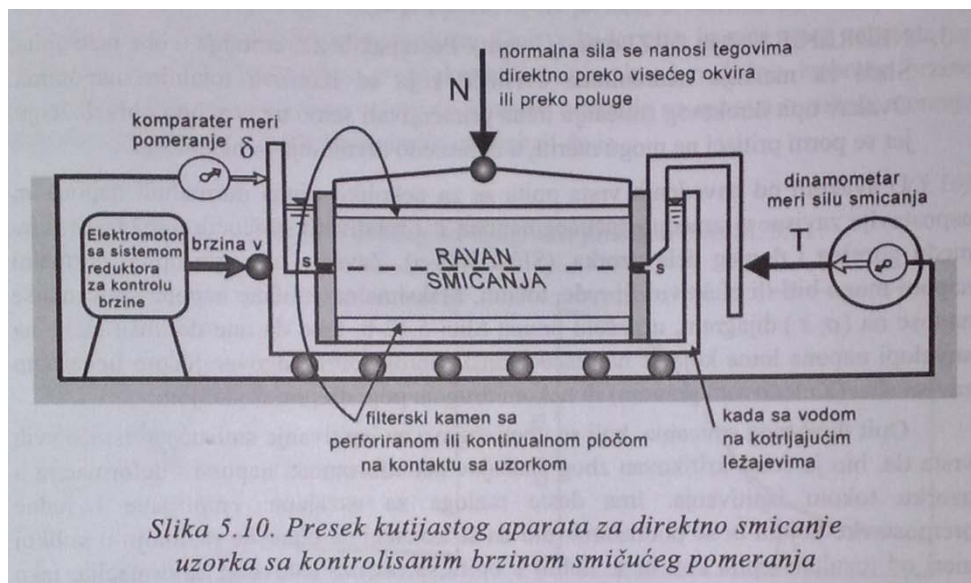
Obe vrste aparata se sastoje od metalne kade sa vodom, metalne dvodelne kutije kvadratnog ili kružnog preseka, čije stranice, odnosno prečnik, imaju veličinu **50 do 100 mm**, a sastoje se od donjeg okvira pričvršćenog za dno kade, i gornjeg okvira. Između ova dva okvira deluje smičuća sila T u visini sredine uzorka. Normalna sila N se nanosi preko metalnog poklopca. Uzorak se stavlja između dve perforirane metalne ploče i dve porozne keramičke ploče.

Smičuća sila T se nanosi pomeranjem jednog okvira u odnosu na drugi sa kontrolisanom brzinom v , i pri tome se naneta smičuća sila meri dinamometrom. Gornji okvir se samo malo pomera, jer se oslanja na relativno krut prsten dinamometra, dok je donji okvir smešten na kotrljajuće ležajeve koji omogućuju relativna pomeranja između okvira, pri čemu nastaje smicanje uzorka po unapred određenoj ravni s-s. Relativna pomeranja ramova δ se mere.

Za kompletan opit direktnog smicanja obično se ispituje 3 pripremljena uzorka sa odgovarajućim veličinama normalnih napona. U načelu, (Slika 4.11-d), opterećenja se nanose u dve faze:

I faza: Nanosi se normalna sila N koja je konstantna za jedan uzorak tokom celog trajanja opita.

II faza: Povećava se smičuća sila T do loma ili do veličine pomeranja u iznosu od 10%-15% dimenzije uzorka u pravcu smicanja.



Veličine normalnih i smičućih napona (σ_n , τ) izračunavaju se tako što se normalna i smičuća sila podele sa efektivnom površinom smicanja između dva okvira, koja zavisi od relativnog smičućeg pomeranja δ .

Veličine normalnih napona se biraju tako da se dobiju rezultati u području napona koji su od interesa u konkretnom slučaju ili se traži anvelopa napona loma u širem intervalu. U načelu, prvi uzorak se izlaže najmanjem usvojenom pritisku, drugi sa dva do tri puta većim naponom primenjenim na prvom uzorku, a treći sa dva do tri puta većim naponom upotrebljenim na drugom uzorku. Tipično, normalni naponi su 100, 200 i 400 kPa, ali se mogu upotrebiti i 50, 100 i 200 kPa ili i neka treća kombinacija, ukoliko za to postoje odgovarajući razlozi. Ukoliko se posebnim programom drugačije ne propiše, preporučujese primena normalnih napona od 50, 150 i 450 kPa.

Tri standardna postupka koji se, pre svega, razlikuju po uslovima dreniranja u pojedinim fazama opterećivanja:

1. DRENTANI ili SPORI opit, (*D* opit). Postupak sa dreniranjem u obe faze opita za određivanje vršne čvrstoće tla za efektivne napone. Ovaj opit se standardno primenjuje u praksi i daje parametre izražene efektivnim naponima.

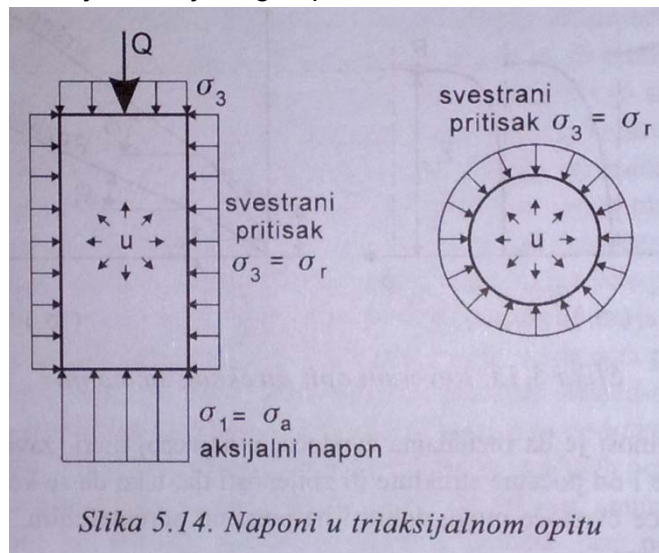
2. POVRATNI ili REVERZNI, (*R* opit). Drenirani opit smicanja za određivanje rezidualne smičuće čvrstoće za efektivne napone.

3. NEDRENIRANI ili BRZI opit, (*U* opit). Postupak bez dreniranja u obe faze opita. Služi za merenje nedrenirane čvrstoće koja se izražava totalnim naponima. Ovakav opit direktnog smicanja treba primenjivati samo uz posebno obrazloženje, jer se porni pritisci ne mogu meriti, a delimično dreniranje je neizbežno.

89. Merenje rezidualne smičuće čvrstoće tla.

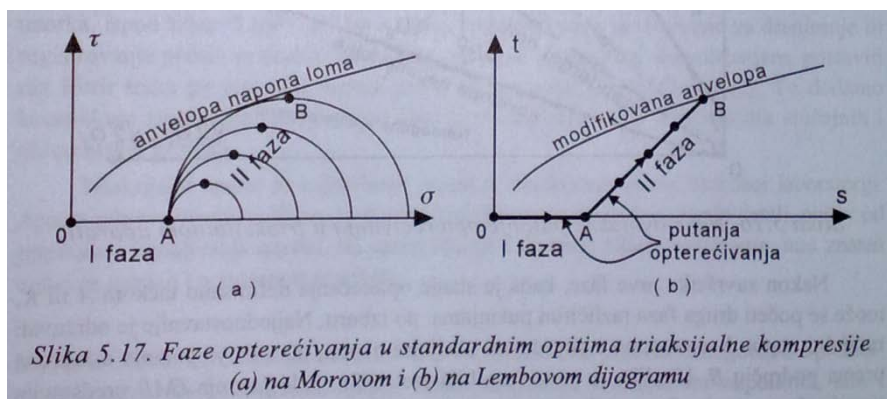
90. Ovit triaksijalne kompresije, aparat i kontrola napona.

Cilindričan uzorak se opterećuje svestranim pritiskom σ_3 i aksijalnim naponom $\sigma_a = \sigma_1$, do loma. U standardnim optima je radijalno opterećenje $\sigma_r = \sigma_3$ konstantno, a uzorak se dovodi do loma povećavanjem aksijalnog napona.



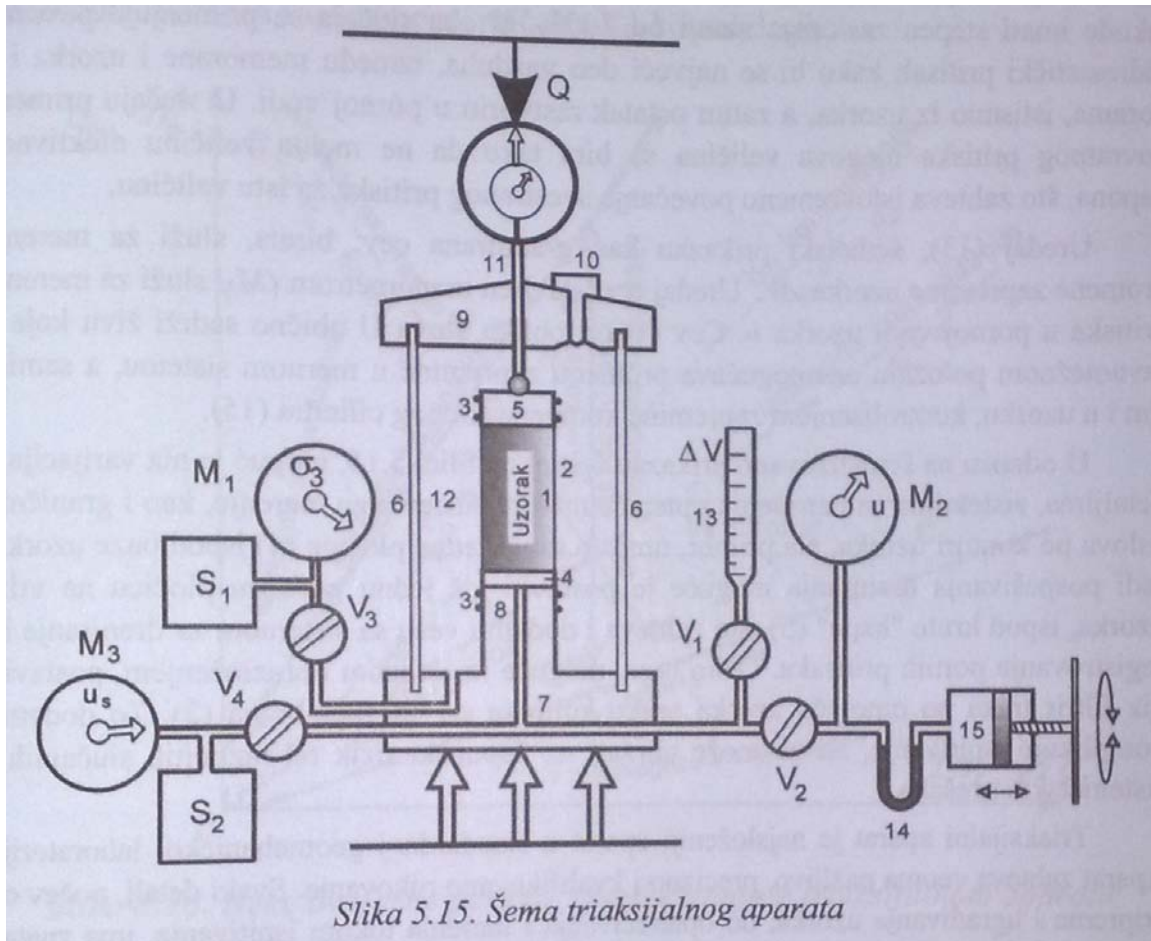
U toku opta se, pod različitim uslovima, registruju naponi i deformacije uzorka i na osnovu dobijenih podataka se izračunava čvrstoća tla pri smicanju. Sam opt se obavlja u dve faze:

- I faza: Nanosi se svestrani pritisak $\sigma_r = \sigma_a = \sigma_3 = \sigma_2 = \sigma_1$. Radijalni pritisak $\sigma_r = \sigma_3$ nakon nanošenja ostaje konstantan za jedan uzorak tokom celog trajanja opta.
- II faza: Povećava se aksijalni pritisak $\sigma_a = \sigma_1$ do loma ili do deformacije od oko **20 %** visine uzorka.



Triaksijalni aparat se sastoji od uređaja prikazanih šemom na Slici 5.15. Uzorak (1) je potpuno obmotan tankom gumenom membranom (2), koja se na krajevima pričvršćuje gumenim prstenovima (3) za laku ploču, "kapu", (5) i postolje, pijedestal (8). Između uzorka (1) i pijedestala (8) postavlja se porozna ili masivna pločica (4), zavisno od vrste opta. Pripremljen uzorak se postavlja u ćeliju koja se sastoji od cilindra od pleksiglasa ili drugog pogodnog materijala (6). Cilindar se postavlja na donju masivnu metaliu ploču (7) preko koje se vertikalnim pomeranjem nanosi aksijalna sila. Ploča (7) je dugim (neprikazanim) vijcima vezana za poklopac (9), tako da formira zatvoren prostor ćelije (12). Na poklopcu se nalazi ventl (10) za ispuštanje vazduha iz ćelije kada se ćelija (12) puni vodom pod pritiskom. Sastavni deo masive ploče (7) je postolje za postavljanje uzorka, pijedestal (8),

koji je kanalima u masivnom postolju i cevima povezan sa svim ostalim uređajima, tako da preko porozne ploče (4) omogućava prenošenje pritiska ili protok vode iz uzorka. Postavljanjem gumenih zaptivača između cilindra i poklopca i masivne ploče sa pijedestalom, čelija se hermetički zatvara.



Slika 5.15. Šema triaksijalnog aparata

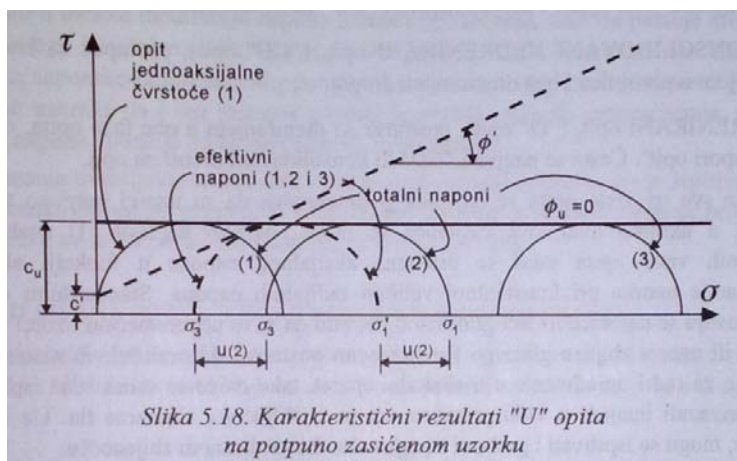
Uređaj (**S₁**) omogućava kontinualno održavanje konstantnog svestranog pritiska i/ili njegovo automatsko korigovanje uz merenje na manometru (**M₁**). Uređaj (**S₂**) služi za nanošenje povratnog hidrostatičnog pritiska u_s , a njegova veličina se kontroliše manometrom (**M₃**). On omogućava da se nanese kontrolisana veličina hidrostatičkog pritiska u unutrašnjost uzorka, kako bi se ili obezbedilo potpuno zasićivanje uzorka ili da se simuliraju hidrostatički uslovi kojima je uzorak bio izložen u terenu.

91. Nedrenirani opit triaksijalne kompresije (U ili UU), triaksijalni aparat.

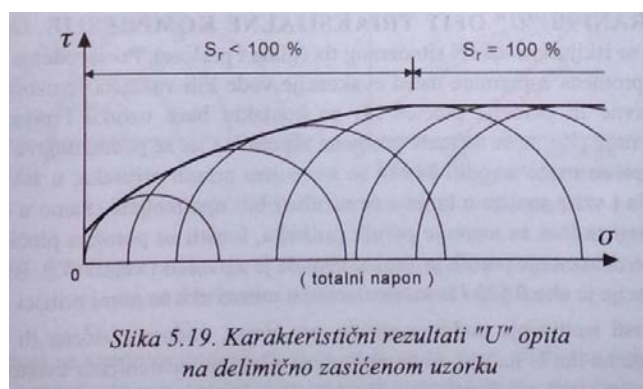
Ovoj vrsti ispitivanja podvrgavaju se, pre svega, vodom zasićena ili delimično zasićena sitnozrna tla. U načelu, ovim opitom se određuje nedrenirana čvrstoća gline u uslovima kao "in situ", pri čemu se poroznost, a samim tim i vlažnost, tokom opita ne menjaju u odnosu na stanje *in situ* na dubini sa koje je uzorak uzet. Opit se može izvoditi bez ili sa merenjem pornih pritisaka, u zavisnosti od tipa materijala i vrste analize u kojima će rezultati biti upotrebljeni.

Pretpostavljajući da su uzorci identični i da se provede nekoliko, najčešće tri nedrenirana opita, ali svaki sa različitom veličinom svestranog pritiska, dobijaju se iste veličine devijatora napona pri lomu. Rezultati se ovde mogu izraziti samo preko totalnih napona.

Anvelopa napona loma je horizontalna, tj. $\phi_u = 0$, a smičuća čvrstoća je konstantna nedrenirana kohezija $\tau_f = c_u$. Kada bi se, u seriji takvih opita, merili porni pritisci pri lomu, što se standardno ne radi, svi Morovi krugovi totalnih napona bi se preslikali u samo jedan krug efektivnih napona.



Delimično zasićeni uzorci ispitani na ovaj način ukazuju na izrazito nelinearnu anvelopu.



