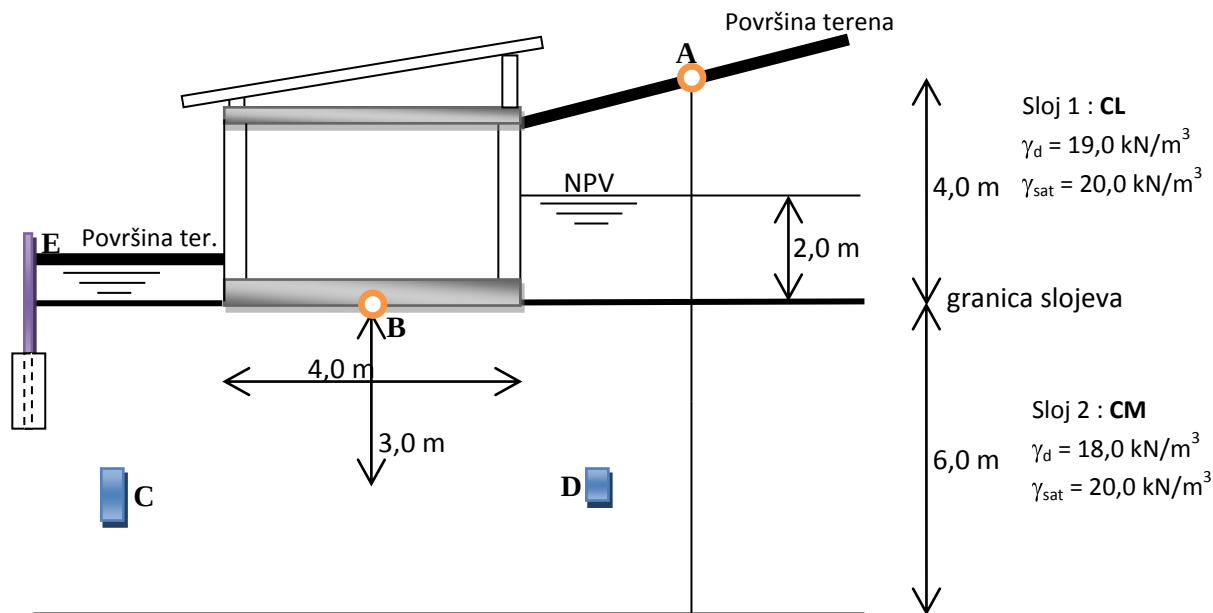


**Zadaci 74 – 77 (Garaža u zasjeku) :** Na slici je prikazan objekat čije su tlocrtne dimenzije 4,0x4,0 metra. Ukupno opterećenje kojim objekat opterećuje tlo na koje je oslonjen iznosi 30,0 kPa (pretpostavljeno je da je to opterećenje ravnomjerno raspodijeljeno). Slojevi tla pored i ispod objekta, kao i nivo podzemne vode su opisani u sklopu crteža.



Slika 2.1 : Šematski prikaz problema

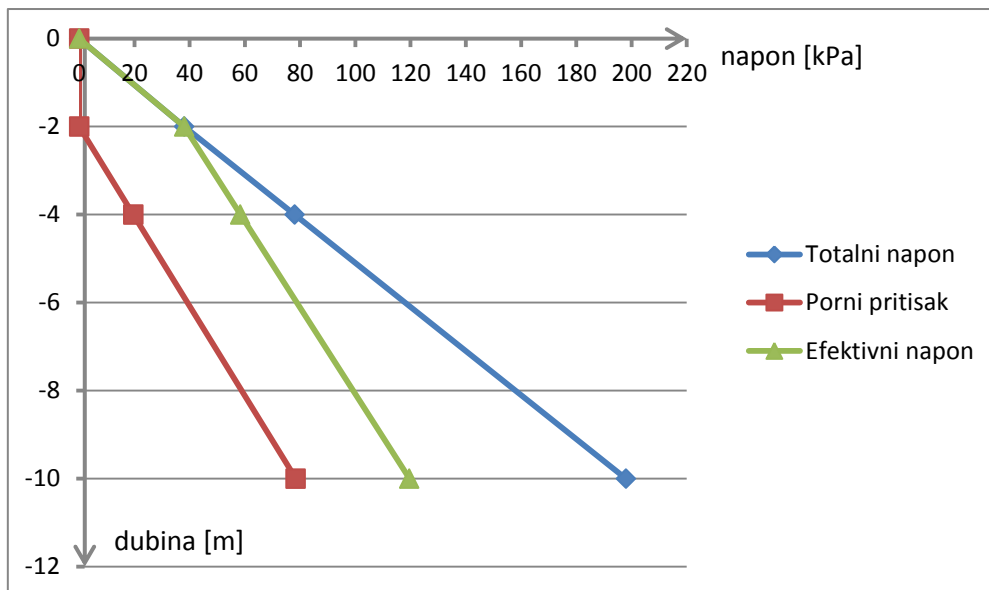
**Zadatak 74 :** Izračunati i nacrtati promjenu totalnog i efektivnog vertikalnog napona od sopstvene težine tla, te pornog pritiska sa dubinom ispod tačke A.

**Rješenje :** Najprije su tabelarno prikazane vrijednosti totalnog, efektivnog napona i pornog pritiska

| Napon<br>Dubina [m] | Totalni napon [ $\sigma$ ]      | Porni pritisak [ $u$ ]   | Efektivni napon [ $\sigma' = \sigma - u$ ] |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|
| 0,0                 | 0,0                             | 0,0                      | 0,0                                        |
| 2,0                 | $2,0 \cdot 19,0 = 38,0$         | 0,0                      | 38,0                                       |
| 4,0                 | $38,0 + 2,0 \cdot 20,0 = 78,0$  | $2,0 \cdot 9,81 = 19,62$ | 58,38                                      |
| 10,0                | $78,0 + 6,0 \cdot 20,0 = 198,0$ | 78,48                    | 119,6                                      |

Tabela 2.1 : Izračunate veličine napona za karakteristične tačke po dubini

Što je grafički prikazano slikom 2.2 :



Slika 2.2 : Slika vertikalnih napona i pornog pritiska

**Zadatak 75 :** Približnom metodom (2:1) izračunati vertikalni napon ispod tačke B (koja je ispod centra objekta) od opterećenja objektom, na dubini od 3 metra. Izračunatu vrijednost porediti sa tim istim naponom određenim pomoću Boussinesq-ovog dijagrama, te komentarisati rezultate.

**Rješenje :** Tlocrtne dimenzije objekta su 4,0x4,0 metra. Približnom metodom data se površina povećava 2:1 sa povećanjem dubine, pa na traženoj dubini od 3,0 metra iznosi :  $(4,0 + 3,0) \times (4,0 + 3,0) = 49,0 \text{ m}^2$ .

Sada se dodatni napon izazvan površinskim opterećenjem od 30,0 kPa na dubini od 3,0 metra može izračunati prema poznatom izrazu približne metode :

$$\Delta\sigma_{z=3,0} = q_0 \frac{A_{z=0}}{A_{z=3,0}} = 30,0 \frac{4,0 \cdot 4,0}{49,0} = 30,0 \frac{16}{49,0} = 9,8 \text{ kPa}$$

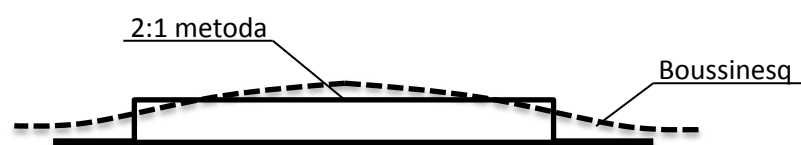
Napon ispod centra kvadratne površine dimenzija 4,0x4,0 određen Boussinesq-ovim dijagramom iznosi :

$$\Delta\sigma_{z=3,0} = q_0 \cdot 0,4 = 30,0 \cdot 0,4 = 12,0 \text{ kPa}$$

Gdje je faktor 0,4, očitao sa Boussinesq-ovog dijagrama za dubinu  $0,75B = 3,0 \text{ m}$ , pri čemu je : B – širina kvadratnog opterećenja i iznosi 4,0 u konkretnom zadatku.

**Napomena :** Princip očitavanja sa dijagrama objašnjen je zadacima ranije.

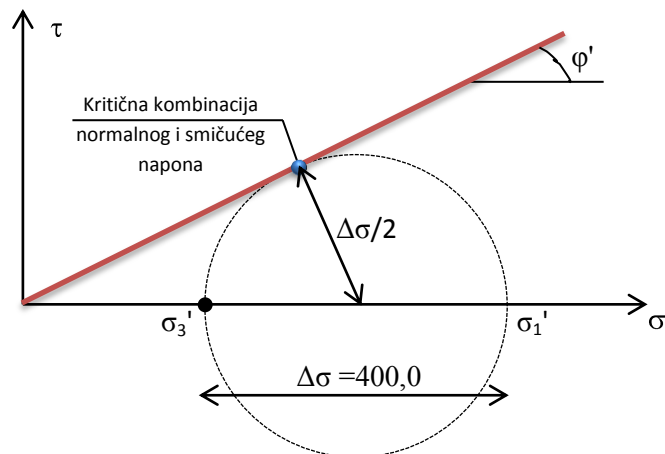
**Komentar rezultata :** Boussinesq-ova metoda omogućava proračun napona od dodatnog opterećenja koji nisu konstantni za jednu dubinu. Oni su veći ispod centra opterećene površine i opadaju ka rubovima. Na drugoj strani naponi izračunati približnom metodom jednaki su za svaku tačku na jednoj dubini ispod opterećene površine.



Slika 2.3 : Razlika između Boussinesq-ove i približne (2:1) metode proračuna napona od površinskog opterećenja

**Zadatak 76 :** Uzorak tla izvađen sa lokacije C, ispitani je triaksijalnim aparatom u konsolidiranim dreniranim uslovima. Prethodno je, edometarskim testom i testovima za klasifikaciju tla na uozrcima iz istog sloja (lokacija D), utvrđeno da se radi o uzorku normalno konsolidirane prahovite gline. Uzorak je najprije opterećen čelijskim pritiskom od 200 kPa. Devijatorski napon pri slomu je iznosio 400 kPa. Odrediti parametre čvrstoće na smicanje, i skicirati Mohr-Colomb-ovu anvelopu sloma u  $\sigma'$ - $\tau$  koordinatnom sistemu.

**Rješenje :** Kako se radi o uzorku normalno konsolidovanog tla, može se zaključiti da je  $c = 0,0$  kPa, ostaje samo da se odredi ugao unutrašnjeg trenja, čime se može sedinirati i Mohr-Colomb-ov pravac u  $\sigma'$ - $\tau$  koordinatnom sistemu.



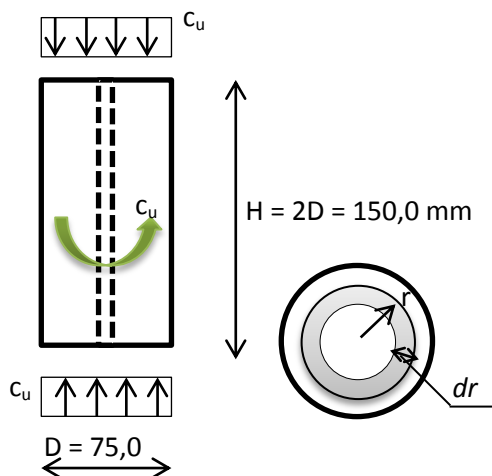
Slika 2.4 : Mohr-ov krug napona u trenutku sloma

$$\sin \varphi' = \frac{\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}}{\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} = \frac{600 - 200}{600 + 200} = \frac{400,0}{800,0} = \frac{1}{2} = 0,50$$

$$\varphi' = 30,0^\circ$$

Pa je Mohr-Coulomb-ov pravac definisan sa :  $\tau_f = \sigma' \cdot \tan \varphi = 0,5 \cdot \sigma'$

**Zadatak 77 :** U tački E sa površine terena izvršeno je ispitivanje tla krilnom sondom (*eng. vane shear test*) na dubini od oko 2,0 metra. Odrediti nedreniranu koheziju ispitnog materijala, ako je momenat torzije koji je izazvao slom iznosio  $T = 67,5$  Nm, a dimenzije krilne sonde i pretpostavljena raspodjela smičućeg napona na bazama sonde su prikazani slikom.



