

VERTIKALNI NAPONI I SLIJEGANJA

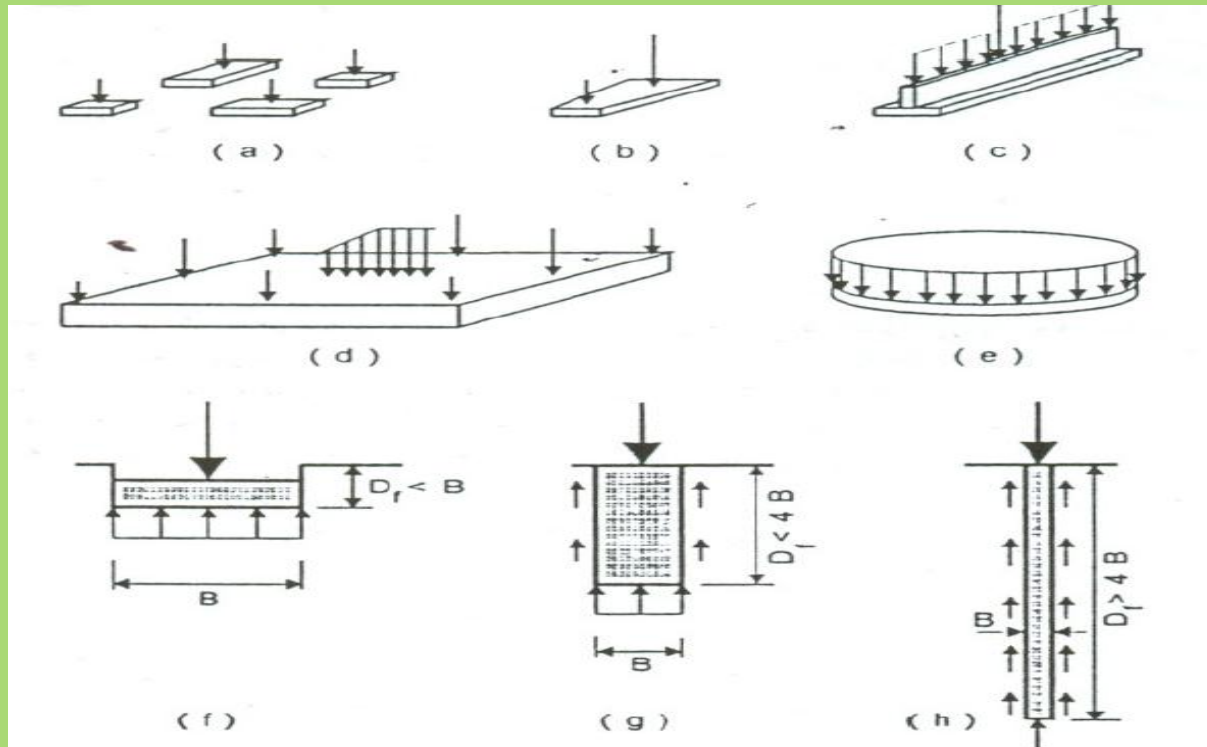
Uvod

Model elastičnog materijala je u najširoj primjeni ne zbog svoje visoke tačnosti već, prije svega, zbog relativne jednostavnosti u poređenju sa drugim modelima ponašanja. U proračunima napona primjena rezultata teorije elastičnosti se dalje pojednostavljuje sa dvije dopunske pretpostavke o osobinama tla, pa se usvaja da je tlo **homogeno i izotropno**.