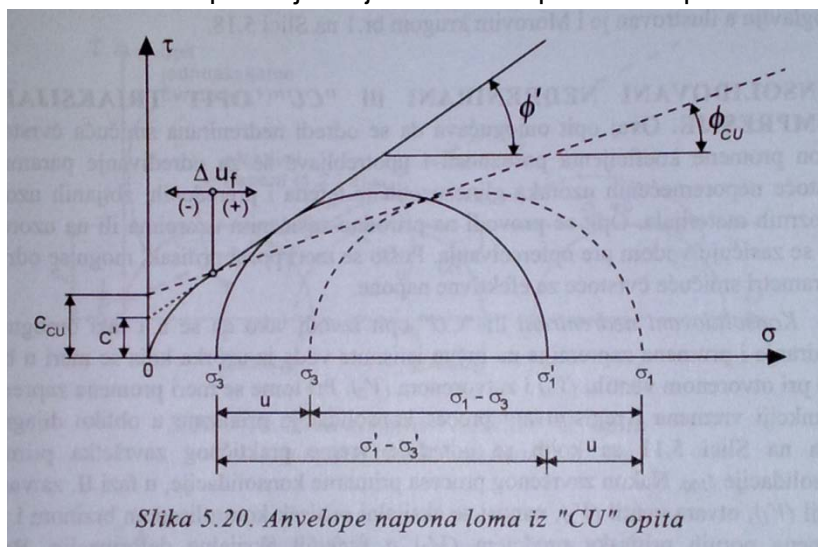
U području niskih napona meri se prividna kohezija kao posledica sukucije usled površinskog zatezanja u pomoć vodi, kada i pri nultom totalnom naponu između vrlo sitnih zrna deluje znatan efektivni napon iz kojeg proističe i smičuća otpornost. Kako nije poznat efektivni napon, jer se porni pritisak obično ne meri, iz rezultata nekonsolidovanog nedreniranog opita se ne mogu direktno odrediti parametri smičuće čvrstoće za efektivne napone.

92. Konsolidovani nedrenirani opit triaksijalne kompresije (CU), triaksijalni aparat.

Ovaj opit omogućava da se odredi nedrenirana smičuća čvrstoća i nakon promene koeficijenta poroznosti i upotrebljava se za određivanje parametara čvrstoće neporemećenih uzoraka gline uzetih iz terena i prerađenih, zbijanih uzoraka sitnozrnih materijala. Opit se provodi na prirodno zasićenim uzorcima ili na uzorcima koji se zasićuju vodom pre opterećivanja. Pošto se meri porni pritisak, mogu se odrediti i parametri smičuće čvrstoće za efektivne napone.

Konsolidovani nedrenirani ili "CU" opit izvodi tako da se u I fazi omogućava dreniranje i promena zapremine na račun istisnute vode iz uzorka koja se meri u bireti (13) pri otvorenom ventilu (V_1) i zatvorenom (V_2). Pri tome se meri promena zapremine u funkciji vremena i registrovani proces konsolidacije prikazuje u obliku dijagrama sa kojih se određuje vreme praktičnog završetka primarne konsolidacije t_{100} . Nakon završenog procesa primarne konsolidacije, u fazi II, zatvara se ventil (V_1), otvara ventil (V_2), nanosi se aksijalni pritisak kontrolisanom brzinom i meri promena pornih pritisaka uređajem (M_2) u funkciji aksijalne deformacije. Brzina aksijalne deformacije, koja omogućava dovoljnu homogenizaciju pornih pritisaka u uzorku tako da se oni mogu korektno meriti na njegovom kraju preko porozne pločice (4), bira se ispunjavanjem uslova da se lom uzorka dostigne nakon vremena koje se određuje primenom koeficijenata.

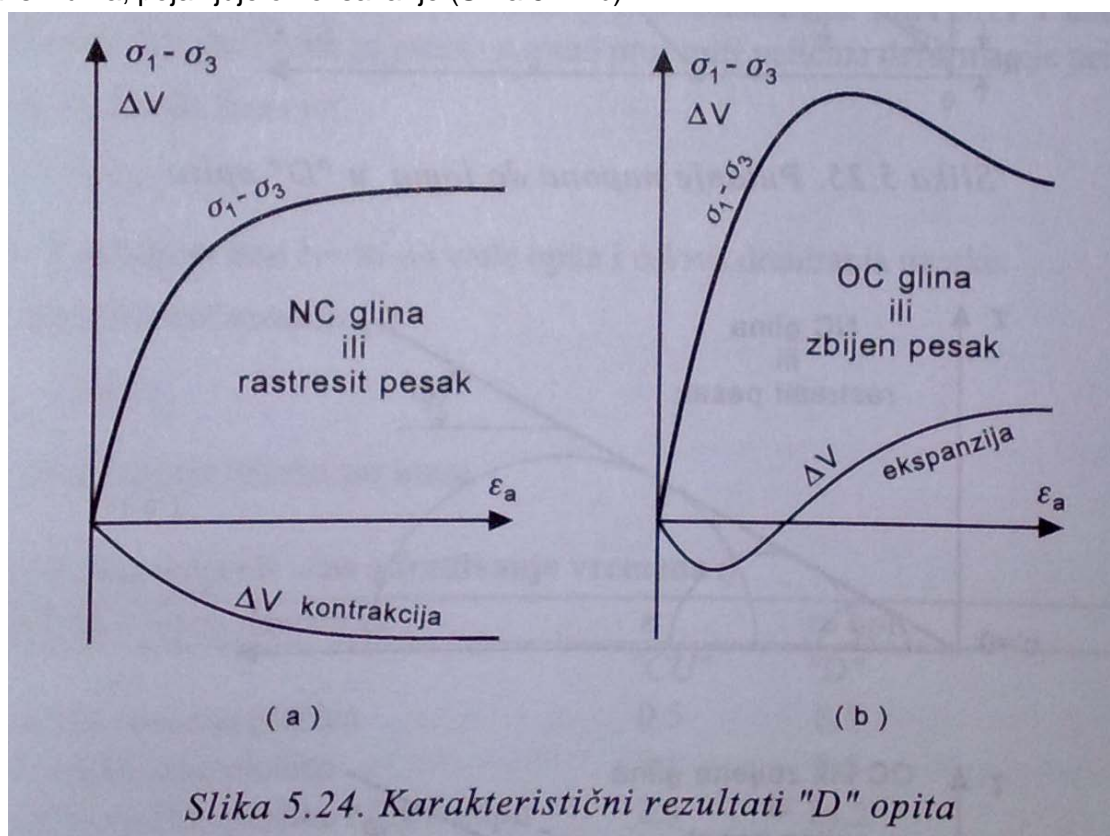
Karakteristični rezultat ispitivanja za jedan nivo napona izotropne konsolidacije:



93. Drenirani opit triaksijalne kompresije (CD ili D), triaksijalni aparat.

Ovaj standardni opit, koji se naziva i "*spori opit*", provodi se na takav način da su porni pritisci u toku nanošenja devijatora napona praktično jednaki nuli, tako da su totalni naponi jednaki efektivnim naponima. Opit daje parametre smičuće čvrstoće za efektivne naponne.

Faza I "*D*" opita se izvodi na identičan način kao i prva faza "*CU*" opita. Nakon završene primarne konsolidacije, koja se kontroliše dostizanjem veličine t_{100} , u drugoj fazi se povećava aksijalni pritisak do loma, uz merenje promene zapremine uzorka sistemom (13), dok se porni pritisci ne mere, a pretpostavlja se da su praktično zanemarljivi. U dreniranom opitu normalno konsolidovanog i rastresitog tla lom obično nastaje pri relativno velikim deformacijama uz smanjenje zapremine pri povećavanju devijatora napona, uz eventualne znake očvršćavanja (Slika 5.24-a). Prekonsolidovani ili zbijeni uzorci se lome pri manjim deformacijama, obično se uočava izražena vršna čvrstoća, tako da pri većim deformacijama devijator napona opada. Posle početnog smanjivanja zapremine, zapremina uzorka ima tendenciju povećanja pre loma, tako da se pri daljem deformisanju nakon dostizanja maksimuma, pojavljuje omekšavanje (Slika 5.24-b).

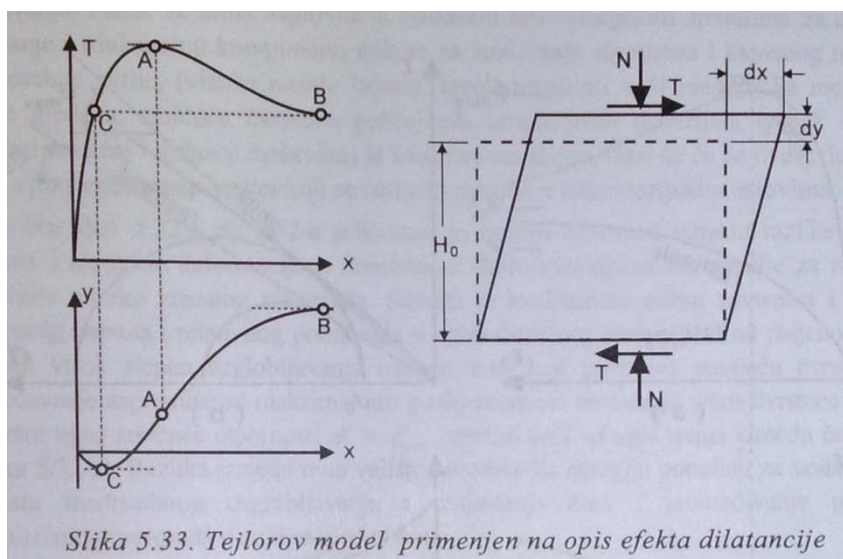


94. Prikazivanje rezultata triaksijalne kompresije, Lameov dijagram.

95. Tejlorov model dilatancije.

Za pojavu povećanja zapremine pri promeni smičućih napona u mehanici tla se koristi izraz "*dilatancija*" kojom se objašnjava uticaj uzgobljavanja zrna na ukupnu smičuću čvrstoću.

Ilustrativni model, koji opisuje uticaj gradijenta promene zapremine tla u zoni loma na čvrstoću tla, je relativno jednostavan ukoliko se razmatra ravna deformacija. Model koji obuhvata glavne osobine takvog ponašanja je implicitno opisao Taylor (1948) jednim brojnim primerom, bez uopštavanja u određen teorijski koncept, koji se može rekonstruisati ilustracijom i oznakama:



Slika 5.33. Tejlorov model primenjen na opis efekta dilatancije

Rad na deformaciji uzorka je $Tdx - Ndy$. Ako se rad spoljnih sila izjednači sa radom potrošenim na trenje pri konstantnoj zapremini, može se napisati da je:

$$Tdx - Ndy = \mu Ndx$$

što nakon sređivanja daje

$$T/N = p + dy/dx$$

gde sabirak dy/dx predstavlja efekat dilatancije. U tački B ovaj član je jednak nuli kada se uzorak deformiše bez promene zapremine. Gradijent promene zapremine je jednak nuli i za područje malih deformacija, što je naznačeno tačkom C i horizontalnim isprekidanim linijama CC'. Ukoliko se stavi da je $dy/dx=0$ tada je:

$$T/N = \mu = \tan(\phi'_{cv})$$

Međutim, pri deformaciji koja odgovara vršnoj čvrstoći, tačka A, odnos T/N ima maksimalnu vrednost, tako da je:

$$\left(\frac{T}{N}\right)_{max} = \tan(\phi'_{cv}) + \left(\frac{dy}{dx}\right)_{max}$$

Prethodni izraz opisuje ukupan ugao smičuće otpornosti tla i sada se može napisati i u konvencionalnom obliku:

$$\tan(\phi') = \tan(\phi'_{cv}) + \tan(\psi)$$

Taylorov model jasno pokazuje, na relativno jednostavan način, kako se ukupna smičuća čvrstoća sastoji od zbira trenja i efekta gradijenta promene zapremine dilatancije.

96. Zbijenost krupnozrnog tla, relativna zbijenost tla.

Zbijenost krupnozrnog tla se iskazuje pokazateljem koji se naziva relativna zbijenost tla D_r :

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 [\%]$$

odnosno:

$$D_r = \frac{\gamma_{dmax}(\gamma_d - \gamma_{dmax})}{\gamma_d(\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin})} \times 100 [\%]$$

97. Uticaj zbijenosti na smičuću čvrstoću tla.

Zbijanjem se povećava smičuća čvrstoća tla.

98. Zbijenost sitnozrnog tla, stepen zbijenosti tla.

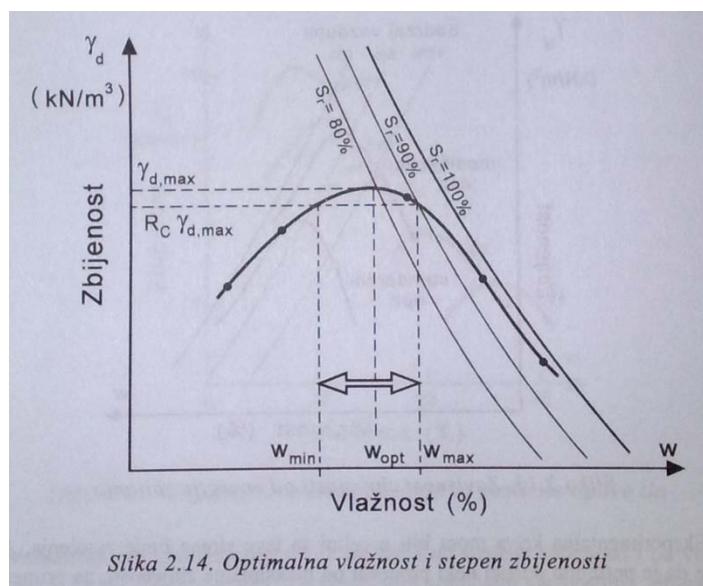
Zbijenost sitnozrnog tla se iskazuje pokazateljem koji se naziva stepen zbijenosti tla R_c :

$$R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}$$

99. Standardni i modifikovani Proktorov opit.

U **Standardnom Proktorovom opitu**, zapremina cilindra je 950 cm^3 i tlo (sa odstranjenim zrnima većim od $4,76 \text{ mm}$, a po nekim standardima, sa zrnima do 20 mm) se zbija maljem mase 2.5 kg koji slobodno pada sa visine od 50.5 cm . Tlo se zbija u tri sloja sa po 25 udaraca po sloju.

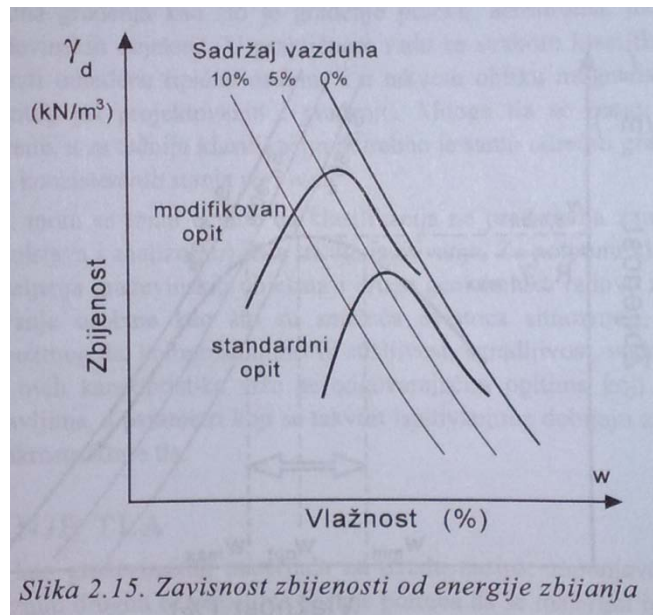
Nakon zbijanja po jednom od navedenih standardnih postupaka odredi se zapreminska težina i vlažnost. Za dato tlo postupak se ponavlja najmanje pet puta sa različitim vlažnostima. Zapreminska težina u suvom stanju γ_d se nanese u funkciji vlažnosti w i dobija kriva prikazana na Slici 2.14.



Kriva pokazuje da za datu energiju zbijanja postoji vlažnost pri kojoj se postiže maksimalna veličina zapreminske težine u suvom stanju ili maksimalna zbijenost. Takva vlažnost w_{op} se naziva *optimalnom vlažnošću*. Pri manjem sadržaju vode tlo je relativno kruto i teško se zbija. Ukoliko se vlažnost postepeno povećava tlo postaje deformabilnije i ugradljivije te se dobija veća zbijenost. Pri daljem povećavanju vlage u tlu smanjuje se zapremina vazduha koja bi se mogla istisnuti i zbijenost opada. Na istom dijagramu se za datu veličinu γ_s i razne vrednosti γ_d može prikazati linija zasićenja ($S_r=100\%$) ili zavisnost između vlažnosti i zapreminske težine pri kojoj su sve pore ispunjene vodom, odnosno zapremina vazduha u porama je jednaka nuli. Na istom dijagramu se mogu konstruisati linije jednakih stepena zasićenja S_r , na primer za $S_r = 0,9, 0,8$, itd.

Modifikovani Proktorov opit u kome je broj slojeva povećan na 5, težina malja na 4.5 kg , a visina pada na 46 cm , tako da je energija zbijanja povećana za oko 4.5 puta u odnosu na "standardnu".

Alternativno, ukoliko se želi prikazati promena sadržaja vazduha, mogu se konstruisati linije sa konstantnim vrednostima, na primer $J = 0.1$ (10%), $A = 0.2$ (20%), itd., pri čemu linija zasićenja daje zavisnost za $A = 0$.