**Napomena :** Površina plašta pomnožena sa poluprečnikom sonde i nedrenirane kohezije predstavlja otpor plašta, dok se otpor baza računa integracijom sa uočavanjem elementarnog prstena debljine  $dr$ , sa položajem  $r$  u odnosu na centar krilne sonde (u odnosu na koji se računa momenat torzije) posmatrano u osnovi (Slika 2.5)

Slika 2.5 : Krilna sonda i princip integracije napona po bazama

**Rješenje :** Iz uslova ravnoteže da aplicirani momenat torzije (T) mora biti jednak otporu koje pruža tlo sa strana (plašt) i po bazama (gornja i donja), dobije se izraz za nedreniranu koheziju :

$$\text{Otpor baza} = 2 \cdot c_u \int_0^{D/2} 2\pi \cdot r dr \cdot r = 2c_u \left[ 2\pi \frac{r^3}{3} \right]_0^{D/2} = c_u \frac{\pi D^3}{6}$$

$$\text{Otpor plašta} = c_u \cdot \pi D H \cdot \frac{D}{2} = c_u \cdot \frac{\pi D^2 H}{2}$$

$$\text{Pa je uslov ravnoteže : } T = c_u \cdot \frac{\pi D^2 H}{2} \left( 1 + \frac{D}{3H} \right)$$

Odnosno kako je u pravilu odnos prečnika i visine krilne sonde :  $H = 2D$ , može se skraćeno napisati :

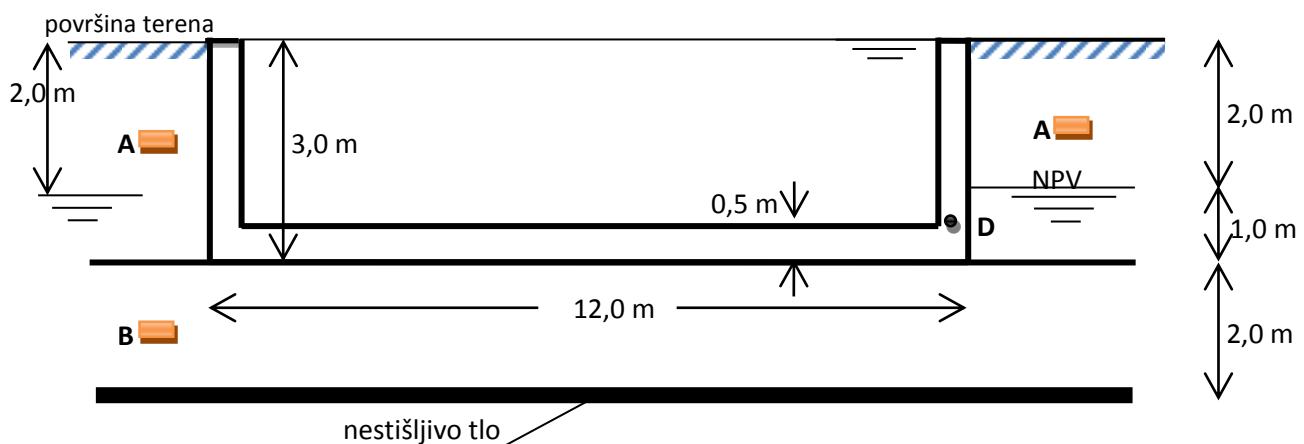
$$c_u = 0,273 \frac{T}{D^3}$$

Pa je za konkretan zadatak :

$$c_u = 0,273 \frac{67,5}{0,075^3} = 43680 \frac{N}{m^2} = 43,68 \frac{kN}{m^2}$$

Korisno je još primijetiti da ovaj izraz za nedreniranu čvrstoću vrijedi samo ako je nedrenirana čvrstoća izotropna, tj. jednaka po vertikalnim i po horizontalnim ravnima.

**Zadaci 78 – 84 (Konstrukcija bazena) :** Na slici je prikazan presjek kroz bazen. Svi potrebni podaci navedeni su tekstem ispod slike



Slika 2.6 : Šema konstrukcije bazena i profil tla sa naznakom lokacija ispitanih uzoraka

Profil tla je opisan sa tri karakteristična sloja :

- Sloj (A)** - od površine do dubine od -3,0 metra; (CL) :CD triaksijalni test :  $c = 2,0 \text{ kPa}$ ;  $\varphi = 23^\circ$  ;  
Edometarski test :  $M_s = 3,0 \text{ MPa}$ ; te  $\gamma_d = \gamma_{sat} = 20,0 \text{ kN/m}^3$
- Sloj (B)** - od -3,0 do -5,0 metara; (CL-CM) : test direktnog smicanja =>  $c = 8 \text{ kPa}$ ;  $\varphi = 27^\circ$ ;  
Edometar :  $M_s = 20,0 \text{ MPa}$  ,  $OCR = 1,5$ , te  $\gamma_{sat} = 20,0 \text{ kN/m}^3$   
- Test sa opadajućim nivoom :  $k_x = k_y = 10^{-3} \text{ cm/sec}$
- Sloj (C)** - na dubini ispod 5,0 metara; "nestišljivo" tlo sa SPT brojem udaraca preko 120

Bazen : Tlocrtne dimenzije 12,0x12,0 m, sa ukupnim ravnomjernim opterećenjem na tlo od 40,0 kPa.  
Zidovi bazena su idealno glatki (koristiti Rankine-ovu teoriju kod proračuna horizontalnih napona)

Iskop za bazen (3,0 m) se vrši u nagibu škarpe od 2:1, bez zaštitne konstrukcije.

**Zadatak 78 :** Za jedan od uzoraka sa lokacije B (glinoviti materijal) trebalo je odrediti indeks plastičnosti. Casagrande-ovim aparatom je dobivena vlažnost od 40%, mjerenjem zapremine uzorka sa sušenjem, vlažnost od 15%, a valjanjem valjčića na staklenoj podlozi vlažnost od 20%. Vlažnost koja odgovara potpunoj saturaciji uzorka iznosi 33%. Koja je vrijednost traženog indeksa?

Indeks Plastičnosti predstavlja razliku između vlažnosti na granici tečenja i vlažnosti na granici plastičnosti. Fizičko značenje indeksa plastičnosti je vlažnost koju treba dodati tlu da pređe iz plastičnog u žitko stanje. Slikovito se može prikazati kao vlažnost potrebna da se plastelin pretvori u viskoznu tekućinu.

Granica tečenja se određuje Casagrande-ovim aparatom (kao i testom sa padajućim konusom), dok se granica plastičnosti određuje valjanjem valjčića na staklenoj podlozi, pa je :

Rješenje :  $I_p = W_L - W_p = 40,0\% - 20,0 = 20,0 \%$

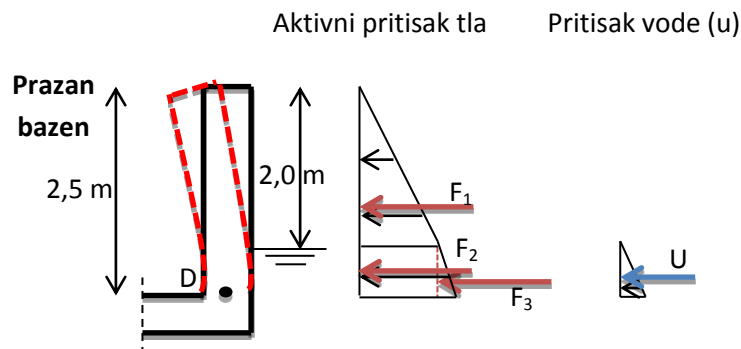
**Zadatak 79:** Izračunati moment savijanja u presjeku "D" (označeno kao tačka).

*Napomena :* Bazen smatrati praznim

Za slučaj praznog bazena zid istog se kreće od tla, pa se pretpostavlja da na zid djeluje aktivni pritisak:

$$\sigma_{h,a} = K_a \cdot \sigma'_v - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a}$$

$$\begin{aligned} c &= 2,0 \text{ kPa;} \\ \varphi &= 23^\circ; \\ \gamma_d &= \gamma_{\text{sat}} = 20,0 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$



Slika 2.7 : Mogući mehanizam deformisanja i dijagram horizontalnih pritisaka

$$\sigma'_{v,z=2,0} = \gamma_d \cdot 2,0 = 20,0 \cdot 2,0 = 40,0 \text{ kPa};$$

$$\sigma'_{v,z=2,5} = 40,0 + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \cdot 0,5 = 40,0 + (20,0 - 10,0) \cdot 0,5 = 40,0 + 5 = 45,0 \text{ kPa}$$

$$u_{z=2,5} = 0,5 \cdot \gamma_w = 0,5 \cdot 10 = 5,0 \text{ kPa}$$

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) = \tan^2 \left( 45 - \frac{23}{2} \right) = 0,438$$

*Napomena :* Često se u praksi kohezija površinskih slojeva ne smatra kao ona stalnog karaktera, tako postoje pristupi da se ona zanemari u proračunu ili da se uzme u obzir pri proračunu horizontalnog napona na dnu ali da se pretpostavi da je horizontalni aktivni pritisak jednak nuli na površini, a ne negativnoj vrijednosti, tj. da se isključi mogućnost zatezanja u tlu, kao nerealna pojava. Ovaj drugi slučaj će se primijeniti u ovom zadatku.

$$\sigma_{h,z=0,0} = 0,438 \cdot 0,0 - 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{0,438} = 0 - 0,768 = -0,768 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h,z=2,0} = 0,438 \cdot 40,0 - 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{0,438} = 17,52 - 4 \cdot 0,192 = 16,75 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h,z=2,5} = 0,438 \cdot 45,0 - 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{0,438} = 19,71 - 4 \cdot 0,192 = 18,94 \text{ kPa}$$

Da bi se izračunao momenat oko tačke D, opterećenje tla i vode na zid bazena ćemo zamijeniti rezultantama koje djeluju u težištima trokutova i pravougaonika prema slici :

$$F_1 = \frac{16,75 \cdot 2,0}{2,0} = 16,75 \text{ kN / m'} ; z_1 = 0,5 + 0,333 \cdot 2,0 = 1,166 \text{ m}$$

$$F_2 = 16,75 \cdot 0,5 = 8,375 \text{ kN / m'} ; z_2 = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25 \text{ m}$$

$$F_3 = \frac{(18,94 - 16,75) \cdot 0,5}{2,0} = 0,5475 \text{ kN / m'} ; z_3 = 0,333 \cdot 0,5 = 0,167$$

$$U = \frac{5,0 \cdot 0,5}{2,0} = 1,25 \text{ kN / m'} ; z_4 = 0,167$$

Gdje je  $z_i$  – krak sile u odnosu na tačku D oko koje se računa momenat (M)

$$M_D = F_1 \cdot z_1 + F_2 \cdot z_2 + F_3 \cdot z_3 + U \cdot z_4 = 16,75 \cdot 1,166 + 8,375 \cdot 0,25 + 0,5475 \cdot 0,167 + 1,25 \cdot 0,167$$

$$M_D = 21,92 \text{ kNm / m'}$$

**Zadatak 80:** Izračunati i nacrtati dijagram horizontalnih pritisaka na zid bazena u slučaju da je bazen ispunjen vodom.