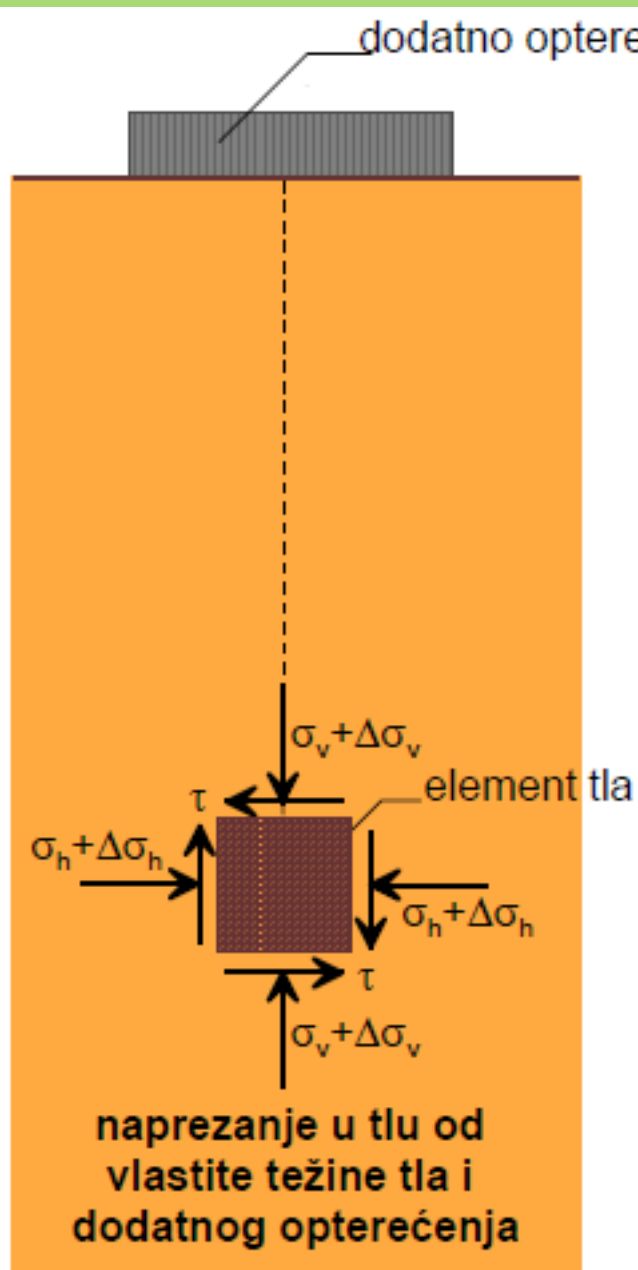
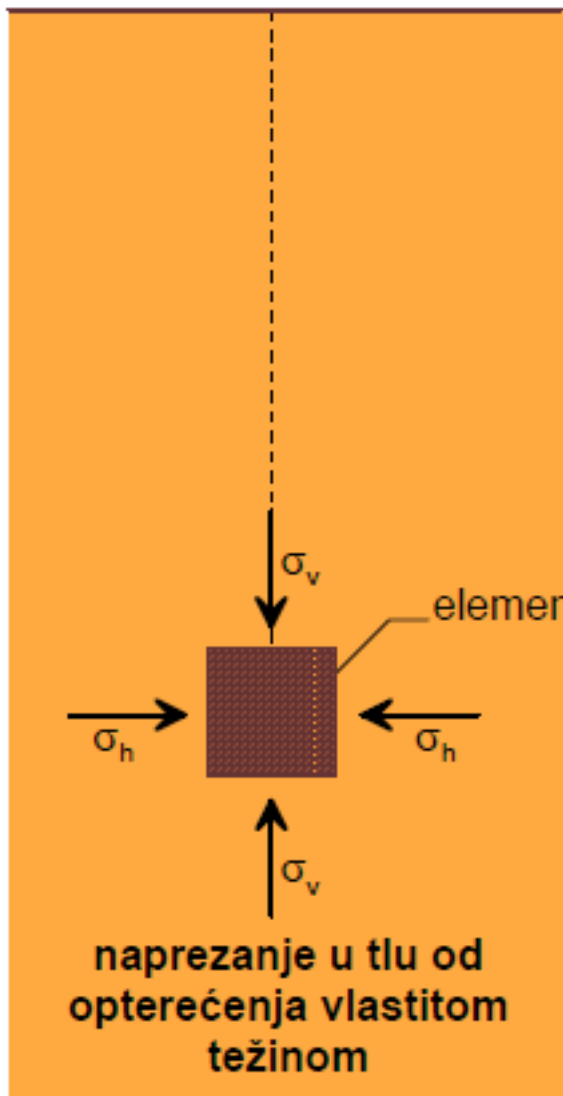
U ovom poglavlju razmatraju se naponi u masi tla i prateće pojave deformisanja usljed opterećenja na njegovoj površini.

Naponi su znatno manji od onih koji izazivaju lom tla.