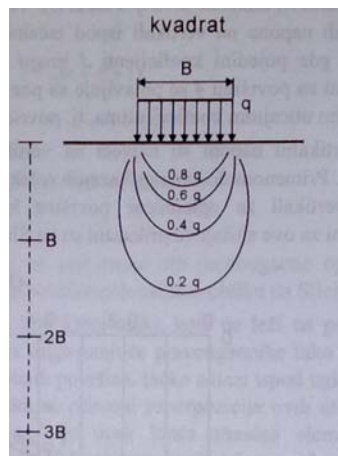


Slika 2.15. Zavisnost zbijenosti od energije zbijanja

Eksperimentalna kriva mora biti u celini sa leve strane linije zasićenja. Ako se propiše da je potrebno postići neki procenat od maksimalne zbijenosti, na primer 95% tj. $0.95 \gamma_{d,max}$ predstavljen horizontalnom linijom sa dijagrama se može očitati interval prihvatljive vlažnosti, pri čemu je jedna granica "suvlja od optimuma" a druga "vlažnija od optimuma".

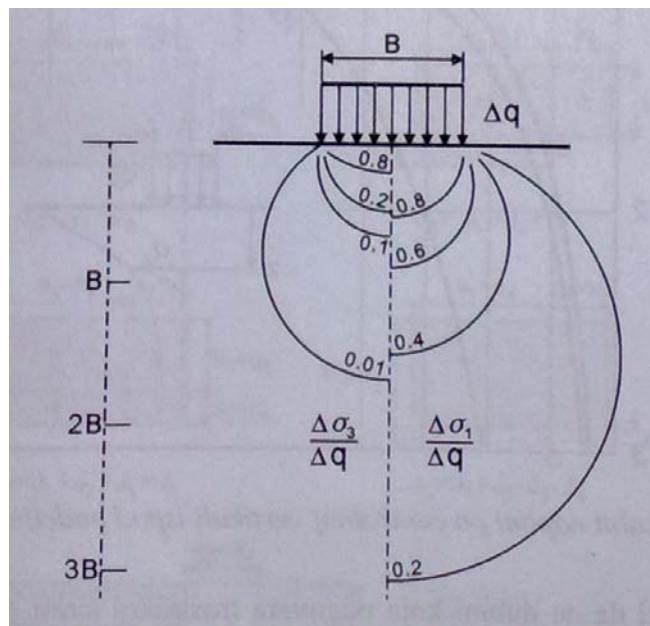
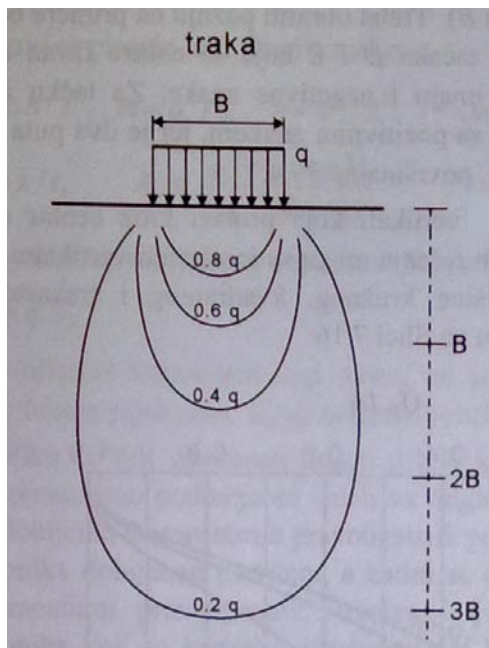
100. Vertikalna sila na površini elastičnog poluprostora, konusna raspodela.

101. Približni raspored priraštaja vertikalnih napona, pravougaoni temelj.



Vertikalni naponi usled opterećenja na površini opadaju sa dubinom.

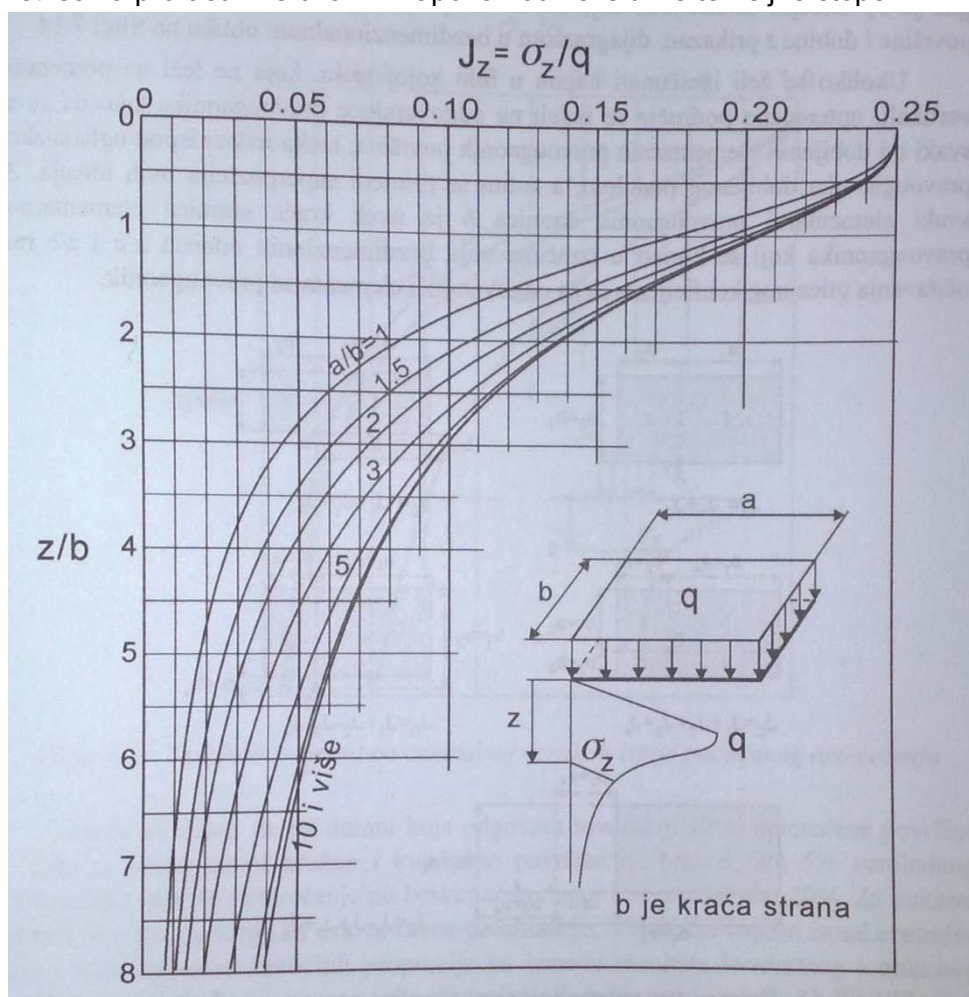
102. Približni raspored priraštaja vertikalnih napona, trakasti temelj.



Vertikalni naponi usled opterećenja na površini opadaju sa dubinom. Priraštaj minimalnog glavnog napona opada sa dubinom znatno brže od priraštaja maksimalnog glavnog napona, dok obe komponente relativno brzo opadaju po horizontali.

103. Metoda Štajnbrenera za određivanje vertikalnih napona.

Koristi se za proračun vertikalnih napona kod fleksibilne temeljne stope.



a i b su stranice elementarnog kvadrata, gde je b uvek kraca strana. Ove stranice se određuju na osnovu tačke za koju se traži vertikalni napon.

Vertikalni napon se određuje formulom:

$$\sigma_z = q I_z;$$

I_z uticajni koeficijent koji zavisi od proporcija a/b pravougaone opterećene površine i dubine z :

$$I_z = I_z\left(\frac{a}{b}, \frac{z}{b}\right)$$

104. Komponente sleganja temelja na realnom tlu.

Ukupna veličina sleganja opterećene površine se može opisati zbirom:

$$S = S_t + S_c + S_{sc}$$

gde je:

s_t *trenutno sleganje*. Deformacije se pojavljuju istovremeno sa nanošenjem priraštaja napona. U zasićenim glinama, koje se u nedreniranim uslovima deformišu bez promene zapremine, sleganje je posledica samo distorzijskih deformacija, tj. promene oblika elementa tla.

s_c *konsolidaciono sleganje*. Deformacije promene zapremine doprinose ukupnoj veličini sleganja, pri čemu u vodom zasićenim materijalima dolazi do istiskivanja vode iz pora. Ova komponenta je značajna kod glina jer može trajati relativno dugo. U peskovima i drugim vodopropusnim materijalima ova komponenta sleganja se odigrava praktično istovremeno sa trenutnim sleganjem u toku nanošenja opterećenja, bez vremenskog zaostajanja.

s_{sc} *sekundarna kompresija*. Ova komponenta volumetrijskog puzanja, a u ekstremnim okolnostima i distorzijskog puzanja, koja se događa pri visokoj mobilizaciji smičuće čvrstoće, posebno je karakteristična za meke i normalno konsolidovane gline, ali može biti značajna i kod normalno konsolidovanih peskova i drugih krupnozrnih materijala.

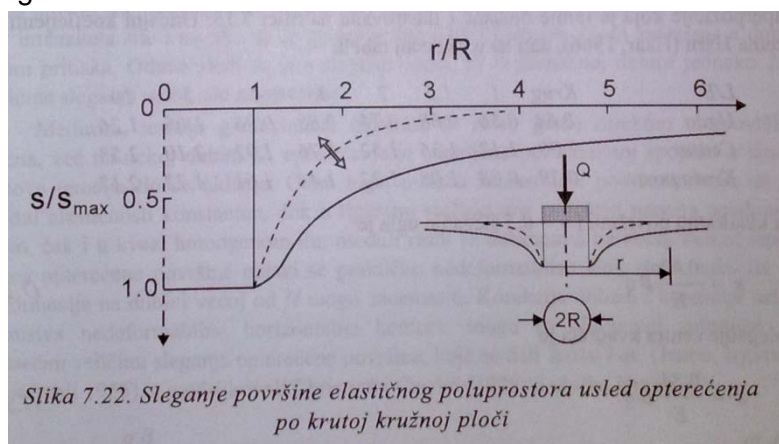
105. Sleganje opterećene površine elastičnog poluprostora.

Sleganje usled jednako podeljenog opterećenja na površini proizvoljnog oblika na površini elastičnog poluprostora:

$$s = (1 - \nu^2) \frac{qB}{E} I_s$$

Gde je B karakteristična dimenzija opterećene površine, a I_s je uticajni koeficijent koji zavisi od oblika opterećene površine i položaja tačke za koju se sleganje traži.

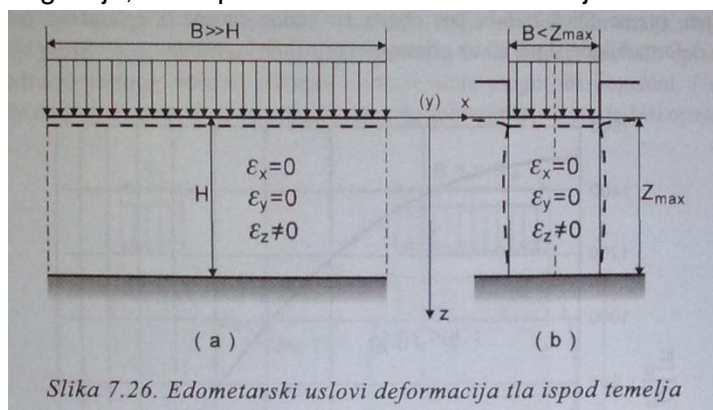
Uticajni koeficijent I_s zavisi od odnosa dužine L prema širini B , gde je B manja dimenzija pravougaonika.



106. Elastično sleganje opterećene površine na sloju konačne dubine.

107. Edometarska pretpostavka za proračun konsolidacionog sleganja.

Uzorak je izložen kontrolisanim priraštajima vertikalnih napona i jednodimenzionalnim deformacijama u uslovima sprečenog bočnog širenja. Takvi uslovi su veoma slični slučajevima u praksi ukoliko su širine opterećene površine znatno veće od debljine sloja tla čije se sleganje posmatra, ali se nameće praktična hipoteza da se isti prilaz verovatno može koristiti i kada taj uslov nije zadovoljen, bez obzira na odnos dimenzija opterećene površine i debljine deformabilnog sloja, ali uz primenu eventualnih korekcija.



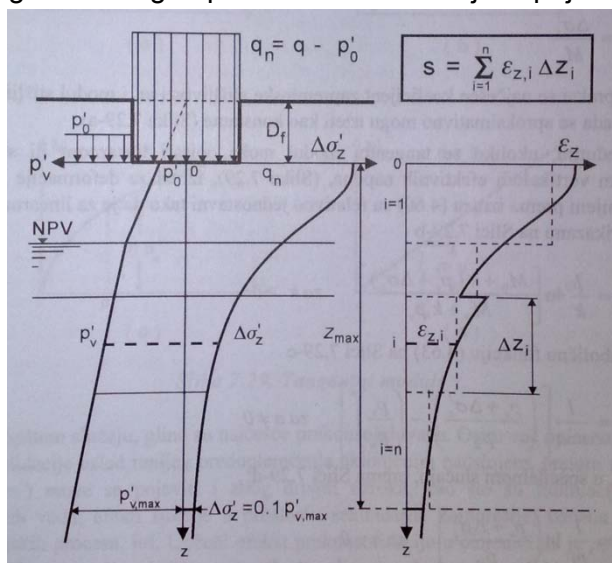
Ova hipoteza, koja se u daljem tekstu naziva "edometarskom pretpostavkom", podrazumeva da se stub tla ispod opterećene površine u pogledu deformacija ponaša isto kao i uzorak u edometru tako da su bočne deformacije $\epsilon_x = 0$ i $\epsilon_y = 0$, postoji samo vertikalna deformacija ϵ_z .

U načelu, veličina sleganja se računa integrisanjem vertikalnih deformacija ϵ_z po dubini:

$$s = \int_0^Z \epsilon_z dz$$

gde je $Z = Z_{max}$ dubina do koje se deformacije uzimaju u obzir, a na dubini većoj od Z_{max} se zanemaruju.

U proračunu konsolidacionog sleganja priraštaj vertikalnih napona određuje nanošenjem neto kontaktaog napona q_n koji predstavlja razliku bruto kontaknog napona q i geostatičkog vertikalnog efektivnog napona na nivou temeljne spojnice p'_0 .



108. Metoda De Bera za proračun sleganja.

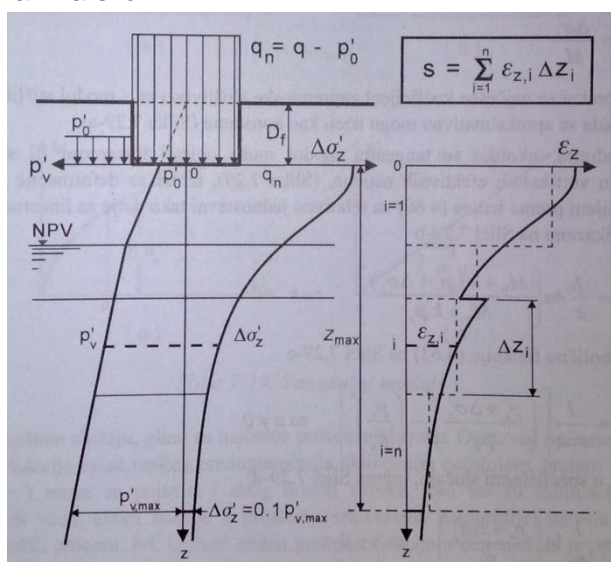
Ako je q_c otpor vrha statičkog penetrometra a p'_v je vertikalni efektivni napon usled sopstvene težine tla na dubini na kojoj je opit izvršen, Terzagijeva konstanta stišljivosti C za posmatranu tačku i početni vertikalni efektivni napon je:

$$C = 1,5 \frac{q_c}{p'_v}$$

a specifična deformacija je:

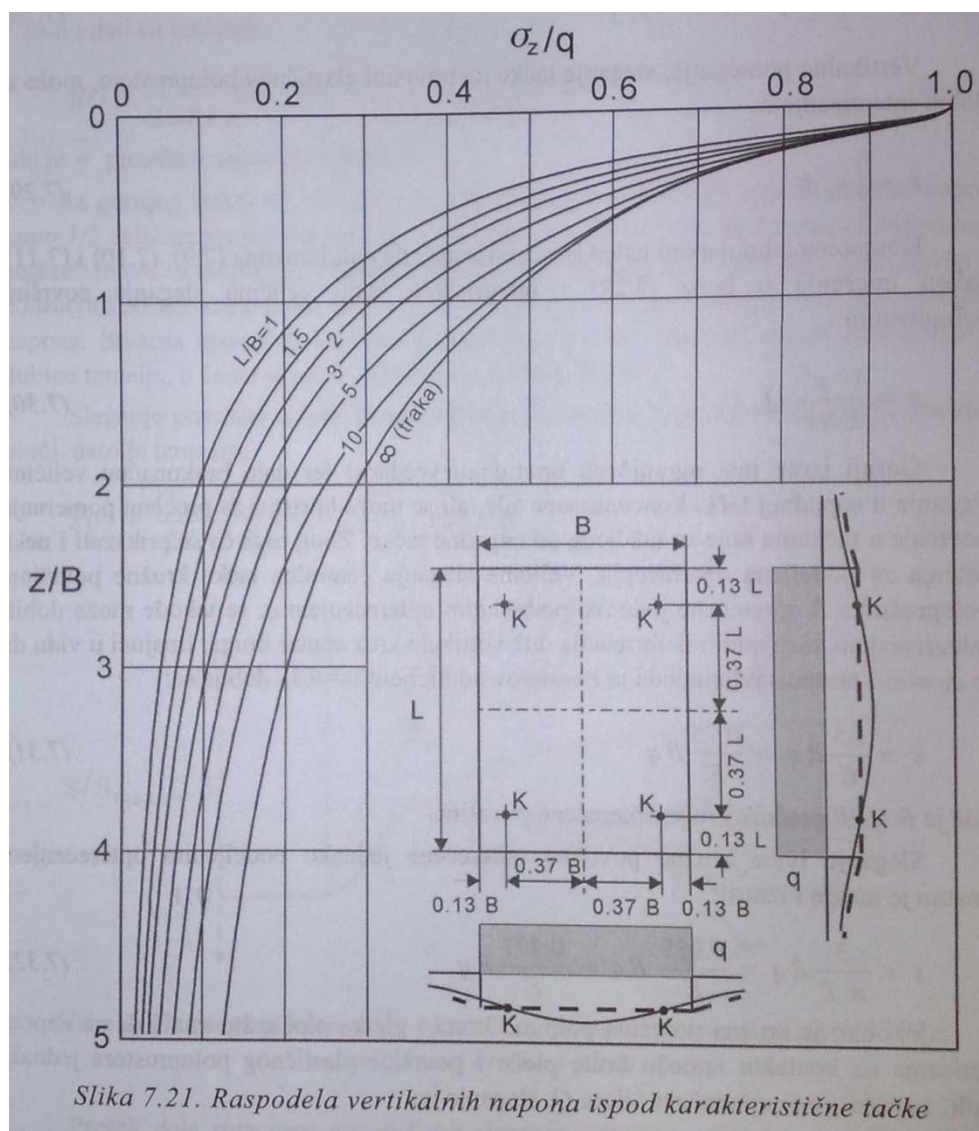
$$\varepsilon_z = \frac{1}{C} \ln \left(\frac{p'_v + \Delta\sigma'_z}{p'_v} \right)$$

Praktičan proračun sleganja se provodi podelom vertikale integracije na proslojke, lamele debljine Δz unutar koje se pretpostavi da je otpor vrha konusa konstantan. Tako izračunate deformacije se po dubini integrišu do dubine na kojoj je priraštaj vertikalnog normalnog napona $\Delta\sigma_z$ manji od 10% početnog vertikalnog napona p'_v , u načelu, prema postupku koji je ilustrovan na slici:



109. Ekvivalentna tačka za proračun sleganja krutog temelja (Kani).

Za temelje pravougaonog oblika određuje se položaj ekvivalentnih tačaka koje se nalaze na dijagonalama. Izračunava se raspodela vertikalnih napona ispod *ekvivalentne tačke K* za razne proporcije opterećene površine odgovarajućom superpozicijom Stajnbrennerovog rešenja. Položaj ekvivalentne tačke sa rasporedom vertikalnih napona po dubini predložio je Kani u obliku dijagrama:



Slika 7.21. Raspodela vertikalnih napona ispod karakteristične tačke

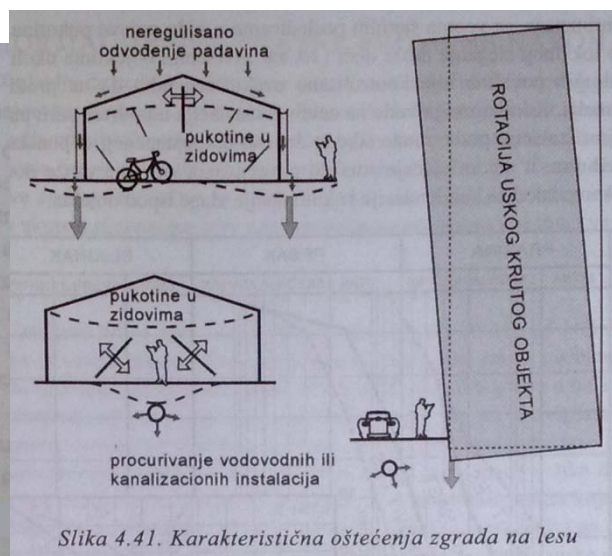
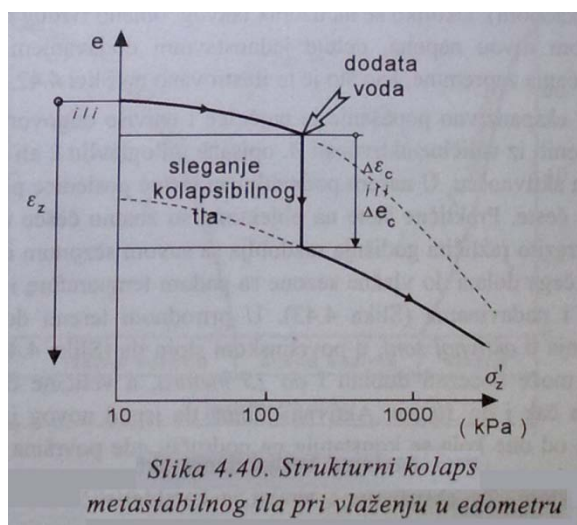
110. Uticaj sniženja nivoa podzemne vode na sleganje temelja.

Usled spuštavanja NPV javlja se dodatno sleganje tla koje je posledica promene zapremine na račun pora koje su nekad bile ispunjene vodom, a posle ispunjene vazduhom (u slojevima iznad novog nivoa PV porni pritisak naglo opada) ovo sleganje iznosi 30% prvobitnog sleganja.

111. Deformacija lesa kao metastabilnog tla.

Les je eolski sediment veoma rasprostranjen u Evropi, Aziji i Severnoj Americi i pokriva oko **10%** kopnene površine planete zemlje.

Sa relativno malom prirodnom vlažnošću uzorak pokazuje malu do umerenu stišljivost u području normalnih napona do **100-200 kPa**. Kada se pri takvom nivou napona u kutiju edometra doda voda, dolazi do relativno velikog sleganja uzorka zbog omekšavanja glinenog veziva između zrna i njihovog relativnog pomeranja ka stabilnijoj, zbijenijoj konfiguraciji. Za deformacije $\varepsilon_c > 1\%$ kaže se da les ima metastabilnu strukturu i da zbog toga pri vlaženju dolazi do strakturnog kolapsa granularnog skeleta uz smanjenje zapremine. Sleganje usled tako nastale deformacije može imati veoma štetne posledice po građevinske objekte.

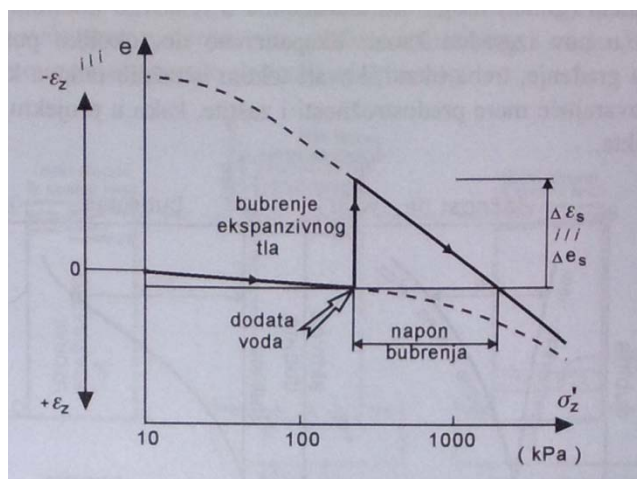


112. Zaštitne mere pri temeljenju na lesu.

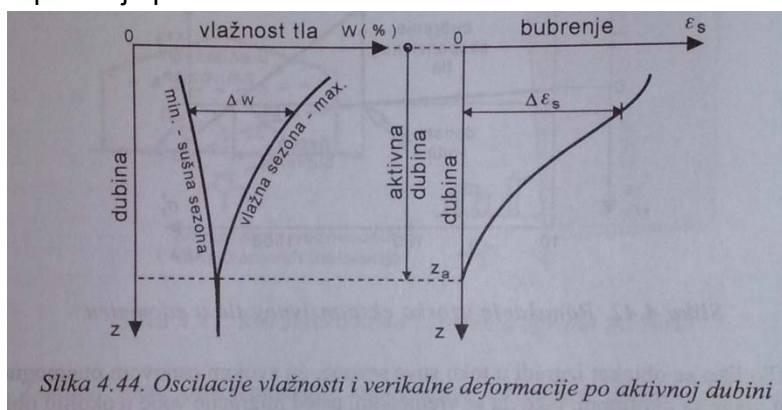
Podrazumevaju kontrolisano odvođenje atmosferskih voda sa krovnih i drugih površina kao i maksimalnu pažnju pri izradi i kontroli izvođenja vodovodnih i kanalizacionih instalacija u području objekta uz eventualne posebne zaštitne mere, a u izvesnim uslovima, u slučaju većih opterećenja, pribegava se i dubokom temeljenju na šipovima, prenošenjem opterećenja na dublje, stabilnije slojeve.

113. Ekspanzivna tla.

Delimično zasićene tvrde visokoplastične gline mogu biti veoma prekonsolidovane sušenjem (desikacijom). Ukoliko se na uzorak takvog, obično tvrdog tla, u edometru pri relativno niskom nivou napona, deluje jednostavnim dodavanjem vode, dolazi do bubrenja, povećanja zapremine.

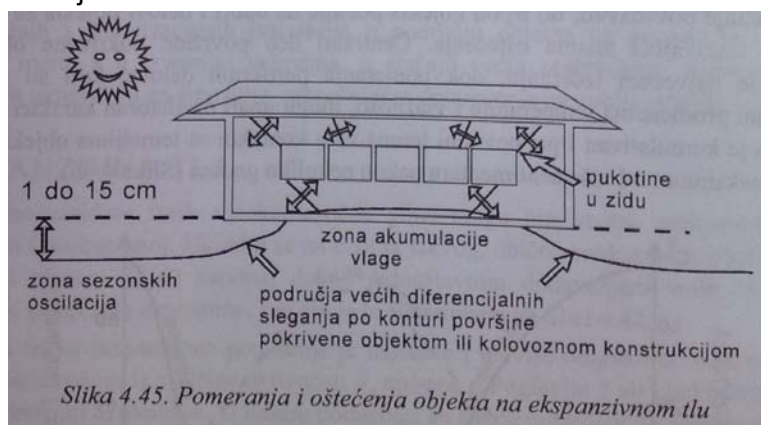


U prirodnom terenu dolazi do cikličnog sušenja i vlaženja u **aktivnoj zoni**, u površinskom sloju tla koji u ekstremnim uslovima može dosežati dubinu i **do 15 metara**, a veličine dizanja i spuštanja površine terena čak i do **30 cm**.



Slika 4.44. Oscilacije vlažnosti i verikalne deformacije po aktivnoj dubini

Moguća oštećenja:



Slika 4.45. Pomeranja i oštećenja objekta na ekspanzivnom tlu

114. Zaštitne mere pri temeljenju na ekspanzivnom tlu.

Pre izgradnje objekta treba obaviti opite kako bi se ispitalo da li je zemljište stabilno, ili da se utvrdi kakav bi uticaj zemljište moglo da ima na objekat.

Za objekte koji već postoje: pravilno održavanje zemljišta - jedinstven i konstantan nivo vlažnosti u zemljištu. Ovo može da podrazumeva uvođenje vlage u zemljištu stalno i ravnomerno da spreči smanjenje i / ili sprečavanja prekomernog vlaženja odgovarajuće sisteme odvodnjavanja tj. navodnjavanja. Za objekte već pogođene efektima ekspanzivnog tla preporučuju se različite metode ojačavanja temelja da bi se sprečilo klizanja i vertikalno pomeranje.

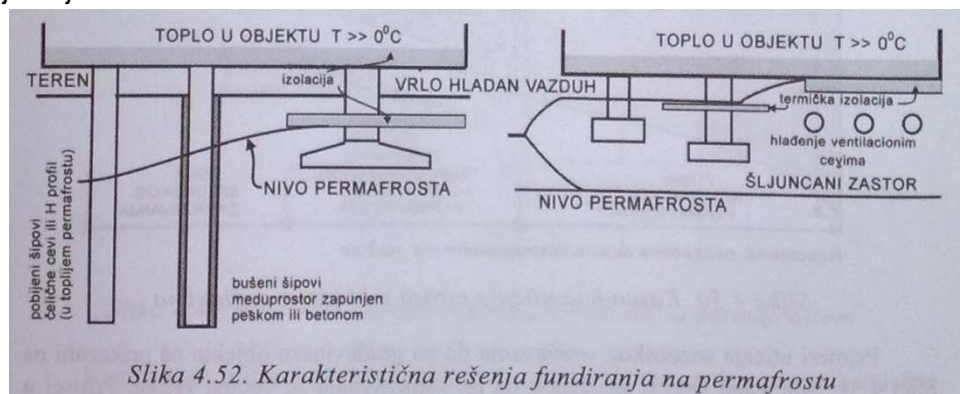
115. Dejstvo mraza na tlo.

Usled zamrzavanja površinskog sloja tla može doći do izdizanja njegove površine, pri čemu nakon povišenja temperature u proleće, takva mesta ostaju veoma meka i raskvašena. Ova pojava može izazvati velika oštećenja na kolovoznim konstrukcijama, oblogama kanala i plitkim temeljima.

Zamrzavanje vode je praćeno povećavanjem zapremine od oko 9% pri prelasku u led. Zbog toga povećavanje zapremine zasićenog tla pri sniženju temperature ispod tačke mržnjenja nastaje usled povećanja zapremine pora za isti iznos. Ukupna promena zapremine tla, zavisno od poroznosti, može biti približno između 2.5% i 5 %, što bi u našim klimatskim uslovima izazvalo izdizanje površine tla od 2 do 4 cm, a u krupnozrnom tlu, šljunku ili pesku može biti i manje jer se pri zamrzavanju izvesna količina vode može istisnuti iz pora. Međutim, u određenim okolnostima, mogu se zapaziti i znatno veće promene zapremine praćene izdizanjima i od po 50 cm.

116. Zaštitne mere protiv dejstva mraza kod temeljenja.

Zaštitne mere i projektna rešenja stalnih objekata u uslovima kontinualnog i sporadičnog permafrosta se najčešće zasnivaju na principima koji imaju za cilj da sačuvaju ili bar minimalno remete prirodni toplotni režim tla sprečavanjem zagrevanja tla toplotom koju emituje objekat.



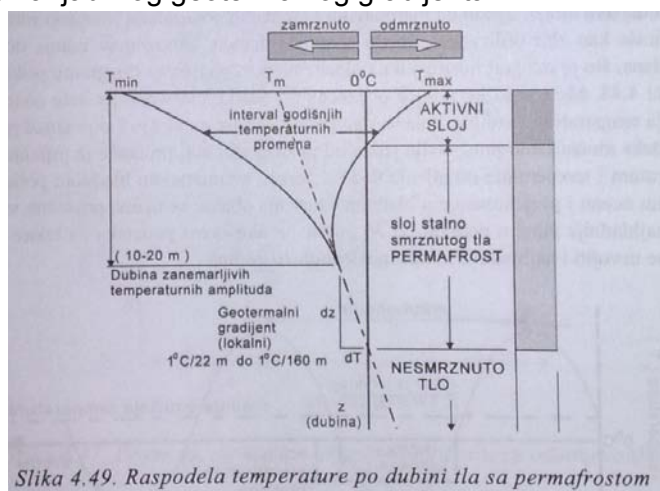
U ekstremnim uslovima objekat je podignut iznad nivoa terena tako da ispod njega može da struji hladan vazduh, a temeljenje se izvodi na šipovima oslonjenim ispod donje

granice aktivnog sloja u stalno zamrznutom tlu. U mekšem, toplijem permafrostu mogu se pobiti čelični šipovi, ali se češće koriste bušeni šipovi, ponekad i temeljne stope termički izolovane u površinskom području tla.

117. Permafrost.

Ako je indeks mraza manji od nule tlo može biti povremeno ili stalno zamrznuto, kada se kaže da se radi o zoni *permafrosta*. Područja u kojima ove pojave imaju praktičnog značaja nazivaju se *hladnim regionima*.

U uslovima prosečne godišnje temeperature manje od oko -3°C ili indeksa mraza manjeg od oko $-3900^{\circ}\text{C dana}$, formiran je sloj stalno zamrznutog tla, *permafrost*, koji je pokriven aktivnim slojem promenljive dubine, a leži na nesmrznutom tlu ili steni. Donja granica, dubina permafrosta zavisi osim od temperaturnog režima vazduha na površini terena i od lokalnog, takođe varijabilnog geotermalnog gradijenta.

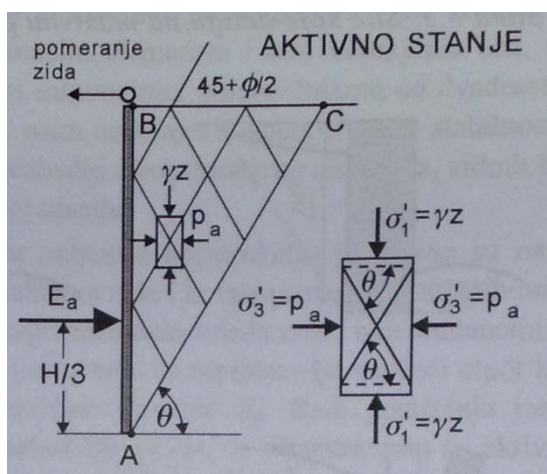


Slika 4.49. Raspodela temperature po dubini tla sa permafrostom

118. Pritisak tla u stanju mirovanja, elastično tlo, realna NC i OC tla.

119. Aktivni pritisak tla po Rankinu.

Teren je horizontalan, zid je vertikal, idealno krut i glatak, na tlo deluju samo normalni naponi.