U slučaju kada je bazen ispunjen vodom, nije za očekivati da će se isti deformisati od tla, pa valja analizirati slučaj kada na zid djeluje horizontalni pritisak u stanju mirovanja. Na ovaj način zaključuje se, da je mjerodavni pritisak koji djeluje na bazen upravo ovaj u stanju mirovanja, kada se radi konkretan praktični problem, obzirom da je pritisak u stanju mirovanja veći od aktivnog pritiska ( $K_0 > K_a$ ). Inače, potreban pomak za aktiviranje ukupnog aktivnog pritiska iznosi oko 0,02H do 0,05H za meka kohezivna tla, gdje je H visina zida izložena aktivnom pritisku tla, u konkretnom slučaju 2,5 metara (Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 1997).

$$\sigma'_{v,z=2,0} = \gamma_d \cdot 2,0 = 20,0 \cdot 2,0 = 40,0 \text{ kPa};$$

$$\sigma'_{v,z=2,5} = 40,0 + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \cdot 0,5 = 40,0 + (20,0 - 10,0) \cdot 0,5 = 40,0 + 5 = 45,0 \text{ kPa}$$

$$u_{z=2,5} = 0,5 \cdot \gamma_w = 0,5 \cdot 10 = 5,0 \text{ kPa}$$

Za proračun koeficijenta horizontalnog pritiska u stanju mirovanja primijenit će se Jaky-ev izraz prema kojem je :

$$K_0 = 1 - \sin \varphi = 1 - \sin 23 = 0,609$$

što vrijedi za normalno konsolidovana tla, a nerijetko se primjenjuje i za prekonsolidovana.

Obzirom da se izraz za ovaj koeficijent za prekonsolidovano tlo :  $K_{0,\text{prekonsolidirano}} = (1 - \sin \varphi) \cdot \text{OCR}^{\sin \varphi}$  (Mayne & Kulhawy, 1982), nije mogao primijeniti kako nije zadata vrijednost odnosa prethodne konsolidacije (OCR).

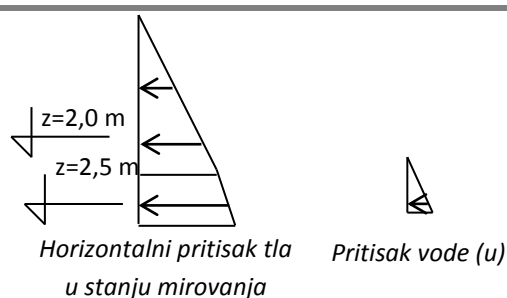
$$\sigma_{h,0} = K_0 \cdot \sigma'_v$$

$$\sigma_{h,z=0,0} = 0,609 \cdot 0,0 = 0,0 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h,z=2,0} = 0,609 \cdot 40,0 = 24,63 \text{ kPa}$$

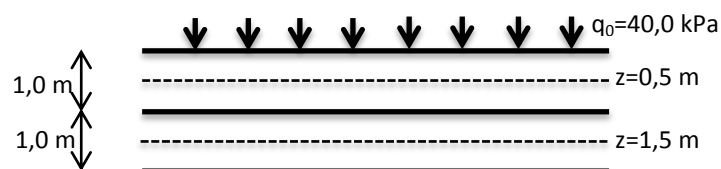
$$\sigma_{h,z=2,5} = 0,609 \cdot 45,0 = 27,41 \text{ kPa}$$

$$u_{z=2,5} = 0,5 \cdot \gamma_w = 0,5 \cdot 10 = 5,0 \text{ kPa}$$



**Zadatak 81 :** Izračunati slijeganje bazena (pomoću konstantnog modula stišljivosti), koji opterećuje tlo ravnomjerno raspodijeljenim opterećenjem od 40,0 kPa, uz dijeljenje stišljivog sloja na dva dijela visine 1,0 m. Dopunske napone izračunati približnom metodom.

**Rješenje :** Iako su naponi ispod temeljne ploče bazena neravnomjerni, konkretno, za uobičajne dimenzije ploče i zida bazena, naponi na rubu su 2 do 3 puta veći od napona u srednjoj zoni ispod ploče, u ovom zadatku je pretpostavljena ravnomjerna raspodjela kontaktnih napona od 40,0 kPa. Na drugoj strani nije traženo da su uzme u obzir izdizanje usljed iskopa za bazen. Zapravo, traži se proračun slijeganja preko zadatog modula stišljivosti ( $M_s$ ).



Slika 2.8 : Položaj nivoa za proračun slijeganje mjerodavnih napona

Dodatni naponi u sredini prvog i drugog sloja :

$$\Delta\sigma_{z=0,5m} = 40 \frac{12,0 \cdot 12,0}{(12,0 + 0,5) \cdot (12,0 + 0,5)} = 36,86 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma_{z=1,5m} = 40 \frac{12,0 \cdot 12,0}{(12,0 + 1,5) \cdot (12,0 + 1,5)} = 31,60 \text{ kPa}$$

Pa se ukupno slijeganje stišljivog sloja može izračunati kao suma slijeganja dva sloja debljine 1,0 metar :

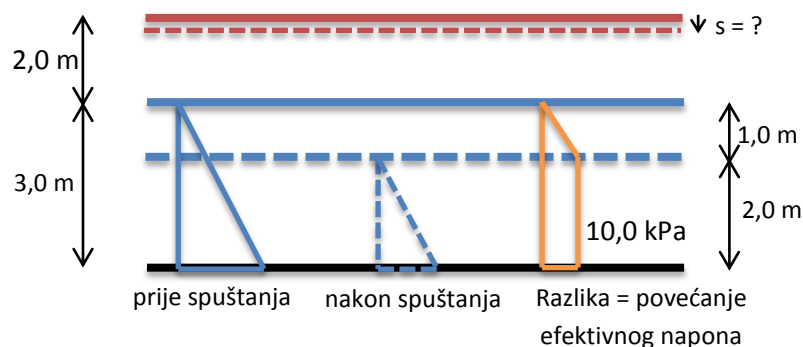
$$s = \frac{\Delta\sigma_{z=0,5m}}{M_s} \cdot 1,0m + \frac{\Delta\sigma_{z=1,5m}}{M_s} \cdot 1,0m = \frac{36,86}{20000} \cdot 1,0m + \frac{31,6}{20000} \cdot 1,0m$$

$$s = 0,00184 + 0,00158 = 0,00342m$$

Rješenje : **s = 0,342 cm**

**Zadatak 82 :** Izračunati slijeganje površine terena usljed sniženja nivoa vode sa -2,0 m na -3,0 m. Korisiti proračun sa konstantnim modulom stišljivosti.

Snižavanje nivoa vode uzrokuje povećanje efektivnog napona a svako povećanje efektivnog napona ima za posljedicu pojave slijeganja.



Slika 2.9 : Dijagram napona prije i nakon spuštavanja nivoa vode

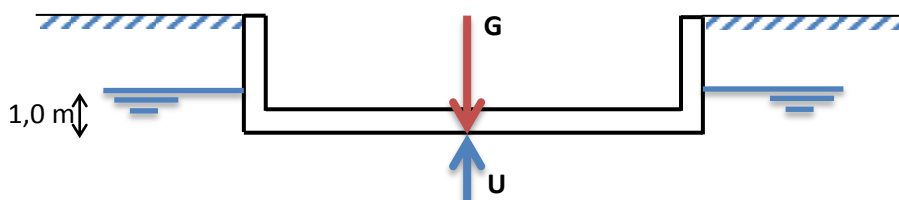
Slijeganje sloja debljine 3,0 metra ćemo izračunati kao sumu slijeganja sloja debljine 1,0 m (gornji dio) i sloja debljine 2,0 m (donji dio), pomoću edometarskog modula :

$$s = \frac{\Delta\sigma_{z=2,5m}}{M_s} \cdot 1,0m + \frac{\Delta\sigma_{z=4,0m}}{M_s} \cdot 1,0m = \frac{5,0}{3000} \cdot 1,0m + \frac{10,0}{20000} \cdot 2,0m = 0,00167 + 0,001 = 0,00267m$$

Rješenje : **s = 0,267 cm**

**Zadatak 83 :** Izračunati faktor sigurnosti protiv uzgona, ako kontaktni napon od sopstvene težine bazena iznosi  $15,0 \text{ kN/m}^2$ . Sloj "C" je vodonepropustan.

Kritična faza, kada može doći do uzgona jeste ona kada je prazan bazen tj. kada je sila koja se suprotstavlja uzgonu minimalna i jednaka težini bazena.



Slika 2.10 : Sile koje izazivaju (U) i koje se suprotstavljaju (G) uzgonu

$$G = 15,0 \cdot 12,0 \cdot 12,0 = 2160 \text{ kN}$$

$$U = \gamma_w \cdot 1,0 \cdot 12,0 \cdot 12,0 = 1440 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{G}{U} = \frac{2160}{1440} = 1,5$$

**Zadatak 84 :** Pregledom projektne dokumentacije konstrukcije bazena, utvrđeno je da nedostaje proračun dopuštenih napona u tlu prema kriteriju sloma tla ispod temeljne konstrukcije. Iako znaš da taj kriterij nije mjerodavan (temeljenje na ploči, koja je još i ukopana), izračunaj vrijednost dopuštenih napona ako je Brinch-Hansen-ov izraz za graničnu nosivost :

$$p = c \cdot N_c + q \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

$$\text{Za: } \varphi = 27^\circ \Rightarrow N_c = 23,942$$

$$N_q = 13,199$$

$$N_\gamma = 9,463$$

Koristiti faktor sigurnosti 2,0.

*Napomena* : zanemariti nestišljivi sloj, tj. smatrati da je bazen oslonjem samo na sloj B (koji se prostire do velike dubine), čime smo na strani sigurnosti.

$c = 8,0 \text{ kPa}$  – kohezija

$q = 20,0 \cdot 2,0 + 10,0 \cdot 1,0 = 50,0 \text{ kPa}$  – vertikalni efektivni napon u nivou dna temelja

$\gamma = \gamma'$  – efektivna zapreminska težina, jer je cijeli sloj ispod temelja pod vodom

$B = 12,0 \text{ m}$  – širina temelja

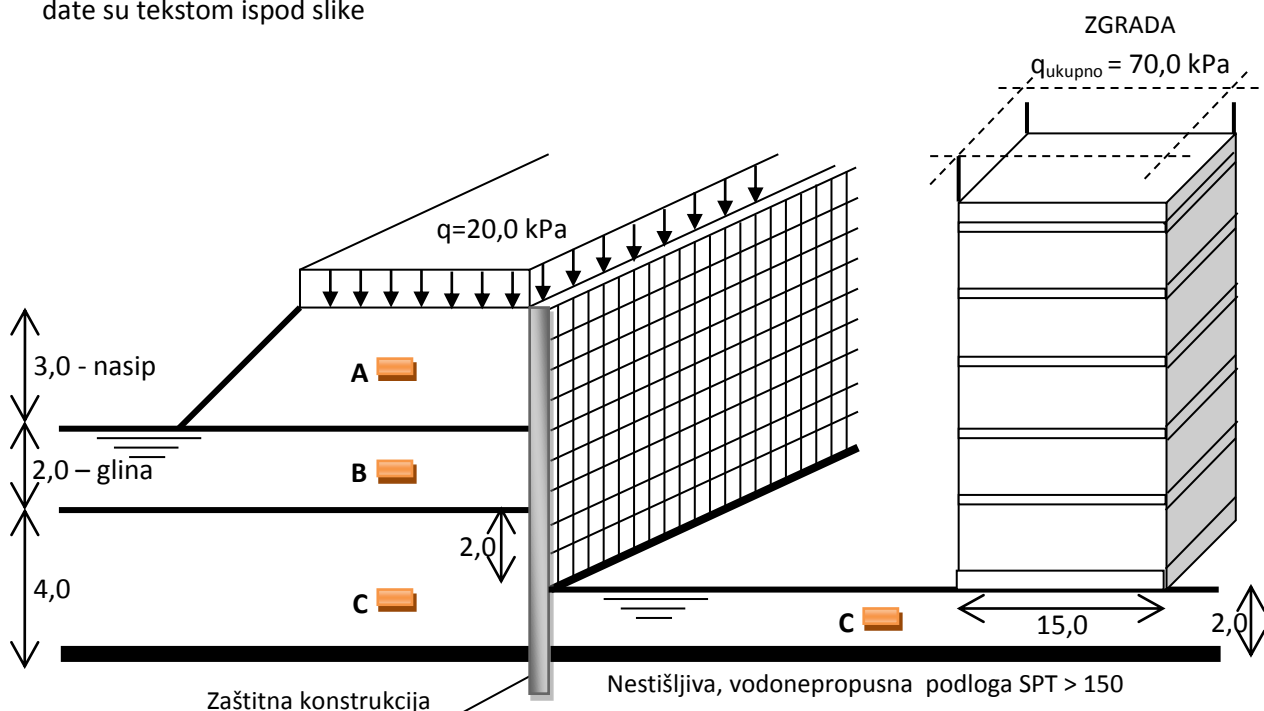
Sada se može izračunati granična nosivost prema datom izrazu :

$$p = 8,0 \cdot 23,942 + 50,0 \cdot 13,199 + \frac{1}{2} \cdot 10,0 \cdot 12,0 \cdot 9,463 = 191,536 + 659,95 + 567,78 = 1419,27 \text{ kPa}$$