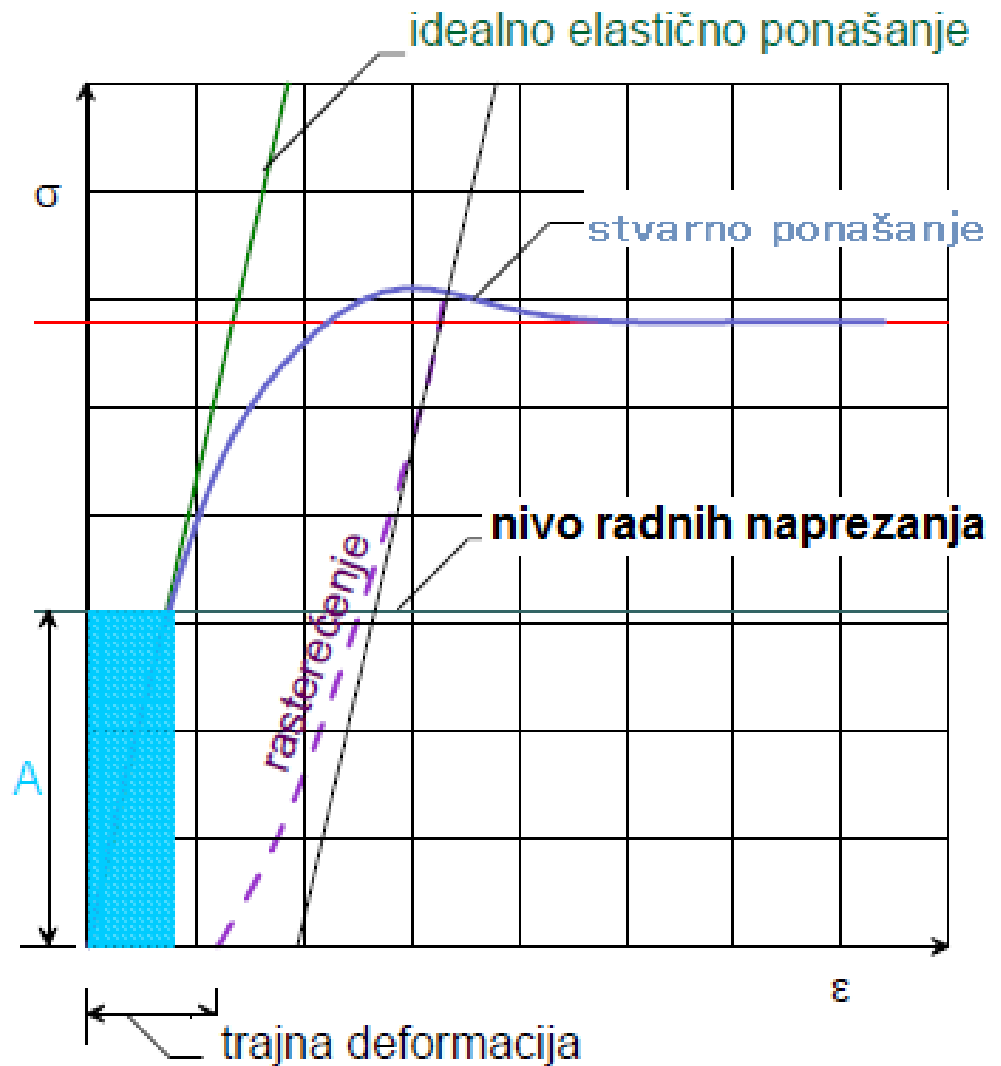
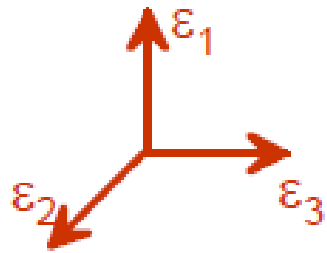
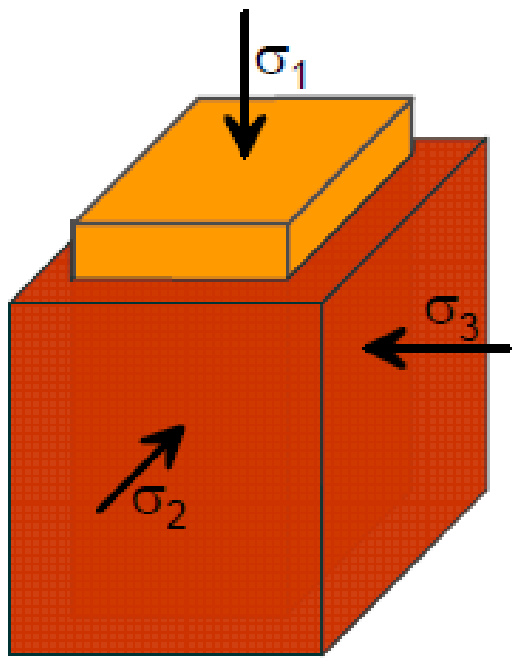
Temelji su dijelovi građevinske konstrukcije koji prenose opterećenja objekta na podlogu, koja može biti tlo ili stijena.