Aktivni pritisak se određuje kao:

$$p_a = K_a \gamma z - 2c\sqrt{K_a}$$

gde je K_a koeficijent aktivnog pritiska:

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2})$$

Rezultantna sila aktivnog pritiska E_a je:

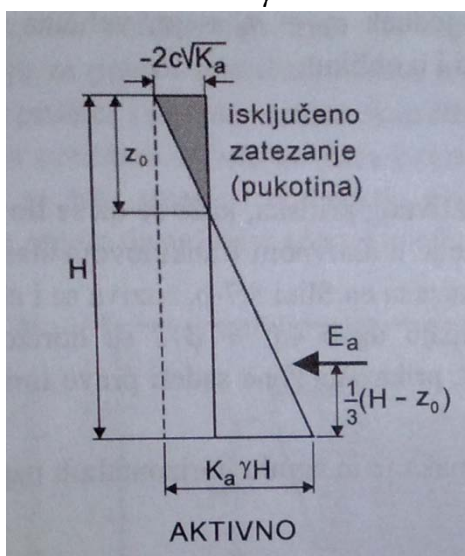
$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - 2cH\sqrt{K_a}$$

Ako je $c > 0$ onda postoji neki vertikalni napon γz_0 na dubini z_0 na kojoj je horizontalni napon jednak nuli. Sila po jedinici dužine zida usled aktivnog pritiska tla je:

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma (H - z_0)^2; \quad z_0 = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}}$$

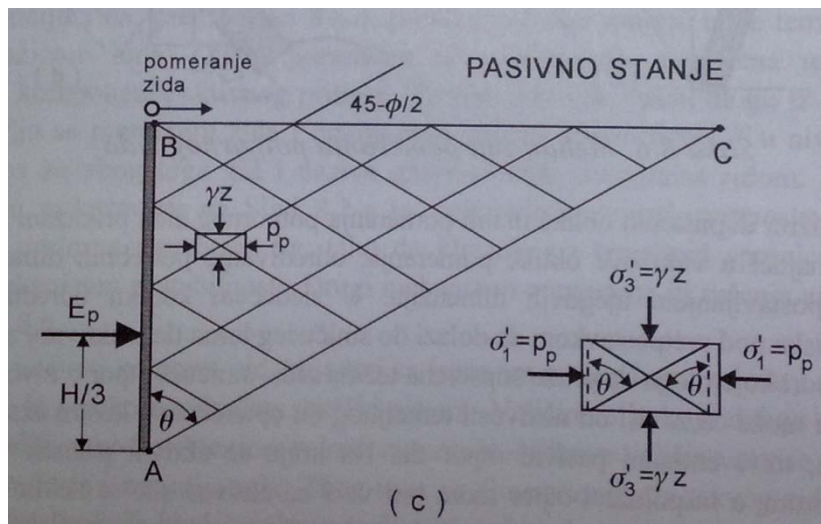
Ako je $\Phi_u = 0$ onda je:

$$z_0 = \frac{2c}{\gamma}$$



120. Pasivni otpor tla po Rankinu.

Teren je horizontalan, zid je vertikal, idealno krut i glatak, na tlo deluju samo normalni naponi.



Pritisak pasivnog otpora tla se određuje kao:

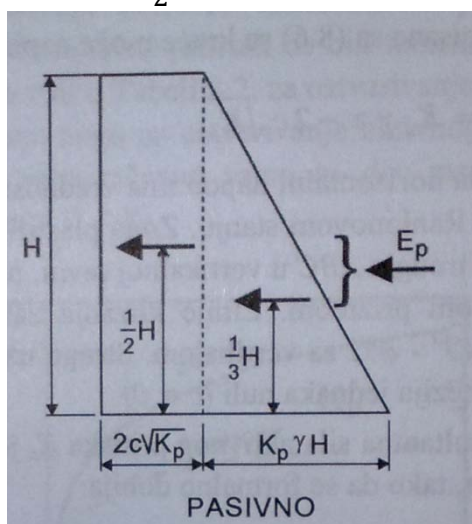
$$p_p = K_p \gamma z - 2c\sqrt{K_p}$$

Gde je K_p koeficijent pasivnog otpora tla:

$$K_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

Rezultantna sila pasivnog otpora je:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p - 2cH\sqrt{K_p}$$



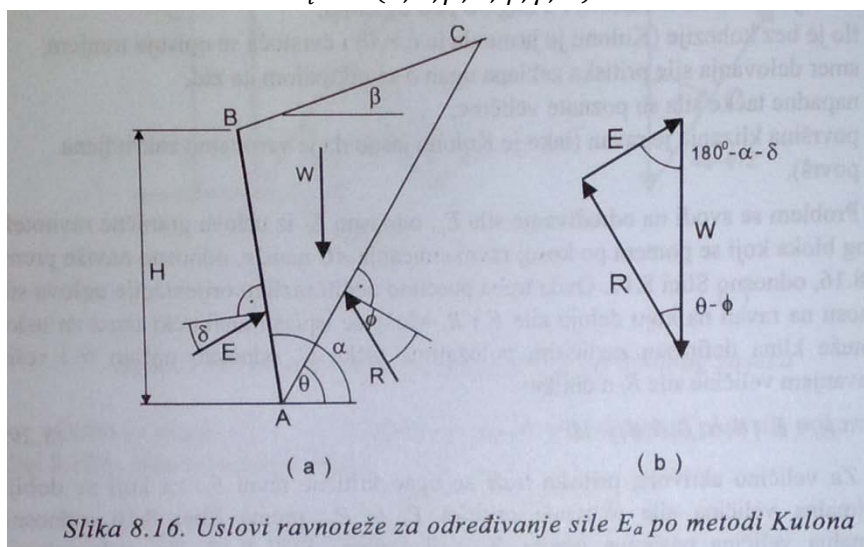
121. Aktivni pritisak tla po Kulonu – osnovne pretpostavke.

Pretpostavke:

- zid je krut i ravan pod uglom α u odnosu na horizontalu,
- teren je ravan ali može biti i u nagibu pod uglom β ,
- tlo je bez kohezije i čvrstoća se opisuje trenjem,
- smer delovanja sile pritiska zaklapa ugao δ sa normalom na zid,
- napadne tačke sila su poznate veličine,
- površina klizanja je ravan.

Opšti oblik sile E:

$$E_i = E(\theta, \alpha, \beta, \delta, \phi, \gamma, H)$$



Aktivna sila pritiska tla je:

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

gde je K_a koeficijent aktivnog pritiska tla:

$$K_a = \left[\frac{\frac{\sin(\alpha - \phi')}{\sin \alpha}}{[\sin(\alpha + \delta)]^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\sin(\phi' + \delta) \sin(\phi' - \beta)}{\sin(\alpha - \beta)} \right)^{\frac{1}{2}}} \right]^2$$

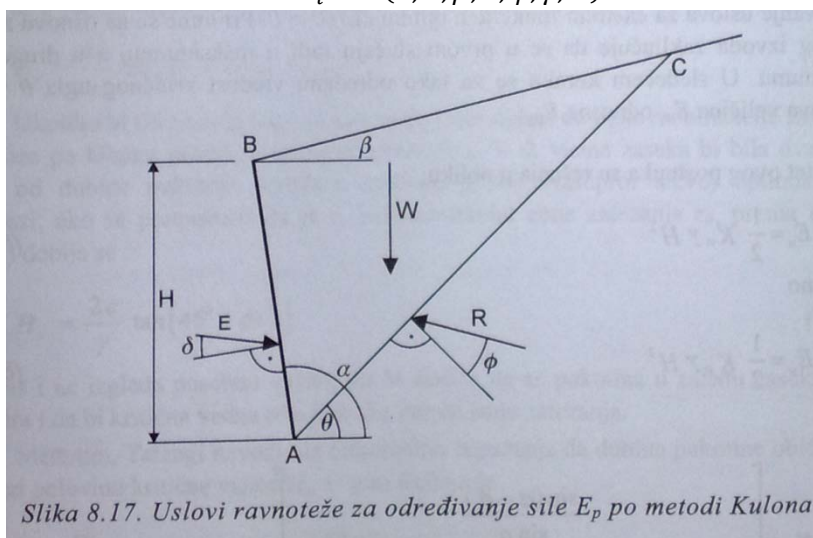
122. Pasivni otpor tla po Kulonu – osnovne pretpostavke.

Pretpostavke:

- zid je krut i ravan pod uglom α u odnosu na horizontalu,
- teren je ravan ali može biti i u nagibu pod uglom β ,
- tlo je bez kohezije i čvrstoća se opisuje trenjem,
- smer delovanja sile pritiska zaklapa ugao δ sa normalom na zid,
- napadne tačke sile su poznate veličine,
- površina klizanja je ravan.

Opšti oblik sile E:

$$E_i = E(\theta, \alpha, \beta, \delta, \phi, \gamma, H)$$



Sila pasivnog otpora tla je:

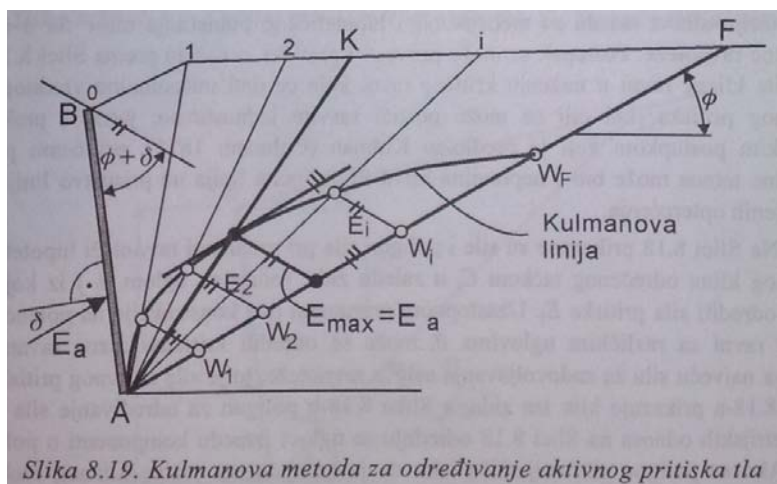
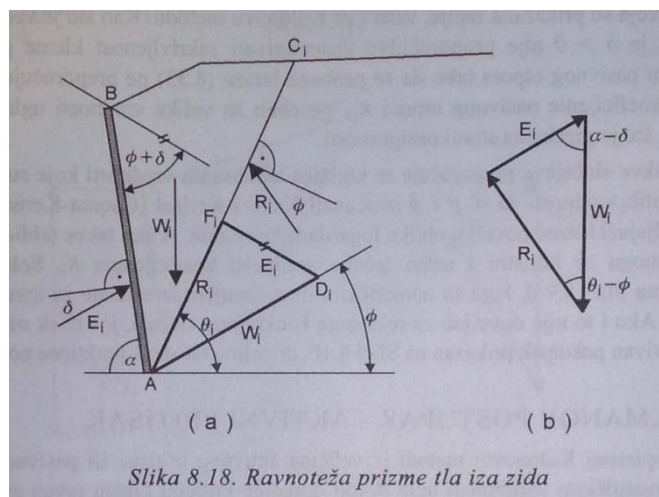
$$E_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2$$

gde je K_a koeficijent aktivnog pritiska tla:

$$K_p = \left[\frac{\frac{\sin(\alpha + \phi')}{\sin \alpha}}{[\sin(\alpha - \delta)]^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\sin(\phi' + \delta) \sin(\phi' + \beta)}{\sin(\alpha - \beta)} \right)^{\frac{1}{2}}} \right]^2$$

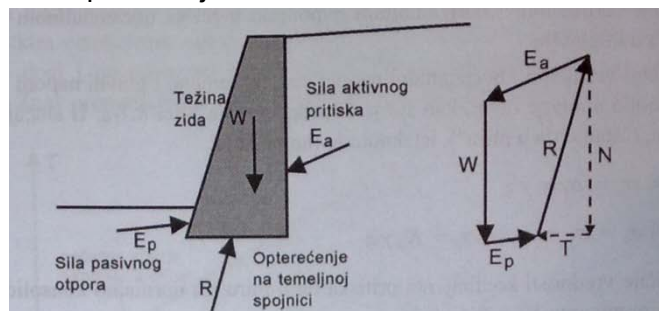
123. Određivanje aktivnog pritiska tla po metodi Kulmana.

Na Slici 8.18 prikazane su sile i poligon sila pri graničnoj ravnoteži hipotetičkog aktivnog klina određenog tačkom C_i u zaleđu zida, (odnosnu uglom θ) iz kojeg se može odrediti sila pritiska E_i . Uzastopnom primenom ove konstrukcije na potencijalne klizne ravni sa različitim uglovima θ , može se odrediti kritična klizna ravan koja zahteva najveću silu za zadovoljavanje uslova ravnoteže, to je sila aktivnog pritiska E_a . Slika 8.18-a prikazuje klin iza zida, a Slika 8.18-b poligon za određivanje sila E_i . Iz geometrijskih odnosa na Slici 8.18 određuju se uglovi između komponenti u poligonu sila. Ako se poligon sila orijentiše tako da je komponenta težine kliznog bloka W_i paralelna sa pomoćnom pravom povučenom iz tačke A pod uglom ϕ u odnosu na horizontalu, komponenta E_i će biti paralelna sa pomoćnim pravcem iz tačke B koji sa ravni zida zaklapa ugao $\phi + \delta$, kao što je to prikazano na Slici 8.18-a. Aktivni pritisak E_i klina ABC_i može se dobiti tako da se težina klina u odgovarajućoj razmeri nanese na pomoćnu pravu iz tačke A , kao dužina AD_i a zatim se iz tačke D_i povuče paralela sa pomoćnim pravcem B do preseka sa AC_i u tački F_i . Dužina između tačaka D_iF_i je veličina sile E_i u razmeri u kojoj su crtane težine W_i . Ponavljanjem ovakvog postupka za više hipotetičkih kliznih ravni ($i=1$ do n), kao što je to prikazano na Slici 8.19, dobiće se sile E_1 do E_n čiji krajevi leže na zakrivljenoj tzv. Kulmanovoj liniji. Tangenta na tu krivu liniju, paralelna sa pravcem ϕ , određuje maksimalnu veličinu sile aktivnog pritiska $E_{max} = E_a$ i položaj kritične klizne ravni AK .

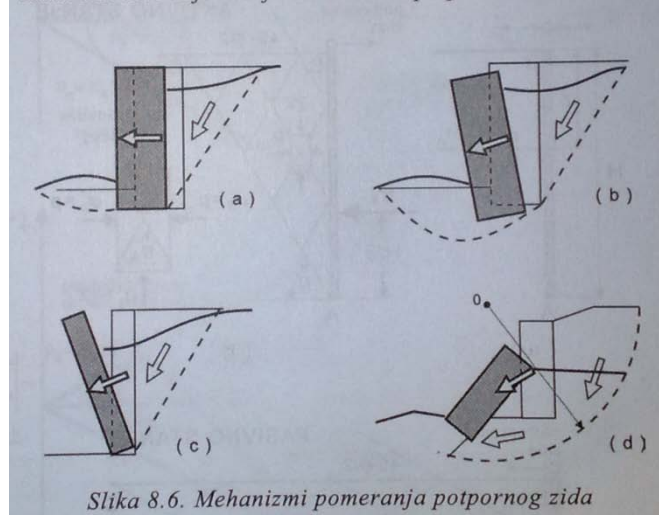


124. Masivne potporne konstrukcije – opterećenja i uslovi stabilnosti.

Potporni zid se obično primenjuje kao trajna konstrukcija kada je potrebno obezbediti prostor a želi se izbeći kosina po konturi iskopa. Masivni ili gravitacioni potporni zid svoj naziv i stabilnost duguje sopstvenoj težini koja mu obezbeđuje sigurnost pri delovanju horizontalnih komponenti opterećenja.



Slika 8.5. Sile koje deluju na masivnu potpornu konstrukciju

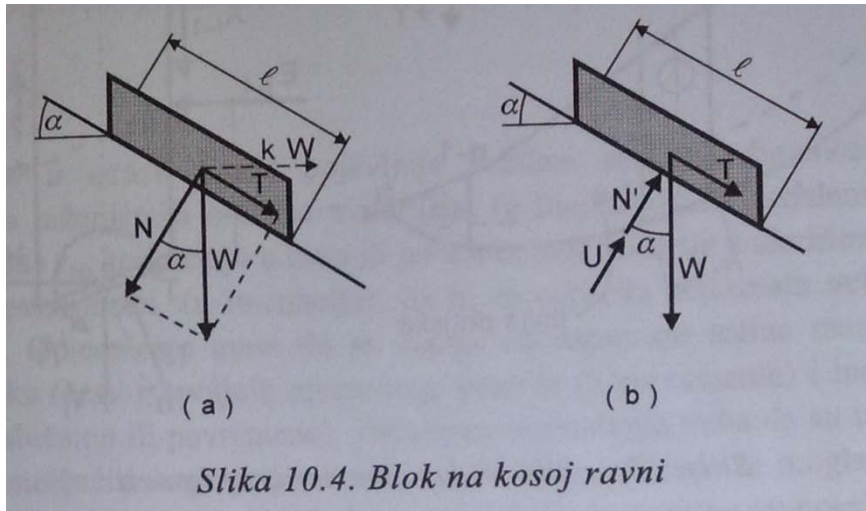


Slika 8.6. Mehanizmi pomeranja potpornog zida

Reaktivna sila R je u ravnoteži sa težinom zida i komponentama zemljanih pritisaka E_a i E_p . Sila aktivnog pritiska E_a nastaje pri zasipanju zaleđa zida i ima tendenciju da potisne zid ka unutrašnjosti iskopa. Ovom pomeranju se suprotstavlja smičući otpor klizanja T i pasivni otpor tla iznad nivoa temeljne spojnice E_p . Radi postizanja maksimalnih ekonomskih efekata, potporne konstrukcije se obično dimenzionišu na aktivni pritisak nevezane krupnozrne ispune, ali se, u posebnim slučajevima, dimenzionisanje može provesti i za proizvoljne uslove pomeranja. Horizontalna komponenta aktivnog pritiska ima tendenciju i da prevrne zid oko spoljne ivice temelja, koja se naziva nožicom zida. Ovom prevrtanju se suprotstavlja sopstvena težina zida i vertikalna komponenta aktivnog pritiska. Težina zida ima važnu ulogu iz dva razloga: suprotstavlja se preturanju zida i omogućava pojavu otpora trenja T u nivou temeljne spojnice pa se zbog toga zid i naziva gravitacionim potpornim zidom. U opisanom mehanizmu, radi jednostavnosti, pretpostavljeno da ne dolazi do proloma temeljnog tla, tako da klizanje po temeljnoj spojnici predstavlja kritični mehanizam nestabilnosti.