Dopuštena nosivost po kriteriju sloma tla ispod temelja iznosi :

$$\sigma_{dop} = \frac{p}{FS} = \frac{1419,27}{2,0} = 709,64 >> 40 \text{ kPa} \text{ – prosječni kontaktni napon}$$

**Zadatak 85-91 (Zaštita nasipa saobraćajnice):** Na slici je prikazana zaštitna konstrukcija koja osigurava cestovni nasip i omogućava nesmetano izvođenje stambene zgrade. Geometrija konstrukcija i terena je definisana slikom, zajedno sa getehničkim parametrima. Posebne napomene date su tekstem ispod slike



Slika 2.11 : Prikaz problema zadataka : 41 - 47

Nasip (A) - Nasip (GW) :  $c = 0,0$ ;  $\phi = 38^\circ$ ;  $M_s = 80,0 \text{ MPa}$ ;  $\gamma = 20,0 \text{ kN/m}^3$

Uzorak (B) - Podloga (CL) : CU triaksijalni test  $\Rightarrow c = 10 \text{ kPa}$ ;  $\phi = 24^\circ$ ; edometar  $\Rightarrow M_s = 8,0 \text{ MPa}$ ;

OCR = 1,5;  $C_c = 0,1$ ;  $C_r = (1/6)C_{cr}$ , te  $\gamma_{sat} = 20,0 \text{ kN/m}^3$

- Test sa opadajućim nivoom :  $k_x = k_y = 10^{-5} \text{ cm/sec}$

- $c_v = 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  – metoda drugog korjena iz vremena
- Dubina (C) - GW-GM : iz SPT rezultata :  $\phi = 32^\circ$ ;  $c = 0,0 \text{ kPa}$ ; edometarski test  $\Rightarrow M_s = 20,0 \text{ MPa}$
- Test sa konstantnim nivoom :  $k_x = k_y = 0,1 \text{ cm/sec}$ , te  $\gamma_{\text{sat}} = 20,0 \text{ kN/m}^3$

Napomene :

- Kontrola ostvarene zbijenosti nasipa (zbijanje u slojevima od 30,0 cm) se vrši nuklearnim denzitometrom.
- Zgrada : Tlocrtne dimenzije 15,0x15,0 m, sa ukupnim opterećenjem na tlo od 70,0 kPa.
- Zaštitna konstrukcija je idealno glatka (koristiti Rankine-ovu teoriju kod proračuna horizontalnih napona)

**Zadatak 85 :** Za jedan od uzoraka sa lokacije B (CL materijal) trebalo je odrediti početni koeficijent pora da bi se došlo do dijagrama  $e\text{-log}\sigma'$ , koji će se, između ostalog, iskoristiti za crtanje  $e\text{-log}\sigma'$  dijagrama (kao i za proračun slijeganja). Koliki je početni koeficijent pora ako je poznato :  $S=1$ ;  $\gamma_s=26,0 \text{ kN/m}^3$ ;  $w_0=30\%$ .

Kako to da je uzorak zasićen, a vlažnost mu je manja od 100% ?

Iskoristimo uslov da je uzorak tla zasićen:

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{G_w / \gamma_w}{e \cdot V_s} = \frac{G_w / \gamma_w}{e \cdot G_s / \gamma_s} = \frac{G_w \cdot \gamma_s}{e \cdot G_s \cdot \gamma_w} = \frac{w \cdot \gamma_s}{e \cdot \gamma_w} = 1,0$$

$$e = \frac{w \cdot \gamma_s}{\gamma_w} = \frac{0,3 \cdot 26,0}{10,0} = 0,78$$

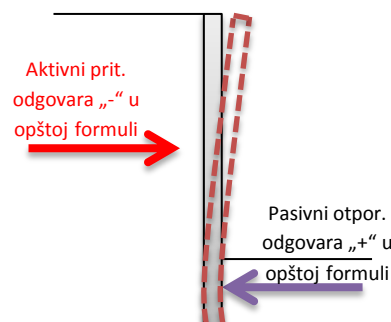
Pojmovi stepen zasićenosti i vlažnost su različiti pojmovi, a zasićeni uzorak ( $S=100\%$ ), može imati vlažnost koja je manja ili veća od 100% .

**Zadatak 86 :** Izračunati i nacrtati dijagram horizontalnih pritisaka na zaštitnu konstrukciju sa slike. Zanimariti saobraćajno opterećenje na površini nasipa (20,0 kPa), kao i opterećenje od zgrade koja je daleko od zaštitne konstrukcije. Pritiske izračunati i crtati od površine do nestišljive podloge. Prema opštem izrazu za horizontalne napone, jasno je treba proračunati vertikalne efektivne napone te odgovarajuće koeficijente horizontalnog pritiska te primijeniti poznati izraz:

$$\sigma_{h,p,a} = K_{p,a} \cdot \sigma'_v \pm 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{p,a}}$$

$$K_{a,1} = tg^2(45 - \frac{\phi}{2}) = tg^2(45 - \frac{38}{2}) = 0,238$$

$$K_{a,2} = tg^2(45 - \frac{\phi}{2}) = tg^2(45 - \frac{24}{2}) = 0,422$$



Slika 2.12 : Mogući oblik deformisanja zaštitne konstrukcije

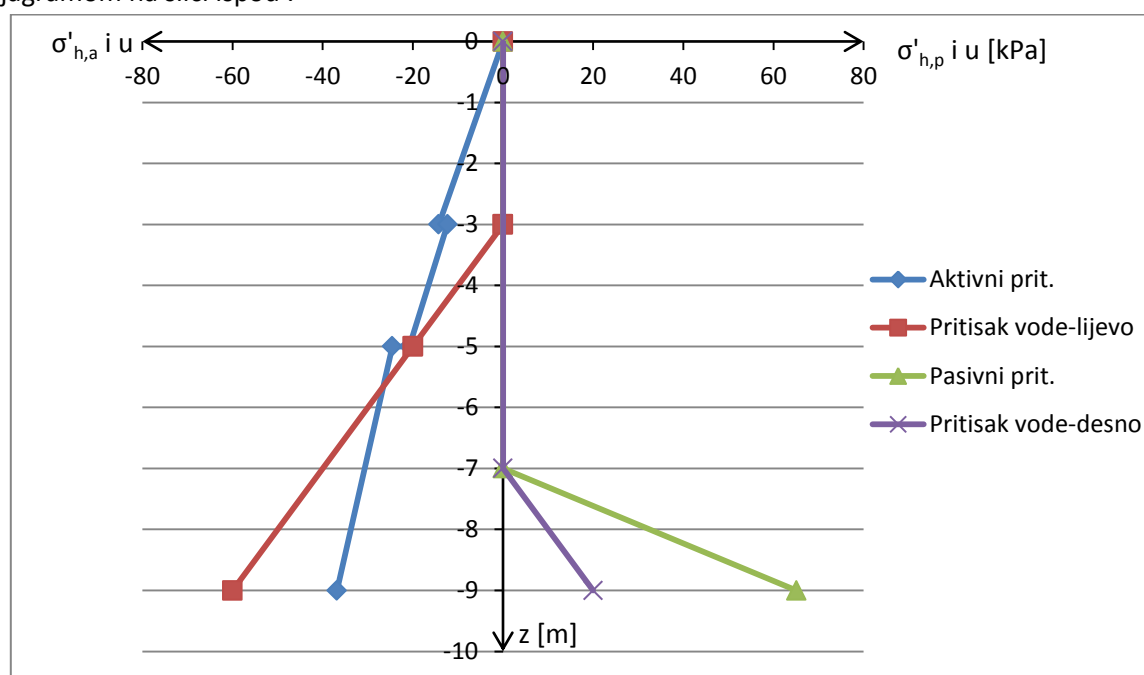
$$K_{a,3} = tg^2(45 - \frac{\phi}{2}) = tg^2(45 - \frac{32}{2}) = 0,307$$

$$K_{p,3} = tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) = tg^2(45 + \frac{32}{2}) = 3,255$$

| Napon<br>Dubina [m] | Totalni<br>napon<br>[ $\sigma$ ]-lijevo | Porni<br>pritisak<br>[u] - lijevo | Vertikalni<br>Efektivni napon<br>[ $\sigma' = \sigma - u$ ] | Aktivni<br>pritisak | Vert.ef.<br>napon<br>desno | Pasivni<br>otpor | Porni<br>pritisak<br>[u] -<br>desno |
|---------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|------------------|-------------------------------------|
| 0,0                 | 0,0                                     | 0,0                               | 0,0                                                         | 0,0                 | 0,0                        | 0,0              | 0,0                                 |
| 3,0 <sup>gore</sup> | 60,0                                    | 0,0                               | 60,0                                                        | 14,28               | 0,0                        | 0,0              | 0,0                                 |
| 3,0 <sup>dole</sup> | 60,0                                    | 0,0                               | 60,0                                                        | 12,32               | 0,0                        | 0,0              | 0,0                                 |
| 5,0 <sup>gore</sup> | 100,0                                   | 20,0                              | 80,0                                                        | 20,78               | 0,0                        | 0,0              | 0,0                                 |
| 5,0 <sup>dole</sup> | 100,0                                   | 20,0                              | 80,0                                                        | 24,56               | 0,0                        | 0,0              | 0,0                                 |
| 7,0                 | -                                       | -                                 | -                                                           | -                   | 0,0                        | 0,0              | 0,0                                 |
| 9,0                 | 180,0                                   | 60,0                              | 120,0                                                       | 36,84               | 20,0                       | 65,1             | 20,0                                |

Tabela 2.2 : Prikaz rezultata izračunatih prema opštoj formuli za horizontalne pritiske

Prethodno proračunate vrijednosti horizontalnih pritisaka na zaštitnu konstrukciju prikazani su dijagramom na slici ispod :



Slika 2.13 : Dijagram horizontalnih pritisaka na zaštitnu konstrukciju

**Napomena :** Veća kohezija i veći ugao unutrašnjeg trenja znače manje horizontalne pritiske za granično stanje, što se jasno vidi iz interpretacije naponskog stanja Mohr-ovim krugovima uz primjenu Mohr-Coulomb-ovog zakona čvrstoće.

**Zadatak 87 :** Izračunati slijeganje zgrade (pomoću konstantnog modula stišljivosti), koja opterećuje tlo ravnomjerno raspodijeljenim opterećenjem, uz dijeljenje stišljivog sloja na dva dijela visine 1,0 m. Dopunske napone izračunati približnom metodom.