Slika 7.1. Karakteristični oblici temelja



Skica uz početna i dodatna naprezanja u tlu



Dijagram odnosa naprežanja i deformacija za razna stanja naprežanja

U inženjerskom smislu je tlo materijal za koji je bitno odrediti ponašanje u tri dimenzije; ne može se neka dimenzija zanemariti kao kod štapova i ploča. Ipak, mogu se uvesti neke pretpostavke koje omogućuju jednostavnije proračune deformacija.

Jedna takva pretpostavka je da se, **ako su dodatna naprezanja dovoljno mala**, ponašanje tla može smatrati **linearno elastičnim**.

S ovom pretpostavkom treba biti oprezan i u praksi je koristiti uglavnom *za teško stišljive materijale kao što su dobro zbijeni pijesci ili šljunci te prekonsolidovane gline*. Ako se nivo naprezanja i deformacija zadržava u području **“A”**, ponašanje materijala se može **smatrati idealno elastičnim** i, na osnovu toga, deformacije izračunavati prema poznatim izrazima teorije elastičnosti:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E} [\sigma_i - \nu \cdot (\sigma_j + \sigma_k)], \quad i, j, k = 1, 2, 3$$

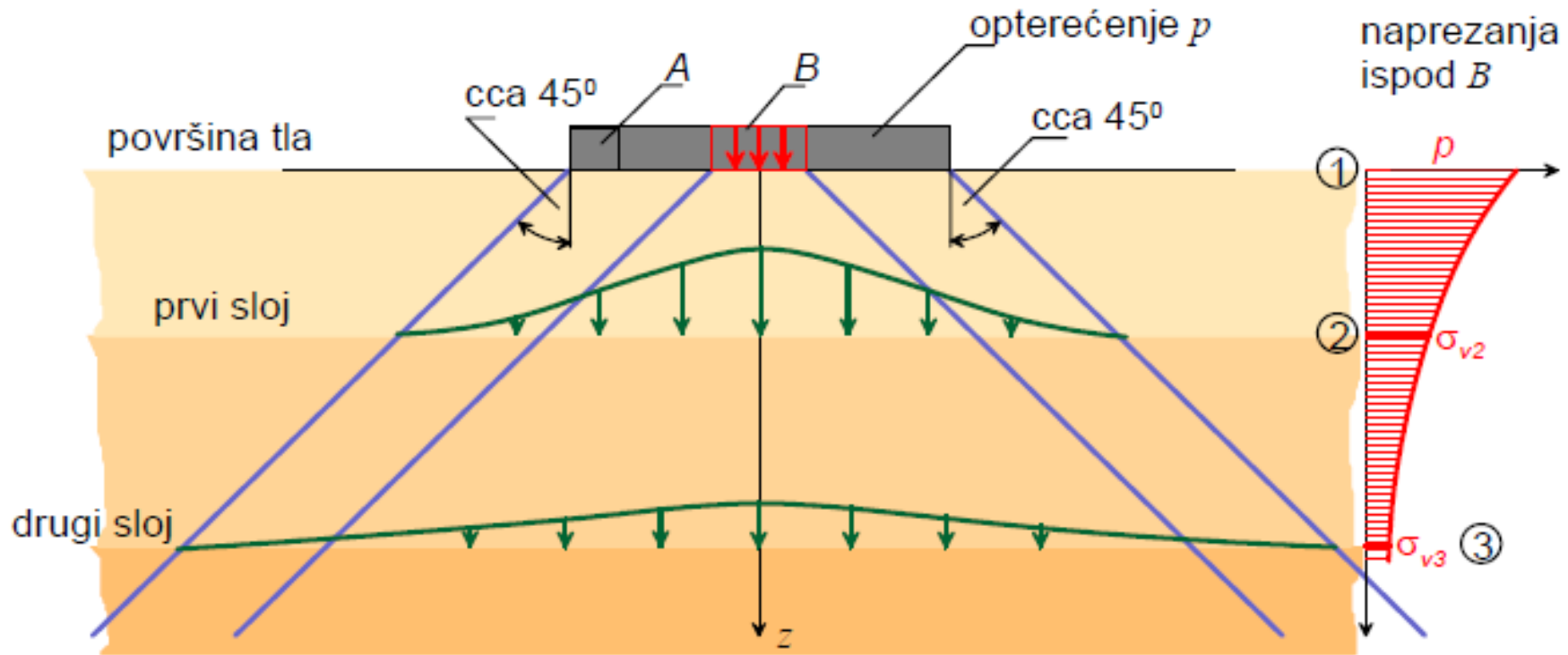