125. Faktor sigurnosti na klizanje za blok na kosoj ravni.

Na kontaktu bloka težine W i kose ravni, pretpostavljajući najjednostavniji slučaj da ne postoji ni kohezija ni porni pritisak, već samo trenje opisano uglom ϕ maksimalni smičući otpor je $S = N \tan \phi$. Normalna sila je $N = W \cos \alpha$, a sila smicanja je $T = W \sin \alpha$.



Slika 10.4. Blok na kosoj ravni

Faktor sigurnosti je jednostavno:

$$F_s = \frac{S}{T} = \frac{N \tan \phi}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

Ako se, međutim, razmotri opštiji slučaj, kada na kontaktu između bloka i kose ravni deluje porni pritisak u , čija je rezultanta $U = ul$, a smičući otpor sadrži i komponentu kohezije $c'l$, efektivna normalna sila na kontaktu je:

$$N' = N - U = W \cos \alpha - ul$$

a raspoloživi smičući otpor:

$$S = (W \cos \alpha - ul) \tan \phi' + c'l$$

tako da izraz za faktor sigurnosti ima oblik:

$$F_s = \frac{(W \cos \alpha - ul) \tan \phi' + c'l}{W \sin \alpha}$$

ako na blok deluje horizontalna inercijalna sila zemljotresa veličine $k_x W$, sile na kontaktu su:

$$N = W \cos \alpha - k_x W \sin \alpha$$

$$T = W \sin \alpha + k_x W \cos \alpha$$

tako da se za faktor sigurnosti dobija:

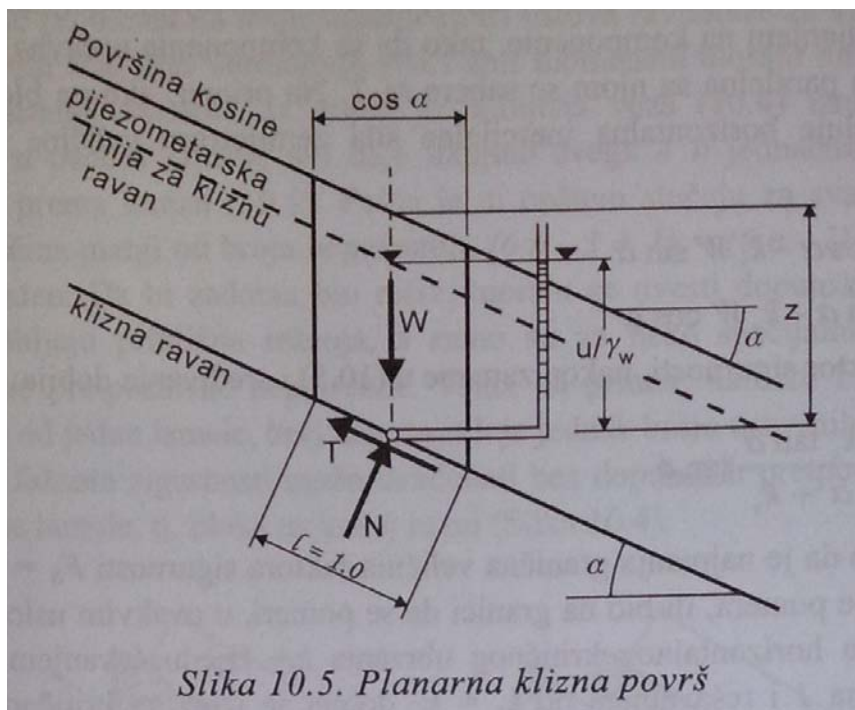
$$F_s = \frac{1 - k_x \tan \alpha}{\tan \alpha + k_x} \tan \phi$$

S obzirom da je najmanja granična veličina faktora sigurnosti $F_s = 1$, pri kojoj bi blok počeo da se pomera, ili bio na granici da se pomeri, u ovakvim uslovima se može odrediti veličina horizontalnog kritičnog ubrzanja ko Izjednačavanjem desne strane gornjeg izraza sa 1 i rešavanjem po $k_x = k_c$ dobija se izraz za kritično horizontalno ubrzanje bloka na kosoj ravni u obliku:

$$k_c = \frac{\tan \phi - \tan \alpha}{1 + \tan \phi \tan \alpha}$$

126. Faktor sigurnosti za dugu kosinu, ravna površina klizanja.

Planarne ili ravne klizne površi, koje su relativno plitke u odnosu na dužinu kliznog tela i paralelne ravnoj nagnutoj površini terena, mogu se tretirati kao klizna tela beskonačne dužine.



Slika 10.5. Planarna klizna površ

Totalna normalna sila u osnovi lamele za jediničnu površinu klizne površi je:

$$N = \sigma_n = W \cos \alpha = \gamma z \cos^2 \alpha$$

Maksimalna raspoloživa sila smičućeg otpora u osnovi lamele jednaka je smičućoj čvrstoći duž klizne površi:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' = c' + (\gamma z \cos^2 \alpha - u) \tan \phi'$$

Smičuća sila u osnovi lamele potrebna da održi lamelu u ravnoteži, koja je jednaka mobilisanoj smičućoj čvrstoći duž klizne površi, je:

$$\tau_m = W \sin \alpha = \gamma z \sin \alpha \cos \alpha$$

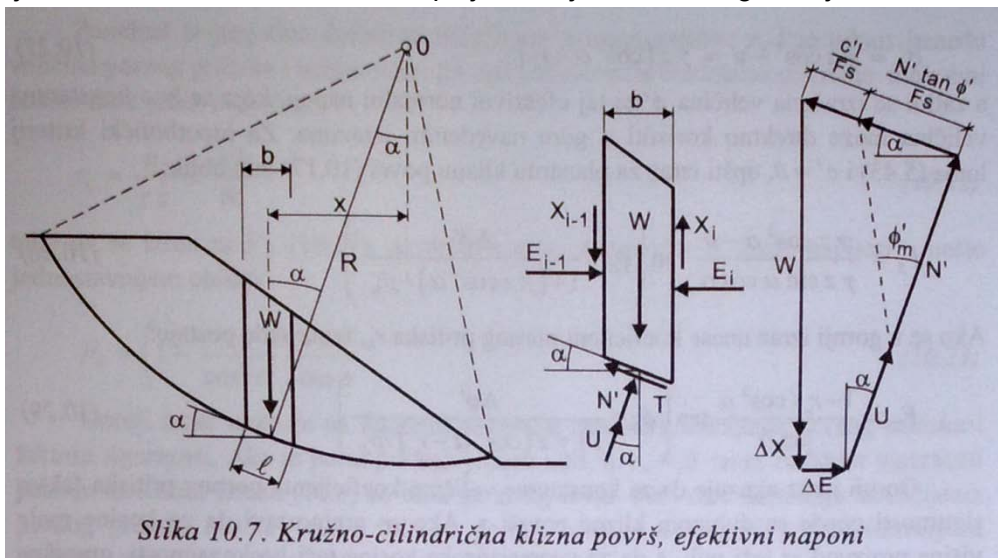
Faktor sigurnosti za beskonačno dugu kosinu:

$$F_s = \frac{c' + (\gamma z \cos^2 \alpha - u) \tan \phi'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha}$$

127. Delimična potopljenost i porni nadpritisci u stabilnosti kosina.

128. Određivanje minimalnog F_s za kružno – cilindrične klizne površi.

Kružno-cilindrične klizne površi kosina sa nehomogenim ili homogenim tlom u razmatranom preseku analiziraju se, u načelu, metodama lamela. Presek kružno-cilindrične klizne površi se vertikalnim presecima izdela na lamele širine b , tako da je dužina osnove lamele l . Pretpostavlja se da su lamele dovoljno uske, tako da se luk osnove lamele zamenjuje tetivom. Za svaku lamelu se spoljni uticaji zamene odgovarajućim silama.



Slika 10.7. Kružno-cilindrična klizna površ, efektivni naponi

Mobilisana smičuća čvrstoća je ukupna raspoloživa smičuća čvrstoća podeljena sa faktorom sigurnosti, odnosno:

$$\tau_m = \frac{\tau_f}{F_s} = \frac{1}{F_s} [c' + (\sigma'_n - u) \tan \phi']$$

Smičuća sila u osnovi lamele je:

$$T = \tau_m l = \frac{1}{F_s} [c' l + (N - ul) \tan \phi']$$

gde je N totalna normalna sila koja deluje na osnovu lamele.

Uslov ravnoteže sume momenata po lamelama za centar kruga O , uz izostavljanje indeksa radi kraćeg pisanja, može se izraziti u obliku:

$$\sum Wx = \sum TR = \frac{R}{F_s} \sum [c' l + (N - ul) \tan \phi']$$

tako da se za faktor sigurnosti dobija:

$$F_s = \frac{R \sum [c' l + (N - ul) \tan \phi']}{\sum Wx}$$

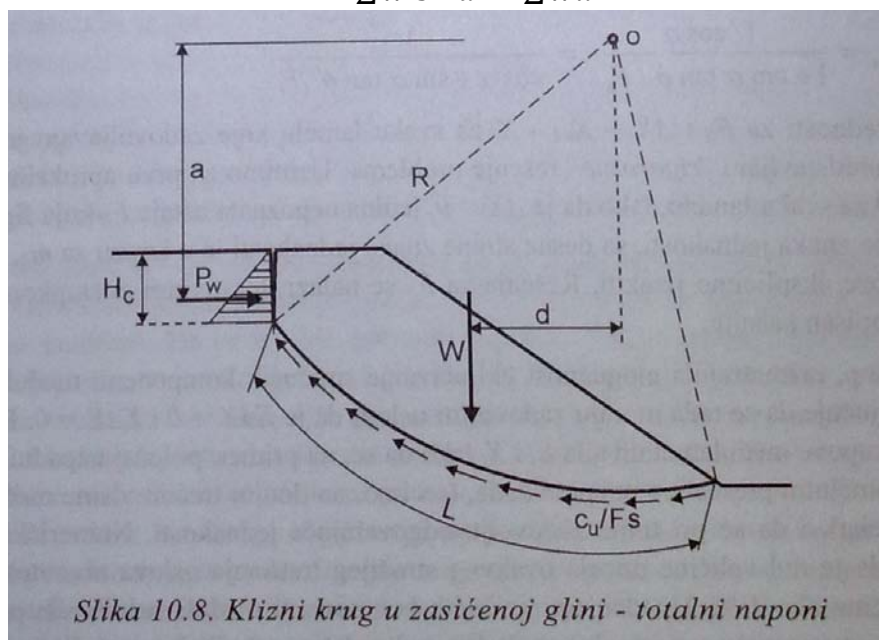
129. $\phi_u=0$ metoda za proračun stabilnosti kosina.

Ako se u izraz:

$$F_s = \frac{R \sum [c' l + (N - ul) \tan \phi']}{\sum W x}$$

umesto c' stavi c_u i umesto ϕ' unese da je $\phi' = \phi_u = 0$ dobija se osnovna jednačina takozvane " $\phi_u=0$ " metode:

$$F_s = \frac{\sum c_u l}{\sum W \sin \alpha} = \frac{R \sum c_u l}{\sum W x}$$



Ukoliko se nedrenirana kohezija u celokupnom preseku može aproksimirati konstantnom vrednošću i uz pretpostavku da se u gornjem delu kosine pojavi vertikalna pukotina i ona napuni vodom, izraz za faktor sigurnosti može se napisati u obliku:

$$F_s = \frac{c_u LR}{Wd + P_w a}$$

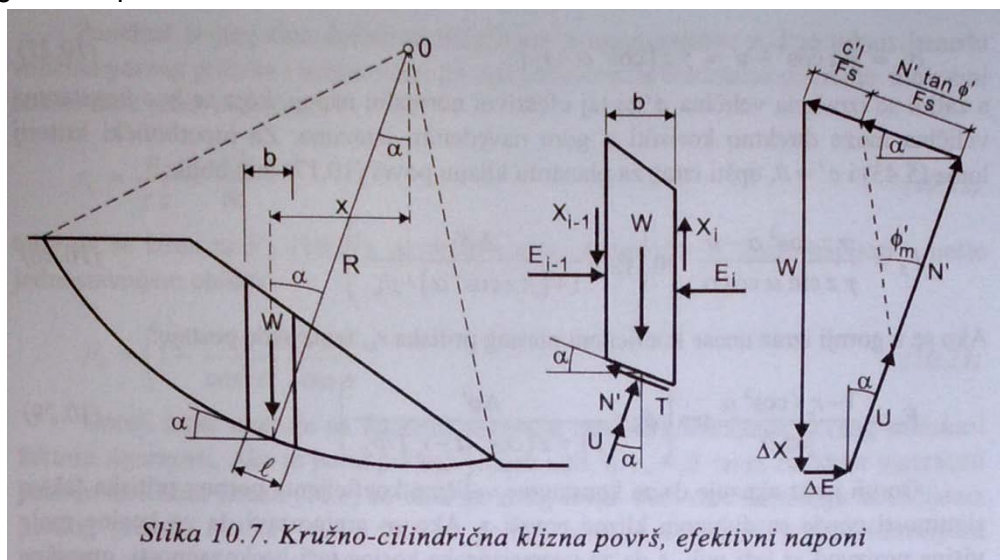
Ovo je jedno od tačnih rešenja jer je rezultat dobijen bez dopunskih pretpostavki o rasporedu unutarnjih sila ili raspodele normalnih napona po kliznoj površi.

130. Metoda Feleniusa za proračun stabilnosti kosina.

U izrazu:

$$F_s = \frac{R \sum [c'l + (N - ul) \tan \phi']}{\sum Wx}$$

figuriše nepoznata veličina totalne normalne sile N u osnovi lamele.



Iz projekcija sila na pravac upravan na kliznu površ dobija se:

$$N = (W + X_{i-1} - X_i) \cos \alpha - (E_{i-1} - E_i) \sin \alpha$$

Uvode se pretpostavke da je:

$$\Delta X = X_{i-1} - X_i = 0$$

$$\Delta E = E_{i-1} - E_i = 0$$

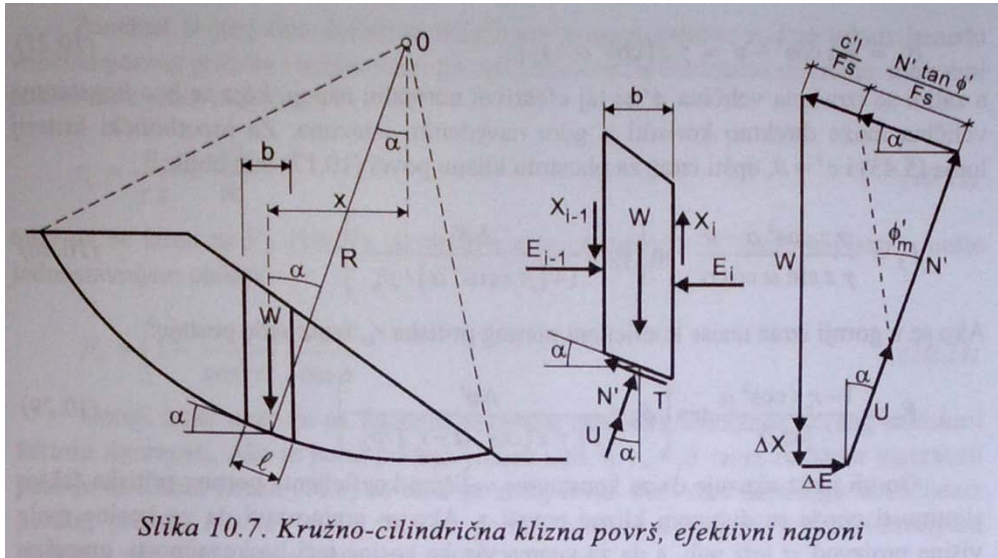
što je ekvivalentno potpunom zanemarivanju međulamelnih sila, tako da je totalna normalna sila u osnovi lamele $N = W \cos \alpha$. Izraz za faktor sigurnosti je:

$$F_s = \frac{\sum [c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha}$$

Navedeni izraz za F_s naziva se *metodom Fellenius-a*.

131. – 133. Metoda Bišopa za proračun stabilnosti kosina.

Ukoliko smičuća čvrstoća zavisi od trenja, korektan raspored veličina i rasporeda međulamelnih sila je od primarne važnosti za određivanje veličina normalnih napona po kliznoj površi od koje zavisi čvrstoća tla u osnovi svake lamele.