**Rješenje :** Napone od površinskog opterećenja od 70,0 kPa ćemo izračunati približnom metodom u sredini prvog i drugog sloja :

$$\Delta\sigma_{z=0,5m} = 70 \frac{15,0 \cdot 15,0}{(15,0 + 0,5) \cdot (15,0 + 0,5)} = 65,56 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma_{z=1,5m} = 70 \frac{15,0 \cdot 15,0}{(15,0 + 1,5) \cdot (15,0 + 1,5)} = 57,85 \text{ kPa}$$

**Napomena :** Često se u praksi za proračun slijeganja primjenjuje edometarski modul (modul stišljivosti) koji predstavlja mjeru krutosti u uslovima spriječenog bočnog deformisanja. Ipak, praćenja slijeganja stvarnih konstrukcija (npr. temeljne stope) ukazuju da se iste sliježu analogno ponašanju uzorka u triaksijalnom testu kada bočne deformacije nisu spriječene, tj. da deformacioni modul opada sa povećanjem nivoa opterećenja. Na drugoj strani, kako deformacioni modul zavisi od stepena naprezanja, većina praktičnih preporuka za vrijednosti ovog modula vezane su za veličinu nekog izabranog referentnog naprezanja (u edometru vertikalnog, a u triaksijalnom testu čelijskog pritiska) koji obično iznosi 100,0 kPa. Ova je problematika detaljnije analizirana u poglavlju 1.5, a ovdje će se primijeniti analogija sa edometarskim testom.

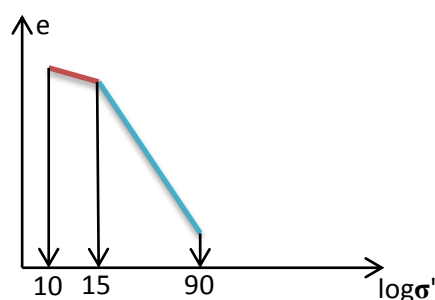
Pa se ukupno slijeganje stišljivog sloja može izračunati kao suma slijeganja dva sloja debljine 1,0 metar :

$$s = \frac{\Delta\sigma_{z=0,5m}}{M_s} \cdot 1,0m + \frac{\Delta\sigma_{z=1,5m}}{M_s} \cdot 1,0m = \frac{65,56}{20000} \cdot 1,0m + \frac{57,85}{20000} \cdot 1,0m$$

$$s = 0,00328 + 0,00289 = 0,0062m$$

Rješenje : **s = 0,62 cm**

**Zadatak 88 :** Opterećenje od nasipa zajedno sa saobraćajnim opterećenjem izaziva dopunske napone u sredini CL sloja od 80,0 kPa. Izračunati slijeganje ovog sloja od navedenog opterećenja, pomoću indeksa kompresije (rekompresije). **Napomena :** Koeficijent pora :  $e_0 = 0,78$ , izračunat je u prvom dijelu problema sa slike .



Slika 2.14 : Tipični  $e\text{-}\log\sigma'$  dijagram za konkretan zadatak

Početni vertikalni efektivni napon je onaj koji je postojao u tlu (sredina elementarne debljine stišljivog sloja) prije nanošenja opterećenja koje izaziva pojavu slijeganja iznosi :

$$\sigma'_{v,0} = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot 1,0 = (20,0 - 10,0) \cdot 1,0 = 10,0 \text{ kPa}$$

Na osnovu zadate vrijednosti odnosa prethodne konsolidacije :  $ORC = 1,5$ , može se izračunati napon prethodne konsolidacije :

$$\sigma'_p = 10,0 \cdot 1,5 = 15,0 \text{ kPa}$$

Kako je dodatni napon koji izaziva slijeganje zadat i iznosi 80,0 kPa, slijedi da je :  $\sigma'_{v,0} + \Delta\sigma = 90,0 \text{ kPa}$

**Napomena :** Glina ima osobinu da „pamti“ napone kojima je bila izložena u geološkoj prošlosti. Tačnije, glina ima osobinu da se do jednog stepena naprezanja ponaša **elastično** (bez zaostalih deformacija nakon rasterećenja), a poslije toga **plastično** (sa zaostalim deformacijama nakon rasterećenja). Ako su ti naponi iz geološke prošlosti veći od sadašnjih, glina će ponašati elastično do napona prethodne konsolidacije ( $C_r$  nagib), te plastično kada neponi pređu vrijednost napona prethodne konsolidacije ( $C_c$  nagib). Ako je glina normalno konsolidovana, tada nema elastičnih deformacija (samo  $C_c$  nagib – djevičanski pravac : nikad prije tako veliko opterećenje). Na kraju, ako je glina prekonsolidovana, a dodatno naprezanje ne prelazi vrijednost napna prethodne konsolidacije, glina se ponaša elastično (samo  $C_r$  nagib). Specijalan slučaj, koji se ne povezuje za praktičnim problemima jeste onaj da je  $OCR < 1$ , što predstavlja materijal koji nije završio slijeganje od sopstvene težine.

U konkretnom zadatku radi se o glini koja je prekonsolidovana ali postaje normalno konsolidovana prije kraja konsolidacije (doživljava i elastične i plastične deformacije). Stišljivi sloj neće biti podijeljen na više slojeva nego se posmatra kao 1 sloj debljine 2,0 metra, sa datim dodatnim opterećenjem u sredini istog od 80,0 kPa.

$$s = \frac{C_r}{1+e_0} h \cdot \log \frac{\sigma_p'}{\sigma_0'} + \frac{C_c}{1+e_0} h \cdot \log \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_p'}$$

$$s = \frac{0,0167}{1+0,78} 2,0 \cdot \log \frac{15}{10} + \frac{0,1}{1+0,78} 2,0 \cdot \log \frac{10+80}{15}$$

$$s = 0,033 + 0,087 = 0,12m$$

$$s = 12,0 \text{ cm}$$

**Zadatak 89 :** Predvidjeti vrijeme za koje će se desiti 75 % konsolidacije glinovitog sloja, pod pretpostavkom ravnomjerne raspodjele početnog porednog pritiska za koju je tabelarno data zavisnost prosječnog stepena konsolidacije i vremenskog faktora.

Prosječni stepen konsolidacije predstavlja odnos slijeganja u trenutku  $t$  i ukupnog slijeganja. Dakle, 75% slijeganja odgovara vrijednosti  $U = 75\%$ .

| $U_{avg}$ | 25     | 50    | 75    | 99    |
|-----------|--------|-------|-------|-------|
| $T_v$     | 0,0491 | 0,197 | 0,477 | 1,781 |

Očitano  $T_v$

Tabela 2.3 : Zavisnost vremenskog faktora ( $T_v$ ) i prosječnog stepena konsolidacije ( $U$ )

$$t = T_v \cdot \frac{H_{dr}^2}{c_v} = 0,477 \cdot \frac{(100cm)^2}{10^{-3} cm/sec} = 4770000 \text{ sec}$$

$$t \approx 9 \text{ godina}$$

**Zadatak 90 :** Skiciraj strujnu mrežu za problem sa slike, uz pretpostavku da je isti Darcy-ev koeficijent za CL i za GW-GM materijal (npr.  $10^{-2} \text{ cm/sec}$ ).

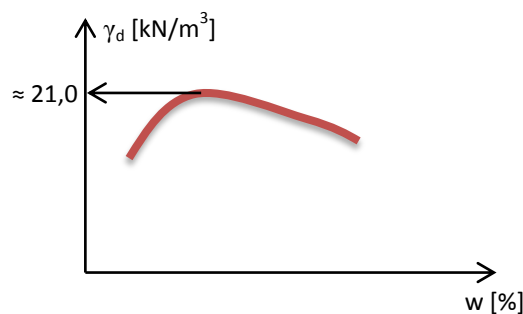
**Napomena :** Zanimariti nasip i opterećenje na nasipu, a zaštitna konstrukcija u kontaktu sa vodonepropusnom podlogom obezbjeđuje potpunu vodonepropusnost.

**Rješenje :** Pod navedenim pretpostavkama voda ne može da struji kroz tlo.

**Zadatak 91 :** Terenskim ispitivanjem ostvarene zbijenosti nasipa dobivena je vrijednost suhe zapremine težine od  $20,0 \text{ kN/m}^3$  i vlažnosti  $w = 18,0 \%$ . Rezultati Proctor-ovog testa (laboratorija) još nisu stigli na gradilište, ali iz iskustva znaš da je nasip dovoljno zbijen. Skiciraj krivu koju očekuješ iz laboratorije.

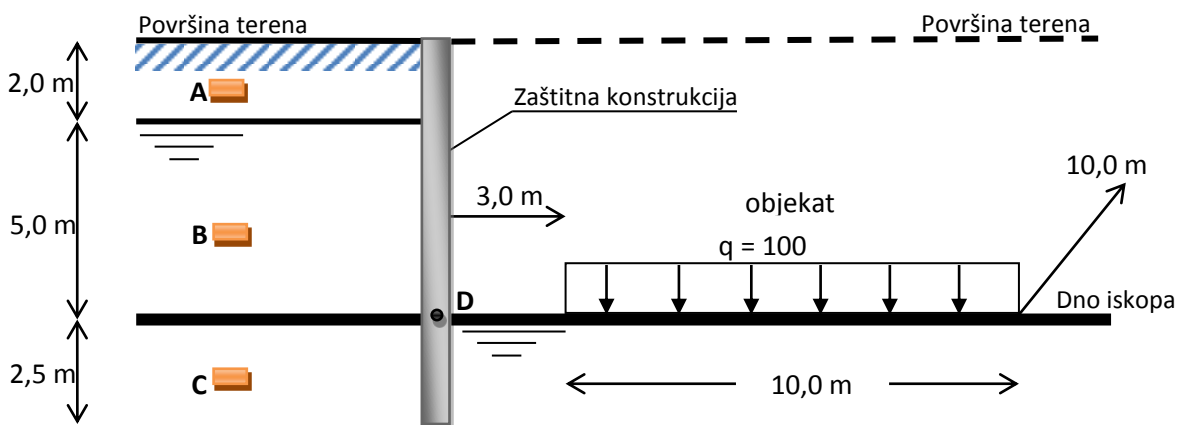
**Rješenje :** Tlo se može okarakterisati kao zbijeno ako je relativna zbijenost ( $R$ ) veća od 90% do 95%. Relativna zbijenost ( $R$ ) predstavlja odnos maksimalne suhe zapremine težine ostvarene na terenu i one u laboratoriji dobivene Proctor-ovim ili modifikovanim Proctor-ovim testom.

Ako usvojimo vrijednost za  $R$  od 95%, tada maksimalna suha zapreminska težina određena u laboratoriji iznosi :  $20,0/0,95 = 21,05$ . Dakle maksimalna suha zapreminska težina na dijagramu iz laboratorije treba da je oko  $21,0 \text{ kN/m}^3$ . Na osnovu toga može se skicirati očekivana kriva.



Slika 2.15 : Očekivani rezultati Proctor-ovog testa

**Zadaci 92 – 96 (Zaštitna konstrukcija) :** Na slici je prikazana zaštitna konstrukcija koja pridržava 7,0 metara duboki iskop. Prikazani su svi potrebni detalji geometrije terena, a geotehnički profil tla opisan je tekstom ispod slike.



Slika 2.16 : Geometrija zaštitne konstrukcije

Profil tla je definisan sa tri karakteristična sloja :

- Sloj (A)** - od površine do dubine od -2,0 metra; (CL) : CD triaksijalni test :  $c = 0,0 \text{ kPa}$ ;  $\varphi = 23^\circ$ ;  
te  $\gamma_d = \gamma_{\text{sat}} = 20,0 \text{ kN/m}^3$
- Sloj (B)** - od -2,0 do -7,0 metara; (GW-GM) : korelacije prema SPT-u =>  $\varphi = 27^\circ$ ;  $M_s = 20,0$   
MPa; te :  $c = 0,0 \text{ kPa}$  i  $\gamma_{\text{sat}} = 20,0 \text{ kN/m}^3$

- Test sa konstantnim nivoom :  $k_x = k_y = 0,1 \text{ cm/sec}$
- Sloj (C)**
- na dubini ispod 7,0 metara (MH-MC) ; Edometarski test :  $C_c = 0,05$ ;  $C_r = 0,0083$  ;  $OCR = 1,5$  ;  $te_{e0} = 0,9$  ;  $i \gamma_d = \gamma_{sat} = 20,0 \text{ kN/m}^3$ . Test sa nespriječenom bočnom deformacijom - zadatak

Objekat : Tlocrtne dimenzije  $10,0 \times 10,0 \text{ m}$ , sa ukupnim ravnomjernim opterećenjem na tlo od  $100,0 \text{ kPa}$ .