gdje je

E ... Youngov modul elastičnosti, a

ν ... Poissonov koeficijent, $\nu_i = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$,

Uobičajene vrijednosti za tlo su $\nu = 0,2$ do $0,3$; za $\nu = 0,5$ nema promjene volumena.

Dodatna naprezanja u tlu



Širenje dodatnih naprezanja u tlu

Temeljna spojnica u kontaktu sa tlom nije gotovo nikad na prirodnoj površini terena, već se izvodi na nekoj dubini Df . Zavisno od odnosa minimalne dimenzije temelja u osnovi B i dubine Df , temelji se mogu podijeliti na tri osnovne grupe: *plitak* temelj, kada je $Df/B < 1$; *polu-dubok* temelj, kada je $Df/B = 1$ do 4 ; *dubok*, kada je $Df/B > 4$.

Proračun sleganja temelja sastoji se od tri sljedeća zadatka:

- Odrediti raspodjelu napona u tlu
- Odrediti veličine deformacija
- Integrisati deformacije da bi se dobila pomjeranja, tj. Sleganja temelja.

Geostatički naponi u tlu

U homogenom terenu sa jediničnom težinom tla g na dubini z bez prisustva vode vertikalni napon je

$$\sigma_v = \sigma_z = g \cdot z = p_v$$

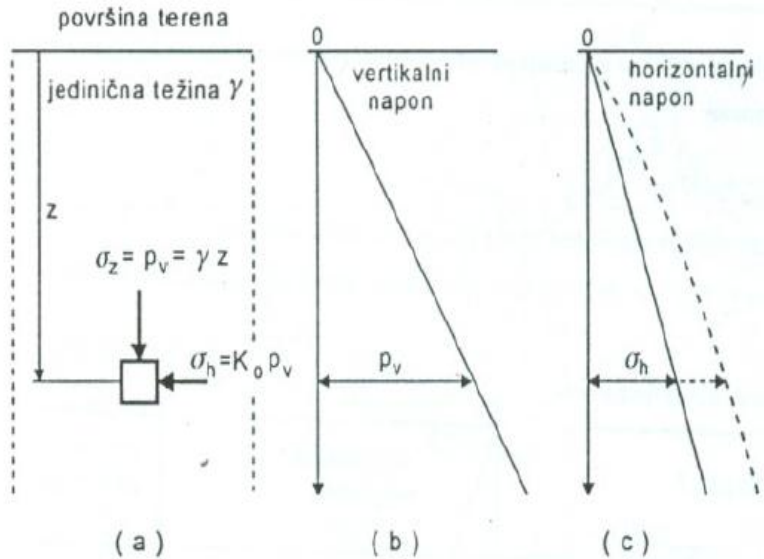
Horizontalni naponi će biti:

$$\sigma'_h = \sigma'_x = \sigma'_y = K_0 \cdot \sigma'_z = K_0 \cdot p'_v$$

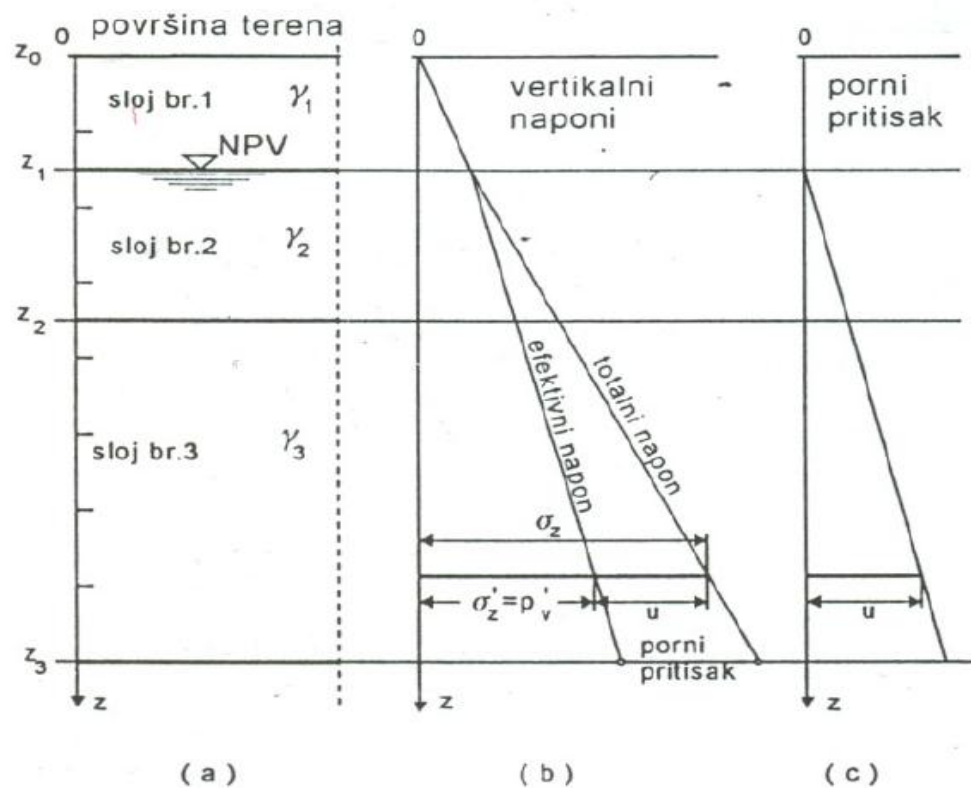
gdje je p'_v vertikalni efektivni geostatički napon

K_0 koeficijent bočnog pritiska tla "u miru".

Horizontalni naponi se mogu, ali ne moraju, linearno mijenjati sa dubinom.



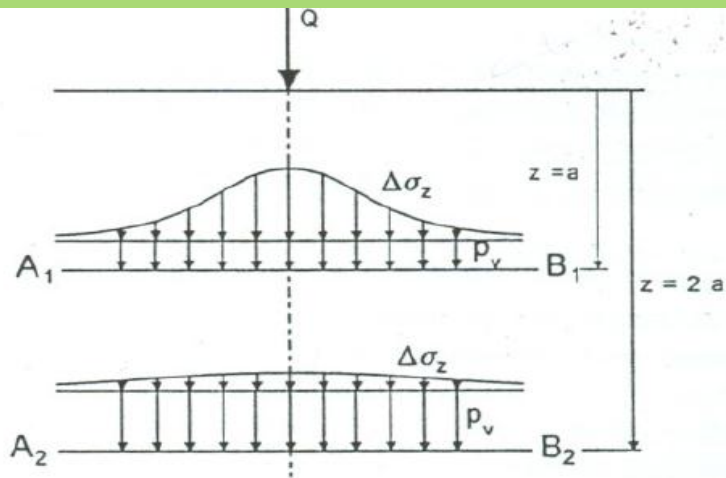
Slika 7.2. Geostatički naponi u homogenom preseku tla



Slika 7.3. Geostatički naponi u uslojenom tlu

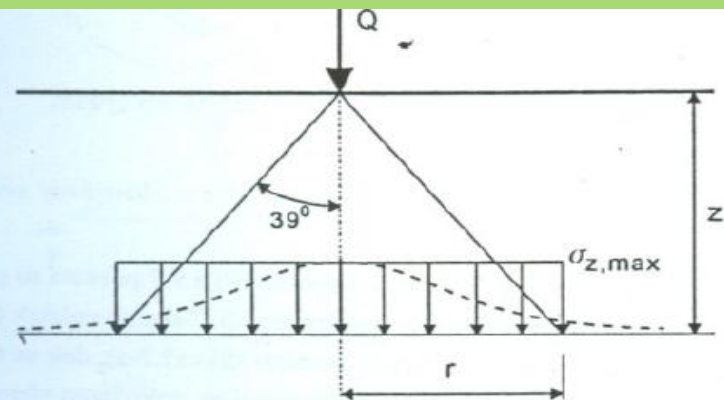
Naponi usljed površinskih opterećenja

Promjena naponskog stanja u tlu usljed opterećenja dodatnim silama na površini ili na relativno maloj dubini može se odrediti različitim aproksimativnim postupcima jer je realnu fizičku heterogenost materijala i njegovo složeno naponsko i deformaciono ponašanje nemoguće obuhvatiti sa nekom apsolutnom tačnošću.