Slika 10.7. Kružno-cilindrična klizna površ, efektivni naponi

Projektovanjem sila vertikalno i rešavajući dobijen izraz po N' , dobija se:

$$N' = \frac{W + X_{i-1} - X_i - ul \cos \alpha - c'l \sin \alpha / F_s}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi' / F_s}$$

Izraz za faktor sigurnosti se može napisati kao:

$$F_s = \frac{\sum [c'l + N' \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha}$$

$l = b / \cos \alpha$, Bišopov "rigorozan" izraz:

$$F_s = \frac{\sum [c'b + (W + X_{i-1} - X_i - ub) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \frac{1}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi' / F_s}$$

gde se, radi kraćeg pisanja, koristi oznaka:

$$m_a = \frac{1 / \cos \alpha}{1 + \tan \alpha \tan \phi' / F_s} = \frac{1}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi' / F_s}$$

Rešenje za F_s se nalazi iterativnim postupkom

Bišop, razmatrajući mogućnost uključivanja smičućih komponenti međulamelnih sila, zaključuje da se tada moraju zadovoljiti uslovi da je $\sum \Delta X = 0$ i $\sum \Delta E = 0$. Potrebno je naći skupove međulamelnih sila E_i i X_i tako da se, na primer, položaj napadnih tačaka u međulamelnim presecima unapred zada, (recimo, na donjoj trećini visine međulamelnog preseka), i da se pri tome zadovolje odgovarajuće jednakosti. Uvođenjem smičućih komponenti međulamelnih sila povećava se složenost računskog postupka za jedan red veličine, te Bishop predlaže da se u praktičnoj primeni koristi "rutinski metod" koji podrazumeva zanemarivanje razlika vertikalnih komponenti međulamelnih sila odnosno primenu izraza:

$$F_s = \frac{\sum [c'b + (W - ub) \tan \phi'] m_a}{\sum W \sin \alpha}$$

U opštijem slučaju kada je kosina delimično potopljena i kada na klizno telo deluju linijska opterećenja, jednako podeljeno opterećenje i inercijalne sile zemljotresa, osnovni izraz (10.44) može se napisati u opštijem obliku:

$$F_s = \frac{\sum [c'b + (R_v - u_s b) \tan \phi'] m_a}{\sum (R_v \sin \alpha + M_x)}$$

gde je za svaku lamelu:

$$R_v = W + W' + R_y + pb + k_y(W + W_z)$$

$$M_x = R_x y_r / R + k_x y_z (W + W_z) / R$$

R_x	rezultanta horizontalnih sila,
R_y	rezultanta vertikalnih linijskih sila,
u_s	porni nadpritisak iznad hidrostatskog nivoa delimično potopljene kosine,
p	podeljeno vertikalno opterećenje,
k_y	vertikalni seizmički koeficijent,
k_x	horizontalni seizmički koeficijent,
W	težine dela lamele iznad hidrostatskog nivoa,
W'	težina dela lamele ispod hidrostatskog nivoa u potopljenom stanju,
W_z	težina dela lamele iznad hidrostatskog nivoa u zasićenom stanju,
y_r	krak horizontalnih komponenti spoljnih sila u odnosu na centar kruga,
y_z	krak horizontalnih komponenti inercijalnih sila zemljotresa u odnosu na centar.

134. Statička neodređenost u metodi lamela za proizvoljnu površ.

135. Metode za stabilizovanje kosina.

U toku izvođenja zemljanih radova i kasnije u toku eksploatacije objekta mogu se uočiti pojave nestabilnosti. U svakom od ovih i sličnih slučajeva mora se odgovarajućim merama obezbediti zadovoljavajuća stabilnost.

PROMENA GEOMETRIJE PRESEKA. Racionalna promena geometrije preseka proističe iz koncepta neutralne linije.

- Ublažavanje nagiba kosina.
- Dodavanje balasta u nožici kosine.
- Preraspodela zemljanih masa u preseku kosine.

DRENAŽNE MERE. Ove mere se preduzimaju radi smanjenja ili kontrolisanog kretanja vode na površini kosine i radi smanjenja pornih pritisaka. Zaštita zemljane kosine odgovarajućom vegetacijom se smatra obaveznom merom u našim uslovima.

- Površinsko dreniranje.
- Dreniranje mase tla plitkim drenažnim sistemom, drenažnim rovovima ili kosim bušotinama.
- Dreniranje mase drenažnim merama na relativno velikoj dubini.

POTPORNE KONSTRUKCIJE. Stabilizacioni efekti proističu iz sopstvene težine konstrukcije i/ili težine materijala čiji oblik konstrukcija svojim dimenzijama kontroliše ili u kombinaciji sa aktivnim (prednapregnutim) ili pasivnim čeličnim sidrima.

- Gravitacioni tipovi potpornih konstrukcija.
- Sidrene potporne konstrukcije.

PRIMENA ŠIPOVA. Faktor sigurnosti kosine se može povećati ugrađivanjem šipova kroz nestabilnu masu tla do odgovarajuće dubine ispod klizne površi. Šipovi doprinose stabilnosti klizne mase tla preko momenta savijanja šipa koji je uklješten u stabilnu masu tla ispod kliznog tela. Otpornost šipova se može povećati kosim ankerima na vrhu šipa ukoliko se sidrima na ekonomičan način može postići sidrenje u stabilnoj masi tla.

OBLOŽNE KONSTRUKCIJE se koriste za lokalno stabilizovanje površine kosine i najčešće nemaju značajniji uticaj na globalnu stabilnost većih masa tla. Prskani beton ojačan čeličnom mrežom uz primenu kratkih ankera može se upotrebiti za stabilizovanje kosina u mekim i/ili raspadnutim stenama i u vezanom tlu, radi obezbeđenja od lokalne nestabilnosti. Slični stabilizirajući efekti mogu se postići obložnim zidovima od betona ili kamena u cementaom malteru.

OJAČAVANJE MASE TLA VEŠTAČKIM MATERIJALIMA podrazumeva armiranje tla materijalima kao što su čelik, aluminijum, i različiti polimeri.

- Armiranje tla sintetičkim materijalima (geogrid).
- Pribadanje tla (soil pinning).

TRETIRANJE TLA ima za cilj povećanje čvrstoća tla, pre svega, stvaranjem izvesne stvarne kohezije. Koriste se sledeći postupci:

- Temperaturno (termičko) ojačanje tla.
- Injekciono tretiranje mase tla.

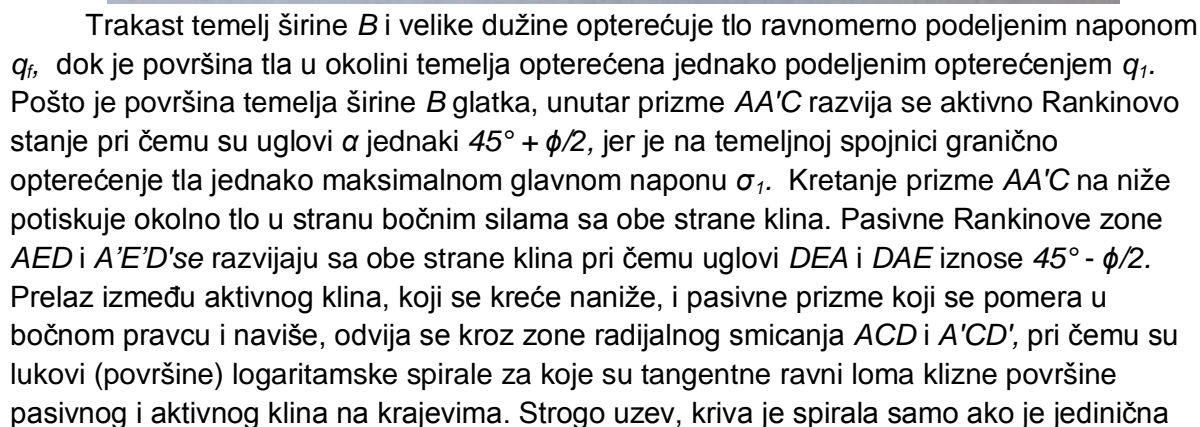
ELEKTRO-OSMOZA se koristi kao tehnički postupak za konsolidaciju i ojačanje mekog glinovitog vodom zasićenog tla.

PASIVNE MERE. Uklanjanje nestabilnog materijala može biti efikasna mera ukoliko su zapremine odnetog nestabilnog materijala relativno male, a odgovarajućim analizama se dokaže da takva intervencija neće destabilizovati preostali deo mase tla.

136. Plitko temeljenje.

Ukoliko tlo u površinskoj zoni može da na adekvatan način primi opterećenja od konstrukcije građevinskog objekta, govori se o plitkom temeljenju. Plitki temelji mogu biti relativno male ploče, ("samci"), u obliku traka, ("trakasti temelji"), ili u obliku ploče, nekad ukružene gredama, ispod celog objekta. Plitki temelji prenose na tlo opterećenje najčešće preko horizontalne temeljne spojnice. Temelj je plitak ukoliko njegova dubina ispod površine terena ne prelazi dimenziju njegove širine, ali se može reći da se i temelji na dubini od dve do tri širine temelja takođe mogu aproksimativno tretirati kao plitki temelji.

Minimalna dubina temelja ispod površine terena uslovljena je dubinom do koje ne dosežu spoljni klimatski uticaji sezonskim promenama vlažnosti kao i dejstva mraza, što mogu biti uzroci pojave promene zapremine sitnozrnog tla do dubine koja u našem podneblju iznosi *0.8-1.0 m*.



težina tla $\gamma = 0$ i $\phi > 0$ koja se degeneriše u kružni luk kada je $\phi = 0$. Stanje plastične ravnoteže postoji iznad površine $EDCD'E'$, pri čemu se ostali, niži deo, ne pomera.

Granično opterećenje trakastog temelja:

$$q_f = c[e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45^\circ + \phi/2) - 1] \cot \phi$$

Za takav mehanizam loma i za tlo bez težine važi analitičko rešenje:

$$q_f = cN_c + q_0N_q$$

gde su N_c i N_q faktori nosivosti:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45^\circ + \phi/2)$$

$$N_c = [N_q - 1] \cot \phi$$

140. Opšti oblik izraza za nosivost plitkog temelja (Hansen).

$$q_f = 0,5\gamma BN_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma + cN_c s_c d_c i_c + \gamma D_f N_q s_q d_q i_q$$

gde su s faktori oblika:

$$s_q = 1 + \frac{B}{L} \sin \phi$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q B}{N_c L} \text{ za } \phi \neq 0 \text{ odnosno } s_c = 1 + 0,2 \frac{B}{L} \text{ za } \phi = 0$$

$$s_\gamma = 1 - 0,4 \frac{B}{L} \geq 0,6$$

i korekcije inklinacije:

$$i_q = (1 - \tan \theta)^m; \quad \tan \theta = \frac{H}{V + A' a \cot \phi}$$

$$i_c = \frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1} \text{ za } \phi \neq 0 \text{ odnosno } i_c = 1 - \frac{mH}{Aa N_c} \text{ za } \phi = 0$$

$$i_\gamma = (1 - \tan \theta)^{m+1}$$

$$m = \frac{2 + B/L}{1 + B/L}$$

d korekcionni koeficijenti dubine temelja:

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - 2 \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B} \text{ za } D_f \leq B$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - 2 \sin \phi)^2 \tan^{-1} \frac{D_f}{B} \text{ za } D_f \geq B$$

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \tan \phi'} \text{ za } \phi \neq 0$$

141. Nosivost trakastog temelja na površini zasićene gline, Prandtl.

142. Nosivost plitkih temelja po pravilniku.

Dozvoljeno opterećenje pravougaonog temelja u osnovi izračunava se po sledećem obrascu:

$$q_a = \frac{V}{A'} = 0,5\gamma B' N_{\gamma} s_{\gamma} i_{\gamma} + (c_m + q_0 \tan \phi_m) N_c s_c d_c i_c + q_0$$

gde je:

V ukupno vertikalno opterećenje temelja,

A' korisna površina temelja, tj. deo ukupne površine osnove temelja koji je rezultantnom silom centrično opterećen: $A' = B' \times L'$,

γ' efektivna zapreminska težina tla ispod nivoa temeljne spojnice tj. zapreminska težina umanjena za veličinu uzgona, ukoliko uzgon postoji,

q_0 najmanje vertikalno opterećenje u nivou temeljne spojnice ili $q_0 = \gamma D_f$

ϕ_m dozvoljeni mobilisani ugao smičuće otpomosti je takav da je:

$$\tan \phi_m = \frac{\tan \phi}{F_{\phi}}$$

gde je

F_{ϕ} , parcijalni faktor sigurnosti za ugao smičuće otpomosti

$F_{\phi} = 1.2$ do 1.8 , (prosečno 1.5),

N_{γ} i N_c su faktori nosivosti koji zavise od mobilisanog ugla ϕ_m ,

c_m je dozvoljena mobilisana kohezija:

$$c_m = \frac{c}{F_c}$$

gde je

c kohezija,

F_c parcijalni faktor sigurnosti za koheziju $F_c = 2$ do 3 , (prosečno 2.5)

Faktori oblika su:

$$s_{\gamma} = 1 - 0,4 \frac{B'}{L'}$$

$$s_c = 1 + 0,2 \frac{B'}{L'}$$

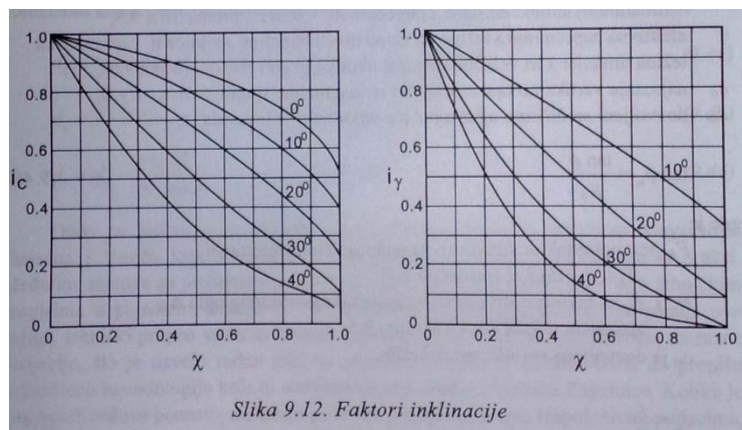
Faktor dubine:

$$d_c = 1 + 0,35 \frac{D_f}{B'} \leq 1,35$$

Faktori nagiba (inklinacije) sile zavise od ugla ϕ_m i od odnosa:

$$\chi = \frac{H}{A' c_m + V \tan \phi_m}$$

gde su H i V horizontalna, odnosno vertikalna komponenta rezultantne sile koja deluje na temeljnu spojnicu.

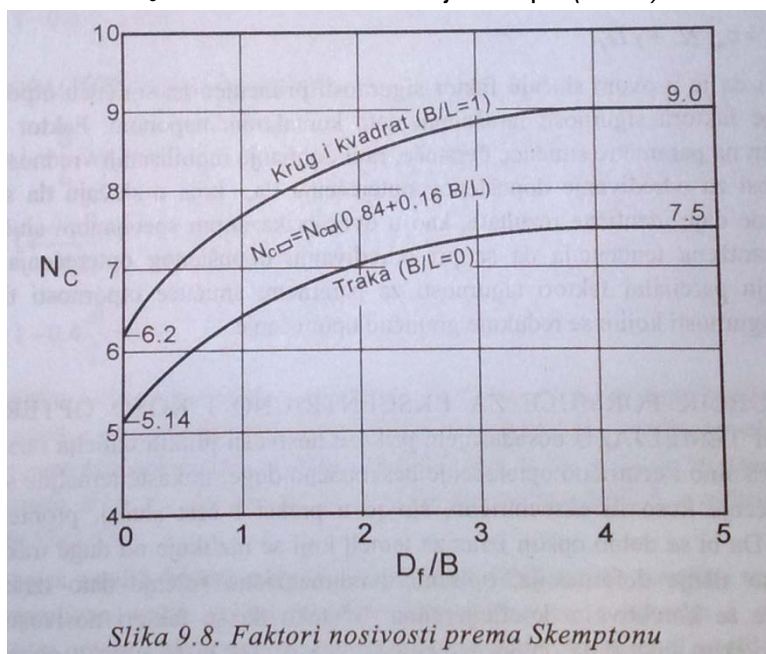


143. Nosivost temelja na zasićenoj glini po Skemptonu.

Granična nosivost temelja na zasićenim glinama u nedreniranim uslovima:

$$q_f = c_u N_c + \gamma D_f$$

gde faktor nosivosti N_c zavisi od oblika temeljne stope ($B < L$) i odnosa D_f/B .