Zanemariti izdizanje usljed rasterećenja iskopom pri proračunu slijeganja.

Zaštitna konstrukcije je idealno glatka (koristiti Rankine-ovu teoriju kod proračuna horizontalnih napona)

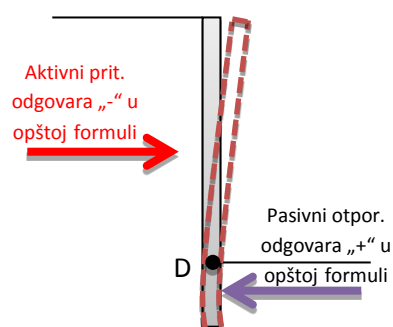
**Zadatak 92** : Izračunati moment savijanja u presjeku "D" (označeno kao tačka), nakon iskopa.

$$\sigma_{h,a} = K_a \cdot \sigma'_v - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_a}$$

$$K_{a,1} = tg^2(45 - \frac{\varphi}{2}) = tg^2(45 - \frac{23}{2}) = 0,438$$

$$K_{a,2} = tg^2(45 - \frac{\varphi}{2}) = tg^2(45 - \frac{27}{2}) = 0,376$$

$$c = 0,0 \text{ kPa}$$

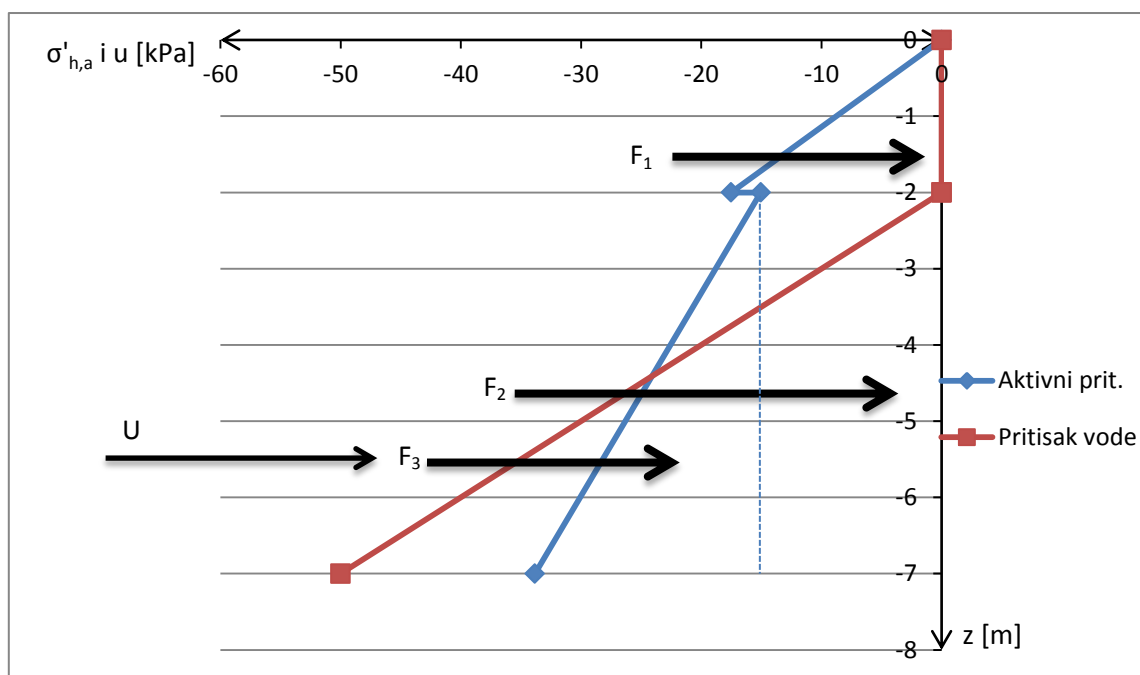


Slika 2.17 : Mogući oblik deformisanja zaštitne konstrukcije i položaj tačke D

| Napon<br>Dubina [m] | Totalni<br>napon [ $\sigma$ ] | Porni<br>pritisak [ $u$ ] | Vertikalni<br>Efektivni napon<br>[ $\sigma' = \sigma - u$ ] | Aktivni<br>pritisak |
|---------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|
| 0,0                 | 0,0                           | 0,0                       | 0,0                                                         | 0,0                 |
| 2,0 <sub>dole</sub> | 40,0                          | 0,0                       | 40,0                                                        | 17,52               |
| 2,0 <sub>gore</sub> | 40,0                          | 0,0                       | 40,0                                                        | 15,04               |
| 7,0                 | 140,0                         | 50,0                      | 90,0                                                        | 33,84               |

Tabela 2.4 : Prikaz rezultata izračunatih prema opštoj formuli za horizontalne pritiske

Izračunate vrijednosti prikazane su dijagramom na slici ispod :



Slika 2.18 : Dijagram horizontalnih pritisaka na zaštitnu konstrukciju koje vrše moment oko tačke D

Rezultante horizontalnog aktivnog pritiska i pritiska vode izračunat će se površine prikazanih dijagrama te sa odgovarajućim krakovima pomnožiti da se dobije traženi moment po 1m širine zaštitne konstrukcije

$$F_1 = 0,5 \cdot 2,0 \cdot 17,52 = 17,52 \text{ kN/m}' \rightarrow z_1 = 5,0 + 0,333 \cdot 2,0 = 5,667 \text{ m}$$

$$F_2 = 5,0 \cdot 15,04 = 75,2 \text{ kN/m}' \rightarrow z_2 = 2,5 \text{ m}$$

$$F_3 = 0,5 \cdot 5,0 \cdot (33,84 - 15,04) = 47,0 \text{ kN/m}' \rightarrow z_3 = 0,333 \cdot 5,0 = 1,667 \text{ m}$$

$$U = 0,5 \cdot 5,0 \cdot 50,0 = 125,0 \text{ kN/m}' \rightarrow z_u = 0,333 \cdot 5,0 = 1,667 \text{ m}$$

$$M_D = F_1 \cdot z_1 + F_2 \cdot z_2 + F_3 \cdot z_3 + U \cdot z_u = 99,28 + 188,0 + 78,35 + 208,38 = 574,0 \text{ kNm/m}'$$

$$\mathbf{M_D = 574,0 \text{ kNm/m}'}$$

**Zadatak 93 :** Izračunati slijeganje sloja **C** ispod centra objekta usljed opterećenja od 100,0 kPa (tlocrtne dimenzije 10,0x10,0 m). Napone od nadopterećenja izračunati pomoću *Boussinesq*-ovog dijagrama.

*Napomena :* Zanimariti uticaj rasterećenja iskopom; stišljivi sloj podijeliti na 3 sloja visine po 5,0 metra.

Početne vertikalne efektivne napone izračunat ćemo u sredini svakog od 3 sloja debljine 5,0 metara :

$$\sigma'_{0,v,z=2,5m} = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot 2,5 = (20,0 - 10,0) \cdot 2,5 = 25,0 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{0,v,z=7,5m} = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot 7,5 = (20,0 - 10,0) \cdot 7,5 = 75,0 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{0,v,z=12,5m} = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot 12,5 = (20,0 - 10,0) \cdot 12,5 = 125,0 \text{ kPa}$$

Razmatrani sloj debljine 15,0 metara ima konstantan  $OCR = 1,5$ , pa se za svaku razmatranu dubinu može izračunati napon prethodne konsolidacije :

$$\sigma'_{p,v,z=2,5m} = 25,0 \cdot 1,5 = 37,5 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{p,v,z=7,5m} = 75,0 \cdot 1,5 = 112,5 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{p,v,z=12,5m} = 125,0 \cdot 1,5 = 187,5 \text{ kPa}$$

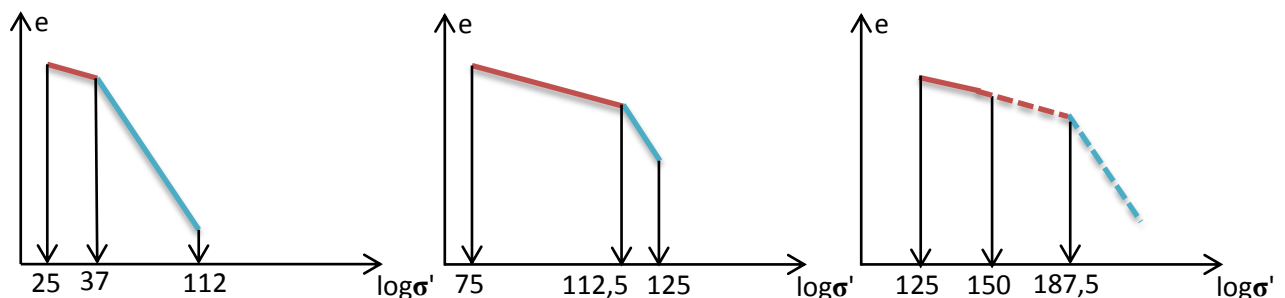
Preostaje još da se izračunaju naponi od nadopterećenja prema Boussinesq-ovom dijagramu. Kako je opterećenje sa konstrukcije ravnomjerno raspodijeljeno na kvadratnoj površini  $10,0 \times 10,0$ , na dijagramu se usvaja vrijednost širine  $B = 10,0$  metara, pa su dubine za koje se očitavaju naponi ispod centra opterećene površine izražene preko širine  $B$  jednaki  $0,25B$ ;  $0,75B$  i  $1,25B$  respektivno i iznose :

$$\Delta\sigma_{z=2,5m} = 0,87 \cdot q_0 = 0,87 \cdot 100,0 = 87,0 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma_{z=7,5m} = 0,5 \cdot q_0 = 0,5 \cdot 100,0 = 50,0 \text{ kPa}$$

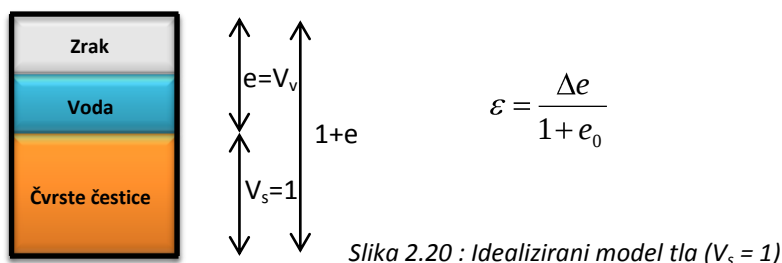
$$\Delta\sigma_{z=12,5m} = 0,25 \cdot q_0 = 0,25 \cdot 100,0 = 25,0 \text{ kPa}$$

Na taj način su izračunate sve potrebne vrijednosti za određivanje slijeganja ispod centra temeljne konstrukcije. Dakako, valja provjeriti da li pojedine zone prelaze napon prethodne konsolidacije i na koji način će se adekvatno odrediti smanjenje koeficijenta pora ( $\Delta e$ ). Karakteristični dijagrami za svaki od 3 sloja prikazani su slikom ispod :



Slika 2.19 : Karakteristični  $e$ - $\log \sigma'$  za različite dubine stišljivog sloja

Smanjenje zapremine jednako je smanjenju zapremine pora ( $\Delta e$ ), pa je odnos smanjenja zapremine i početne zapremine mjera deformacije,



Slika 2.20 : Idealizirani model tla ( $V_s = 1$ )

a posljedično, slijeganje se može izraziti kao proizvod deformacije i početne debljine sloja ( $H$ ) :

$$s = H \cdot \varepsilon = H \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

Slijeganja pojedinih slojeva izračunat ćemo uvrštavanjem odgovarajućih vrijednosti  $\Delta e$  (u funkciji indeksa kompresije/rekompresije i logaritma napona), dok su početni koeficijent pora ( $e_0 = 0,9$ ) i visina sloja ( $H = 5,0$  m) zadate veličine.

$$s_1 = \frac{C_r}{1+e_0} h \cdot \log \frac{\sigma_p'}{\sigma_0'} + \frac{C_c}{1+e_0} h \cdot \log \frac{\sigma_0'+\Delta\sigma}{\sigma_p'}$$

$$s_2 = \frac{C_r}{1+e_0} h \cdot \log \frac{\sigma_p'}{\sigma_0'} + \frac{C_c}{1+e_0} h \cdot \log \frac{\sigma_0'+\Delta\sigma}{\sigma_p'}$$

$$s_3 = \frac{C_r}{1+e_0} h \cdot \log \frac{\sigma_0'+\Delta\sigma}{\sigma_0'}$$

$$s_1 = \frac{0,0083}{1+0,9} 5,0 \cdot \log \frac{37}{25} + \frac{0,05}{1+0,9} 5,0 \cdot \log \frac{25+87}{37} = 0,00372 + 0,0633 = 0,067 \text{ m}$$

$$s_2 = \frac{0,0083}{1+0,9} 5,0 \cdot \log \frac{112,5}{75} + \frac{0,05}{1+0,9} 5,0 \cdot \log \frac{75+50}{112,5} = 0,00385 + 0,006 = 0,0099 \text{ m}$$

$$s_3 = \frac{0,0083}{1+0,9} 5,0 \cdot \log \frac{125+25}{125} = 0,00173 \text{ m}$$

$$s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,067 + 0,0099 + 0,00173 = 0,07863 \text{ m}$$

$$s = 7,86 \text{ cm}$$

**Zadatak 94 :** Izračunati vrijednosti modula stišljivosti po slojevima visine 5,0 m, tako da ukupno slijeganje bude jednako slijeganju izračunatom u prethodnom zadatku.