Slika 7.4. Vertikalni naponi usljed sopstvene težine tla i koncentrisane sile

PRIBLIŽNO RJEŠENJE



Slika 7.5. Približno rešenje za vertikalne napone ispod koncentrisane sile

Zona uticaja je ovdje predstavljena konusom između kosih linija, a čitav postupak u opštem slučaju poznat je pod pretpostavkom "*rasprostiranje napona pod uglom*". Iz uslova ravnoteže: Q

$$Q = \sigma_{z,max} \cdot r^2 \cdot \pi = \sigma_{z,max} \cdot z^2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}^2 39^\circ$$

Slijedi:

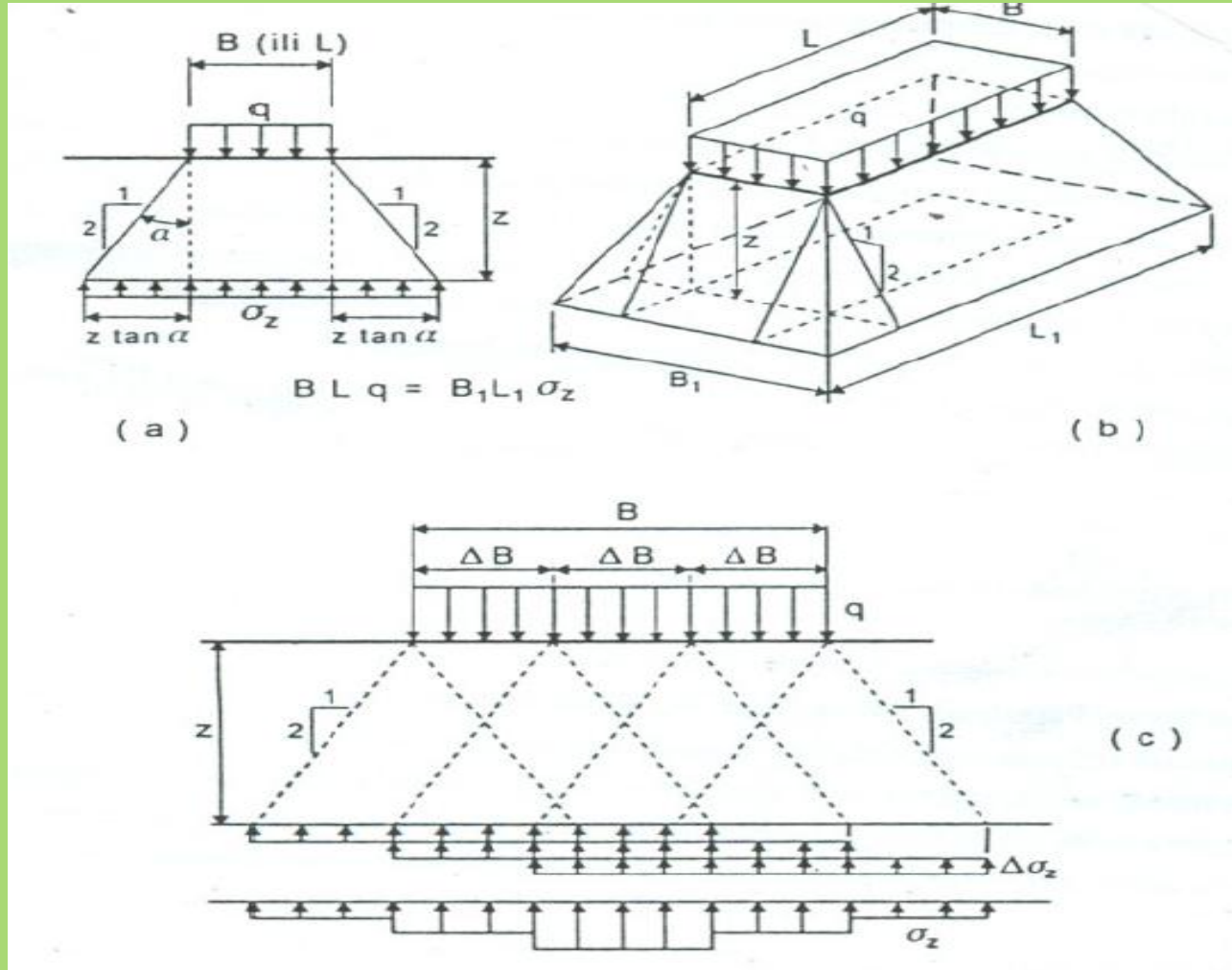
$$\sigma_{z,max} = \frac{3 \cdot Q}{2\pi \cdot z^2}$$