Faktor sigurnosti u odnosu na smičući lom tla, definisan neto graničnim opterećenjem $q_{nf} = q_f - \gamma D_f$, može se izraziti u obliku:

$$F_s = \frac{q_{n,f}}{q_n} = \frac{q_f - \gamma D_f}{q_a - \gamma D_f}$$

Dopušteno opterećenje tla je:

$$q_a = \frac{c_u N_c}{F_s} + \gamma D_f$$

Ako se mobilisana nedrenirana kohezija izrazi kao $c_{um} = c_u / F_s$, dopušteno opterećenje se može napisati i u obliku:

$$q_a = c_{um} N_c + \gamma D_f$$

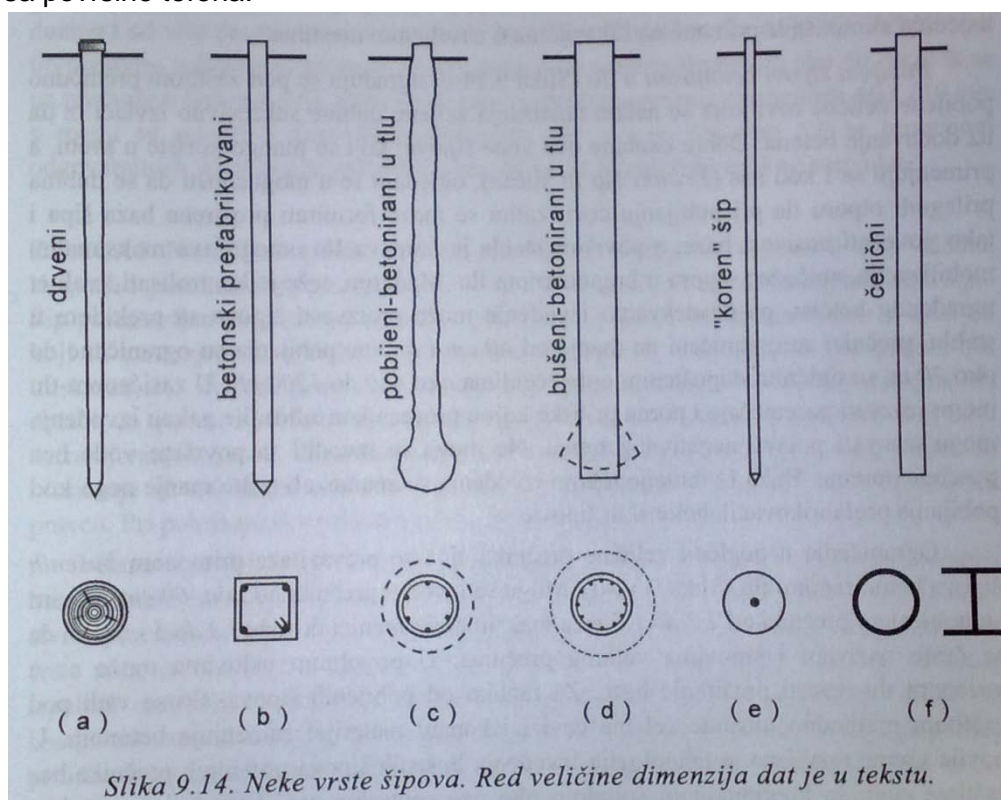
144. Kontaktni naponi u temeljnoj spojnici pri linearnoj raspodeli loma.

145. Kontaktni naponi između krutog temelja i elastičnog poluprostora.

146. Kontaktni naponi u temeljnoj spojnici na zasićenoj glini i na pesku.

147. Vrste šipova prema vrsti materijala i prema načinu ugrađivanja.

Šip je relativno dug i relativno tanak element koji se najčešće ugrađuje u vertikalnom pravcu sa površine terena.



Slika 9.14. Neke vrste šipova. Red veličine dimenzija dat je u tekstu.

VRSTE ŠIPOVA:

- Drveni šipovi.
- Prefabrikovani ili gotovi armirano betonski ili prednapregnuti šipovi.
- Pobijeni šipovi betonirani u tlu.
- Koren šipovi
- Čelični šipovi.

Rezimirajući postupke ugrađivanja, u načelu, šip se u tlo može ugraditi na tri načina: pobijanjem udarima, ugrađivanjem u prethodno izrađenu bušotinu iz koje je iskopavanjem tlo uklonjeno i statičkim utiskivanjem u tlo. Dužina šipa najčešće nije manja od oko šest metara, najčešće dužine su između 10 i 20 metara, a mogu dostići dužinu i od više desetina metara, pa čak i do 100 m. Poprečna dimezija šipova koji se u tlo ugrađuju pobijanjem kreće se od najmanje 8 cm (mikro-šipovi) do oko 60 cm, dok se uz prethodno bušenje u tlo ugrađuju šipovi sa tipičnim prečnicima između 60 i 150 cm, a mogu se postići i dimezije prečnika do oko 3.0 m, izuzetno 5.0 m primenom odgovarajućih tehnologija građenja uklanjanjem tla iz bušotine velikog prečnika.

148. Nosivost šipa u pesku. Nosivost šipa u glini.

U zasićenoj glini, za koju je u nedreniranim uslovima smičuća čvrstoća tla $\tau=c_u$ i $\phi_u=0$ granična nosivost baze šipa je:

$$q_{b,f} = c_u N_c + \gamma D_f N_q = 9c_u + q_0$$

jer je $N_q=1.0$, a faktor nosivosti $N_c=9$, prema Skemptonu. sadži i faktore oblika i faktore dubine.

U peku, kada je $c=0$ i ugao smičuće otpornosti je ϕ' , granična nosivost baze šipa je:

$$q_{b,f} = \gamma D_f N_q^* = q'_0 N_q^*$$

gde N_q^* faktor nosivosti zavisi od ϕ' .

149. Razvoj komponenti nosivosti šipa u funkciji sleganja.

150. Primena rezultata opita statičke penetracije na proračun nosivosti šipa.

Granična nosivost baze šipa može se proceniti primenom rezultata ispitivanja tla statičkim penetrometrom koji, osim otpornosti vrha daje i rezultate merenja bočnog trenja, direktnim preslikavanjem napona sa penetrometra na šip. Statički penetrometar se, pre svega koristi za ispitivanje peskova. Granična nosivost baze šipa je proporcionalna otporu vrha penetrometra:

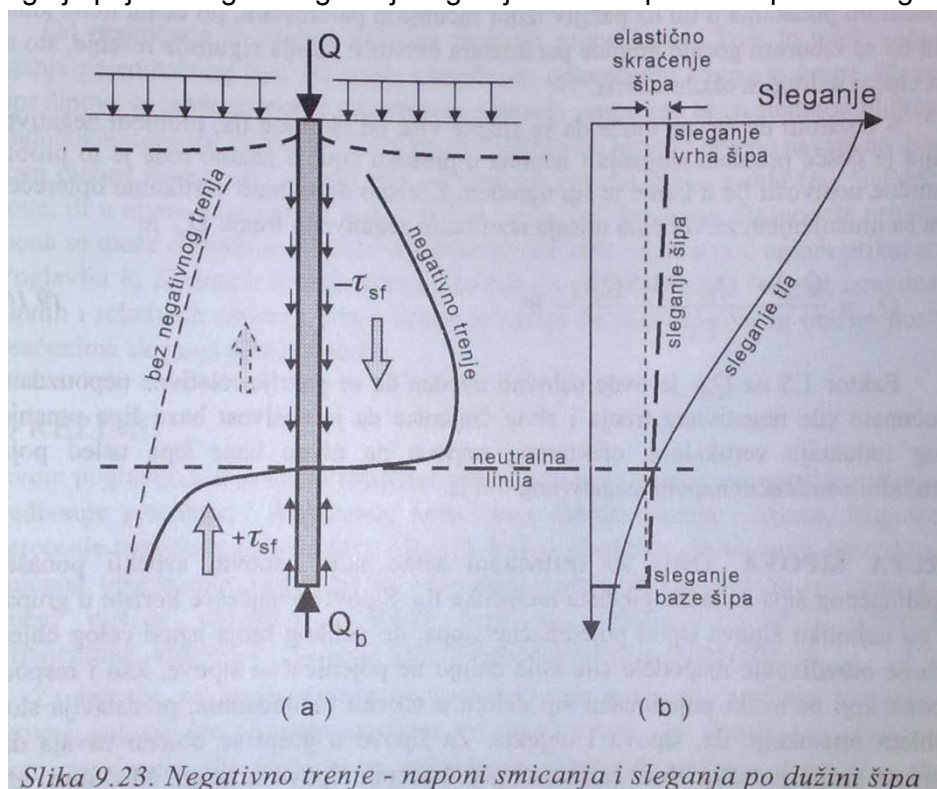
$$q_{b,f} = \alpha_b q_c$$

Koeficijent α_b je korektivni koeficijent koji zavisi od načina ugrađivanja šipa u tlo. Za pobijene ili utisnute šipove može se uzeti da je granična nosivost baze šipa jednaka otporu vrha statičkog penetrometra tako da je $\alpha_b = 1.0$, s obzirom da statički penetrometar predstavlja minijaturni utisnuti šip. Za bušene šipove se orijentaciono može usvojiti da je $\alpha_b \approx 1/2$, a ovaj koeficijent se može korigovati rezultatima probnih opterećenja i lokalnim iskustvima tako da može biti i manji, do $\alpha_b \approx 1/3$.

S obzirom na moguću varijabilnost penetracionog otpora i razlike dimenzija penetrometra i šipa, za računsku veličinu otpora vrha statičkog penetrometra jedna od mogućnosti je da se usvaja srednja vrednost otpora vrha na potezu dužine 4 prečnika šipa, i to 1 (jedan) prečnik ispod baze i 3 (tri) prečnika iznad baze šipa, iako ima i drugačijih predloga.

151. Negativno trenje kod šipova.

Poseban oblik vertikalnog opterećenja šipa može nastati uko- liko se tlo u području šipa sleže u odnosu na šip u procesu konsolidacije. Dovoljna su i sasvim mala sleganja tla da izazovu dopunsko vertikalno opterećenje šipa. Pri tome u gornjem delu šipa, a često i u intervalu koji zahvata veći deo njegove ukupne dužine, smičući naponi po omotaču menjaju znak tako da se povećava opterećenje na bazu šipa, uz pojavu uvećanog sleganja. Ova pojava se naziva "negativnim trenjem" i nastaje, između ostalog, usled razlike krutosti šipa i tla. Zbog toga je pojava negativnog trenja u gornjem delu šipa češće pravilo nego izuzetak.



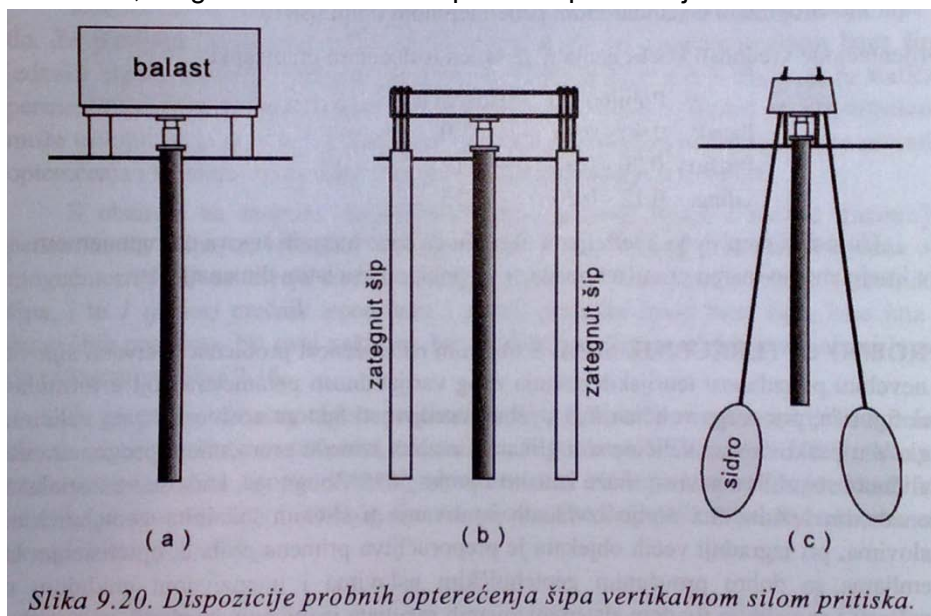
Slika 9.23. Negativno trenje - naponi smicanja i sleganja po dužini šipa

Korisno dopušteno vertikalno opterećenje šipa sa umanjnjem za veličinu uticaja rezultante negativnog trenja Q_{nf} je:

$$Q_a = \frac{Q_{s,f} + Q_{b,f} - 1,5Q_{nf}}{F_s} - W$$

152. Probno opterećenje šipa, metoda hiperboličke ekstrapolacije.

Rade se probna opterećenja pojedinačnog šipa vertikalnom silom pritiska. Ređe se primenjuju probna opterećenja silom zatezanja ukoliko će šipovi biti opterećeni takvom silom ili radi izdvajanja komponente nosivosti omotača stabla od ukupne nosivosti, jer se tako eliminiše komponenta nosivosti baze šipa. Ukoliko će šipovi biti opterećeni i većom horizontalnom silom, mogu se izvesti i takva probna opterećenja.

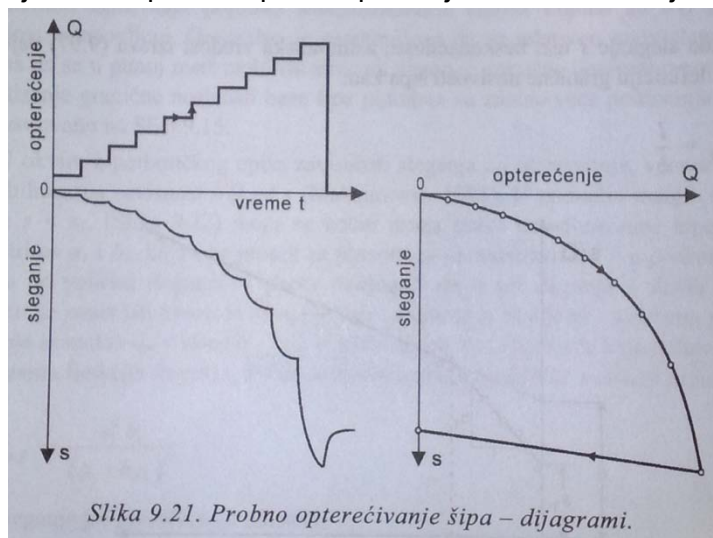


Slika 9.20. Dispozicije probnih opterećenja šipa vertikalnom silom pritiska.

Najjednostavniji, ali ne uvek i najekonomičniji opit podrazumeva balast. Balast mora biti dovoljne težine kako bi se suprotstavio reaktivnom opterećenju hidrauličke prese kojom se opterećuje vrh šipa. Obično se preporučuje da balast bude za **10-20 %** teži od planirane maksimalne sile probnog opterećenja. Oslanjanje balasta treba izvesti što dalje od probnog šipa, kako bi se minimizirao uticaj balasta na šip. Ovo odstojanje ne treba da bude manje od 2 m za šipove uobičajenih dimenzija. Sa teorijske tačke gledišta, ispravnije bi bilo direktno opterećivati šip balastom bez primene hidrauličke prese i oslonaca za balast, jer se time eliminiše uticaj promene reakcija balasta na sleganje, ali je takva dispozicija opita retko kad praktično izvodljiva. Osim primene balasta, reakcije se mogu obezbediti sidrenjem krutog čeličnog nosača za susedne šipove koji će reaktivnim opterećenjem biti opterećeni čupanjem ili sidrenjem privremene naglavnice šipa u slojeve čvršćeg tla ili stene na pristupačnoj dubini.

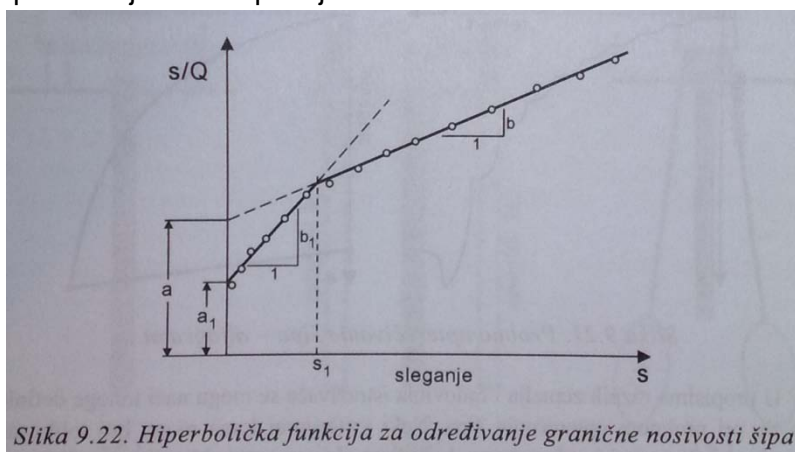
Poželjno je provesti probno opterećenje šipa do loma tla (ili šipa) jer se tako dobija granična nosivost, što omogućuje izbor dopuštenog opterećenja sa racionalnim faktorom sigurnosti.

Probno opterećenje se postepeno povećava, kontinualno ili u stepenastim priraštajima, i pri tome registruje sleganje gornjeg kraja, vrha šipa. Veličinu priraštaja opterećenja treba prilagoditi metodi koja će se upotrebiti pri interpretaciji rezultata merenja.



Slika 9.21. Probno opterećivanje šipa – dijagrami.

Metoda hiperboličke ekstrapolacije. Za aproksimaciju naponsko - deformacione krive koristi se opit triaksijalne kompresije.



Slika 9.22. Hiperbolička funkcija za određivanje granične nosivosti šipa

Za sleganja $s > s_1$, koja su u području većih opterećenja i većih merenih sleganja, opterećenje Q u funkciji sleganja s se aproksimira hiperbolom u obliku:

$$Q = \frac{s}{a + bs}$$

gde su a i b parametri prave transformisane hiperbole koji se mogu odrediti iz merenih veličina sleganja nakon ispisivanja gornjeg izraza u obliku:

$$\frac{s}{Q} = a + bs$$

Kada sleganje s teži beskonačnosti, granična nosivost šipa je:

$$Q_f = \frac{1}{b}$$

Ako se usvoji da je granična sila pri lomu tla veličina opterećenja koja izaziva sleganje od 10 % prečnika šipa B , dobija se da je, sa istim parametrima a i b , granično opterećenje šipa:

$$Q_f = \frac{0,1B}{a + 0,1bB}$$