Korištenjem Boussinesq-ovog dijagrama određene su vrijednosti dodatnih napona ispod centra opterećenja kvadratne površine dimenzija  $B \times B = 10,0 \times 10,0$  metara i iznose :

$$\Delta\sigma_{z=2,5\text{m}} = 0,87 \cdot q_0 = 0,87 \cdot 100,0 = 87,0 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma_{z=7,5\text{m}} = 0,5 \cdot q_0 = 0,5 \cdot 100,0 = 50,0 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma_{z=12,5\text{m}} = 0,25 \cdot q_0 = 0,25 \cdot 100,0 = 25,0 \text{ kPa}$$

Slijeganja izračunata primjenom indeksa kompresije i rekompresije za pojedine slojeve iznose :

$$s_1 = 0,067$$

$$s_2 = 0,0099$$

$$s_3 = 0,00173$$

ako deformaciju izrazimo Hooke-ovim zakonom, kao količnik dodatnih napona ( $\Delta\sigma$ ) i edometarskog modula ( $M_s$ ) :

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{M_s}$$

jasno je da je slijezanje jednako :

$$s = H \cdot \varepsilon = H \frac{\Delta\sigma}{M_s}$$

pa je deformacioni modul pojedinih slojeva ( $i = 1, 2, 3$ ) jednak :

$$M_s^1 = \frac{H \cdot \Delta\sigma_{z=2,5}}{s_1} = \frac{5,0 \cdot 87,0}{0,067} = 6492,5 \text{ kPa}$$

$$M_s^2 = \frac{H \cdot \Delta\sigma_{z=7,5}}{s_2} = \frac{5,0 \cdot 50,0}{0,0099} = 25252,5 \text{ kPa}$$

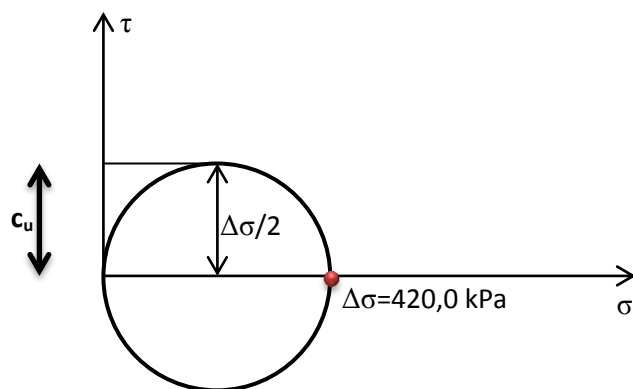
$$M_s^3 = \frac{H \cdot \Delta\sigma_{z=12,5}}{s_3} = \frac{5,0 \cdot 25,0}{0,00173} = 72254,3 \text{ kPa}$$

**Zadatak 95 :** Izračunati faktor hidrauličke stabilnosti u zoni isticaja vode u dno jame, ako prosječni hidraulički gradijent u zoni vertikalnog (uzlaznog) isticanja iznosi 0,2 .

$$FS = \frac{\gamma'}{i \cdot \gamma_w} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{i \cdot \gamma_w} = \frac{20,0 - 10,0}{0,2 \cdot 10,0} = \frac{10,0}{2,0} = 5,0$$

**Zadatak 96 :** Uzorak raspucalog glinovitog praha sa lokacije "C" podvrgnut je testu monoaksijalne čvrstoće. Do sloma uzorka je došlo pri aksijalnom naponu od 420 kPa. Izračunati nedreniranu koheziju. Skicirati rezultate testa i Mohr-ov krug napona.

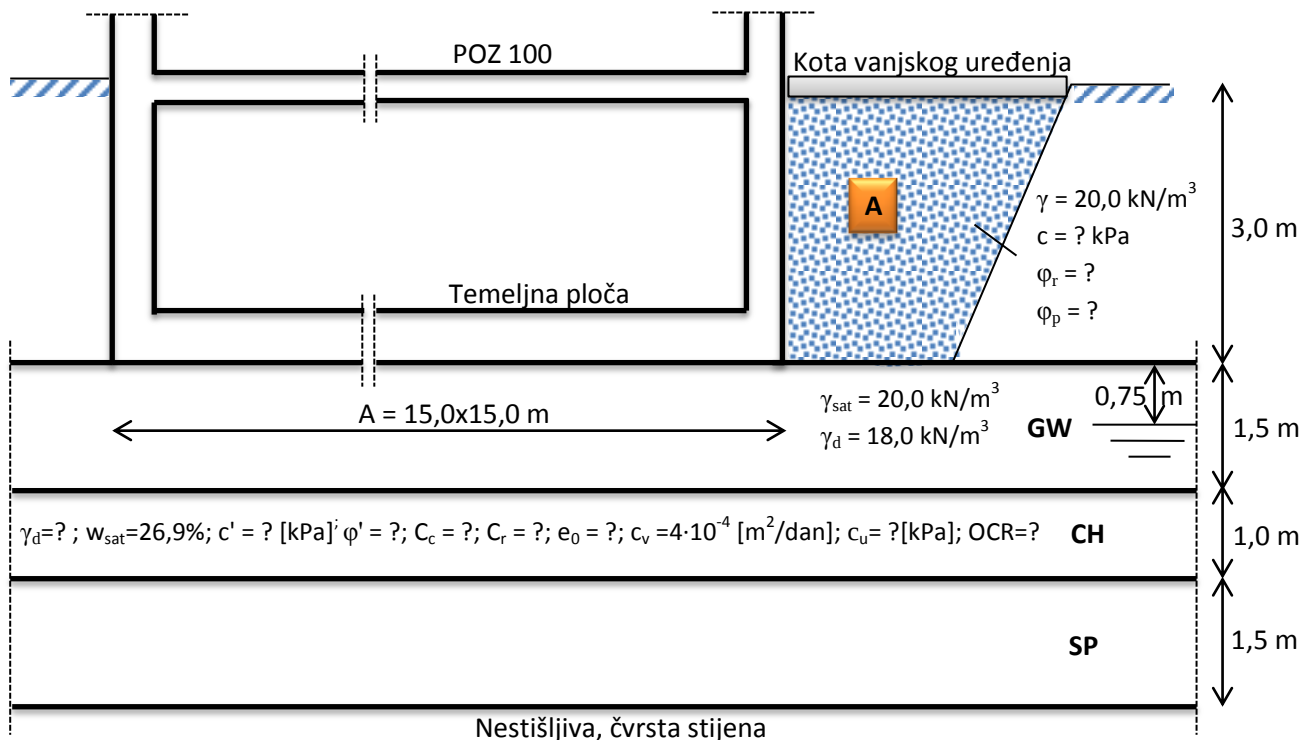
**Rješenje :** U testu monoaksijalne čvrstoće nema ćelijskog pritiska, nanosi se samo aksijalno opterećenje do sloma. Odsječak na osi smičućeg naprezanja predstavlja vrijednost nedrenirane kohezije ( $c_u$ ).



Slika 2.21 : Skica rezultata testa monoaksijalne čvrstoće

$$c_u = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{420,0}{2} = 210,0 \text{ kPa}$$

**Zadaci 97– 100 (Podzemna etaža stambenog objekta) :** Na slici je prikazan poprečni presjek kroz podzemnu etažu stambenog objekta.



Slika 2.22 : Geometrija objekta i profil tla

**Napomene :**

- Objekat opterećuje tlo ravnomjerno raspodijeljenim površinskim opterećenjem od 50,0 kPa
- Nepoznate geotehničke karakteristike tla treba odrediti na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja datih slikama i tekstom zadataka
- Nivo podzemne vode je uočen na dubini od 3,75 metara ispod površine terena

**Zadatak 97 :** Materijal "A" je GW materijal koji je ispitan u velikom uređaju za direktno smicanje pri konstantnom vertikalnom naponu od 50,0 kPa. Smičuća čvrstoća u kritičnom stanju ( $\tau_{cv}$ ) iznosila je pri ovom testu 35,0 kPa, a vršna ( $\tau_p$ ) 39,0 kPa. Odrediti nepoznate geotehničke karakteristike i po potrebi ih primijeniti u zadacima 98,99 i 100.

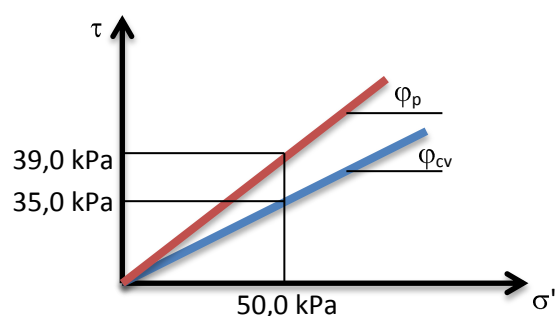
Kako se radi o krupnozrnatom materijalu => **c = 0,0 kPa**

Na drugoj strani ugao unutrašnjeg trenja se može odrediti iz rezultata testa direktnog smicanja (teoretski je dovoljan jedan test)

$$tg\varphi_{cv} = \frac{\tau_r}{\sigma} = \frac{35,0}{50,0} = 0,7 \Rightarrow \varphi_{cv} = \arctg 0,7 = 35^\circ$$

$$tg\varphi_p = \frac{\tau_p}{\sigma} = \frac{39,0}{50,0} = 0,78 \Rightarrow \varphi_p = \arctg 0,78 = 38^\circ$$

Grafički se rezultati mogu predstaviti kao na slici ispod :

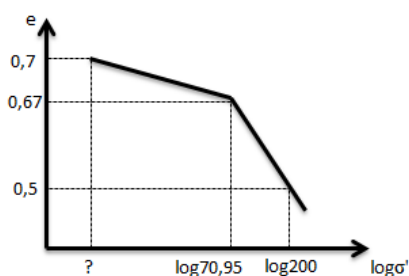


Slika 2.23 : Prikaz rezultata testa direktnog smicanja

**Zadatak 98 :** Materijal **CH** (prekonsolidovana glina) ispitan je testovima : **a)** jednoosne čvrstoće, pri čemu je aksijalna sila pri slomu iznosila 1624,0 N, a uzorak je prečnika 10,0 cm, **b)** CU trikasijalnim testom, pri čemu su ispitana 2 uzorka, a rezultati su prikazani tabelom 2.5, te **c)** edometarskim testom, za kojeg su rezultati prikazani slikom 2.24, uz napomenu da je specifična zapreminska težina jednaka 26,0 kN/m<sup>3</sup>. Odrediti nepoznate veličine (geotehničke karaktersitike) prikazane na slici 2.22. Uzorak je uzet iz sredine sloja CH. Početnim naponskim stanjem smatrati ono nakon iskopa do kote dna temeljne ploče.

| $\sigma_3$ [kPa] | $\Delta\sigma$ [kPa] | $u$ [kPa] |
|------------------|----------------------|-----------|
| 100,0            | 410,0                | -65,0     |
| 200,0            | 520,0                | -10,0     |

Tabela 2.5 : Rezultati CU testa



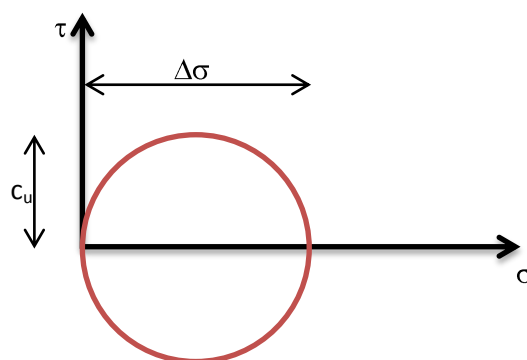
Slika 2.24 : Rezultati edometarskog testa

a) Iz rezultata testa monoaksijalne čvrstoće može se odrediti veličina nedrenirane kohezije :

$$c_u = \frac{\Delta\sigma}{2}$$

$$\Delta\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1,624 \text{ kN}}{\frac{0,1^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{1,624}{0,00785} = 206,87$$

$$c_u = \frac{206,87}{2} = 103,4 \text{ kPa}$$



Slika 2.25 : Rezultati testa monoaksijalne čvrstoće

b) Iz rezultata CU testa mogu se odrediti efektivni parametri čvrstoće na smicanje ( $c'$  i  $\varphi'$ ) Koristeći poznati izraz, koji ovdje neće biti posebno izvođen (vidi poglavlje 4) :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \cdot \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$$

Uvrštavajući konkretne vrijednosti izmjerene na 2 provedena testa mogu se, rješavanjem sistema 2 jednačine sa 2 nepoznate odrediti efektivni paramteri čvrstoće. Kako se radi o uzorku prekonsolidovane gline, pri smicanju je uočeno smanjenje pornog pritiska (negativni porni pritisak) koje se vezuje uz pojavu povećanja zapremine pora pri smicanju. Na sreću, princip efektivnih napona i dalje vrijedi pa se isti mogu izračinati prema :

$$\sigma' = \sigma - (-u) = \sigma + u$$

Dakle, Mohr-ov krug efektivnih napona je pomjeren ka desno u odnosu na krug totalnih napona.

$$\text{TEST 1 : } \sigma_3' = 100,0 + 65 = 165,0 \text{ kPa; } \sigma_1' = 510,0 + 65 = 575,0 \text{ kPa}$$

$$\text{TEST 2 : } \sigma_3' = 200,0 + 10 = 210,0 \text{ kPa; } \sigma_1' = 720,0 + 10 = 730,0 \text{ kPa}$$

$$575,0 = 165,0 \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) + 2c' \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

$$730,0 = 210,0 \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) + 2c' \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

Pa oduzimanjem prve jednačine od druge :

$$155,0 = 45,0 \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

$$\operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) = 1,85$$

$$\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) = 61,7$$

$$\varphi' = 33,4^\circ$$

Uvrštavanjem ovako izračunatog efektivnog ugla unutrašnjeg trenja u prvu od dvije početne jednačine izračunat ćemo efektivnu koheziju :

$$2c' \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) = 575,0 - 165,0 \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

$$2c' \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{33,4}{2}\right) = 575,0 - 165,0 \cdot \operatorname{tg}^2(61,7)$$

$$2c' \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{33,4}{2}\right) = 5,82$$

$$c' = \frac{5,82}{2} = 2,91 \text{ kPa}$$

c) Iz rezultata edometarskog testa određene su sljedeće veličine :

Indeks rekompresije - nagib linije rekompresije ( $C_r$ ) sa dijagrama  $e-\log \sigma'$  :

$$C_r = \frac{0,7 - 0,67}{\log 70,95 - \log \sigma_0}$$

gdje je  $\sigma_0$  – početni efektivni napon u sredini sloja CH, a zadatkom je rečeno da se isti računa za stanje nakon iskopa pa vrijedi :

$$\sigma_0 = \gamma_{d(GW)} \cdot 0,75 + (\gamma_{sat(GW)} - \gamma_w) \cdot 0,75 + (\gamma_{sat(CH)} - \gamma_w) \cdot 0,5$$

Gdje je nepoznata veličina saturirane zapreminske težine sloja CH, a istu ćemo odrediti iz suhe zapreminske težina i zadate vlažnosti pri 100% saturaciji jer je sloj CH ispod nivoa podzemne vode :

$$\gamma_{sat} = \gamma_d (1 + w_{sat})$$

dok se suha zapreminska težina može odrediti iz specifične za poznatu vrijednost poroznosti prema :

$$\gamma_d = \gamma_s (1 - n)$$

A poroznost iz zadatog početnog koeficijenta pora (slika 2.24),  $e_0 = 0,7$ , pa je :

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{0,7}{1 + 0,7} = 0,411$$

$$\gamma_d = 26,0(1 - 0,411) = 15,13 \text{ kN} / \text{m}^3$$

$$\gamma_{sat} = 15,13(1 + 0,269) = 19,2$$

Pa je početni efektivni napon :

$$\sigma_0 = 18,0 \cdot 0,75 + 10,0 \cdot 0,75 + 9,2 \cdot 0,5 = 25,6 \text{ kPa}$$

A konačno i indeks rekompresije :

$$C_r = \frac{0,7 - 0,67}{\log 70,95 - \log 25,6} = \frac{0,03}{\log \left( \frac{70,95}{25,6} \right)} = \frac{0,03}{0,443} = 0,0677$$

Odnos prethodne konsolidacije predstavlja odnos napona prethodne konsolidacije i početnog efektivnog napona :

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma_0} = \frac{70,95}{25,6} = 2,77$$

Indeks kompresije - nagib linije normalne konsolidacije ( $C_c$ ) sa dijagrama  $e - \log \sigma'$  :

$$C_c = \frac{0,67 - 0,5}{\log 200,0 - \log 70,95} = \frac{0,17}{\log \left( \frac{200,0}{70,95} \right)} = \frac{0,17}{0,45} = 0,387$$

Kontrola :  $C_r \approx 0,167 C_c \Rightarrow \text{OK}$

**Zadatak 99 :** Izračunati i nacrtati dijagram horizontalnog pritiska granularnog materijala koji je nasut nakon izvođenja podzemnog dijela stambene kuće sa svih strana, a što je detaljno naznačeno na slici 2.22 (s desne strane presjeka). Vertikalni dio zida smatrati idealno glatkim.

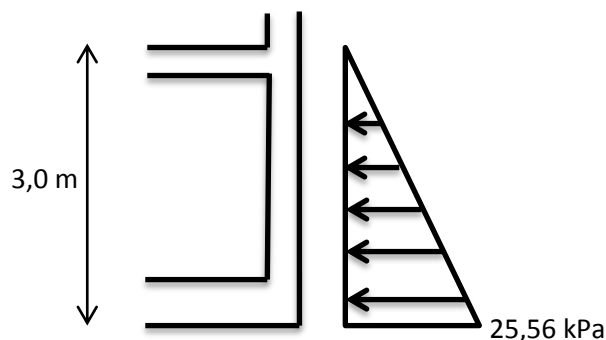
Primjena kritičnog ugla unutrašnjeg trenja može se opravdati time što je ista na strani sigurnosti, a primjena vršnog ugla se može opravdati time što su deformacije male za slučaj stanja mirovanja. Ipak, vječita inženjerska dilema „vršna ili kritična vrijednost“, češće završava izborom rezidualne vrijednosti ugla unutrašnjeg trenja, kao one na strani sigurnosti, pa će isto biti urađeno i u ovom zadatku.

$$K_0 = 1 - \sin \varphi_r = 1 - \sin 35 = 0,426$$

Vertikalni efektivni napon na dubini od 3,0 metra iznosi :  $\sigma'_v = 20,0 \cdot 3,0 = 60,0 \text{ kPa}$ , pa je horizontalni napon na dubini od 3,0 metra jednak :

$$\sigma'_{h,0} = 60,0 \cdot 0,426 = 25,56 \text{ kPa},$$

dok je na površini isti jednak nuli, pa se može nacrtati traženi dijagram horizontalnih pritisaka :



Slika 2.26 : Horizontalni pritisak na zid podzemnog dijela stambenog objekta

**Zadatak 100 :** Izračunati nakon koliko vremena će slijeganje sloja gline iznositi 0,5 cm. Koristiti teoriju Terzaghi-jeve jednoosne konsolidacije. Slojeve šljunka i pijeska smatrati nestišljivim pri ovom proračunu. Primijeniti linearnu interpolaciju za vrijednosti  $T_v$  vs.  $U$ , koje nisu date tabelom. Početno stanje je ono nakon iskopa!.

|           |        |       |       |       |
|-----------|--------|-------|-------|-------|
| $U_{avg}$ | 25     | 50    | 75    | 99    |
| $T_v$     | 0,0491 | 0,197 | 0,477 | 1,781 |

Tabela 2.6 : Veza između prosječnog stepena konsolidacije i vremenskog faktora – konstantan početni porni pritisak

Opterećenje objektom iznosi 50,0 kPa na površini terena pa je dodatni napon usljed tog površinskog opterećenja u sredini sloja CH (na dubini od 2,0 metra) jednak :

$$\Delta\sigma_{z=2,0m} = 50,0 \cdot \frac{15,0 \cdot 15,0}{(15,0 + 2,0) \cdot (15,0 + 2,0)} = 50,0 \cdot \frac{225,0}{289,0} = 38,9 \text{ kPa}$$

Pa je  $\sigma_0 + \Delta\sigma = 25,6 + 38,9 = 64,5 \text{ kPa} < 70,95 =$  napon prethodne konsolidacije, što znači da prekonsolidovana glina ostaje prekonsolidovana do kraja konsolidacije (elastične deformacije). Promjena koeficijenta pora za izračunati dodatni napon može se odrediti preko indeksa rekompresije (očitanjem sa dijagrama  $e\text{-}\log\sigma'$ ), pa je slijeganje jedanko :

$$s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H = \frac{C_r}{1 + e_0} H \cdot \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right) = \frac{0,0677}{1 + 0,7} \cdot 1,0 \cdot \log\left(\frac{25,6 + 38,9}{25,6}\right) = 0,016 \text{ m}$$

**s = 1,6 cm**

Prosječni stepen konsolidacije definiše odnos između slijeganja u nekom trenutku vremena i ukupnog slijeganja koje odgovara vremenu u beskonačnosti. To krajnje slijeganje (slijeganje u beskonačnosti) je izračunato i iznosi 1,6 cm pa se prosječni stepen konsolidacije koji odgovara traženom slijeganju od 0,5 cm može izraziti kao :

$$U_{avg} = \frac{s_t}{s_\infty} \cdot 100(\%) = \frac{0,5}{1,6} \cdot 100(\%) = 31,25\%$$

Te je odgovarajući vremenski faktor za slučaj konstantnog početnog pritiska i izračunati prosječni stepen konsolidacije :  $T_v = 0,0861$  (određeno linearnom interpolacijom za tabelarno prikazane

rezultate, a može se očitati i sa gotovih dijagrama, uz napomenu da se radi o slučaju konstantnog početnog pritisaka po visini sloja CH). Vrijeme potrebno da slijeganje bude 0,5 cm se računa prema poznatom izrazu (Terzaghi-jeva jednoosna konsolidacija) :

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

gdje je visina dreniranja jednaka 0,5H (polovini visine sloja gline), jer se radi o dreniranju u 2 smjera.

$$t = \frac{(0,5m)^2 \cdot 0,0961}{0,0004m^2 / dan} = 53,8$$

**t = 53,8 dana**