Za jednako podjeljene površine kružnog ili pravougaonog oblika obično se pretpostavi ugao rasprostiranja napona tako da je

$$\operatorname{ctga} = 2.$$



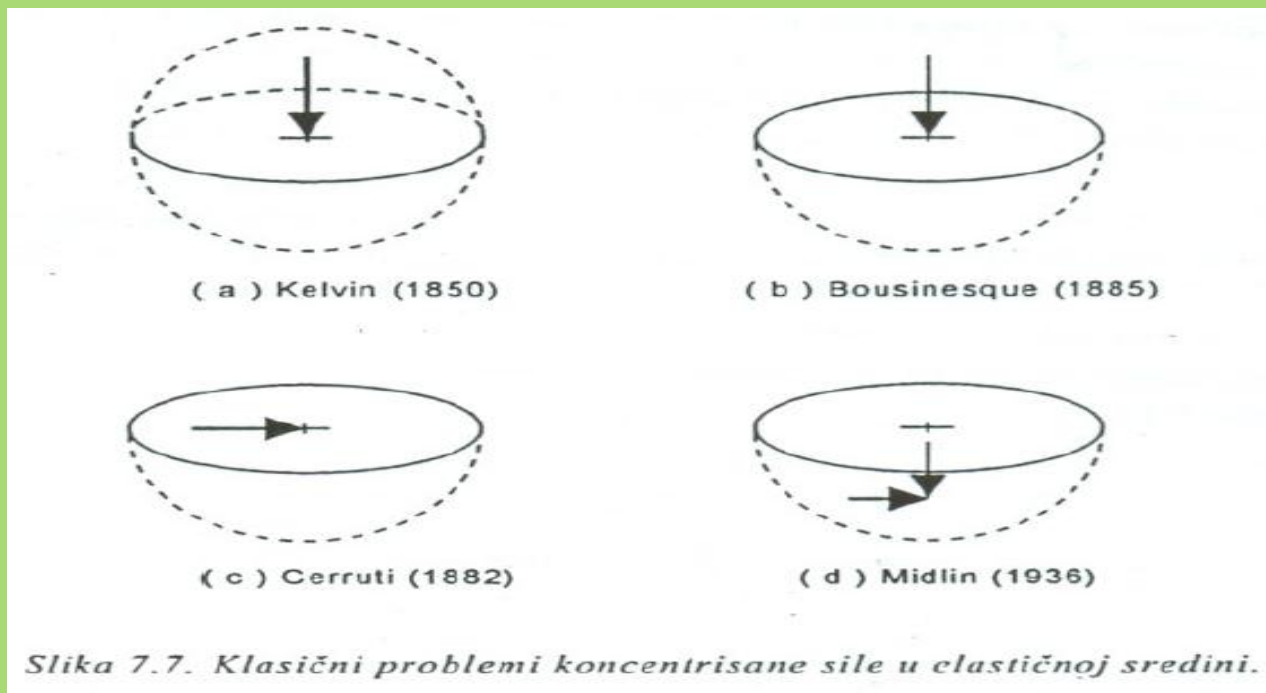
$$\sigma_z = \frac{q \cdot B \cdot L}{[(B+z) \cdot (L+z)]}$$



Slika 7.6. Aproximativno rešenje za vertikalne napone ispod pravougaone opterećene površine

Naponi i slijeganja na osnovu rešenja teorije elastičnosti

Zajednička pretpostavka u ovim rešenjima je; **da elastična sredina nema težinu** i u praktičnoj primjeni u rješavanju različitih zadataka izračunati naponi usljed opterećenja predstavljaju priraštaje komponentnih napona koje treba dodati početnim, geostatičkim komponentalnim naponima.



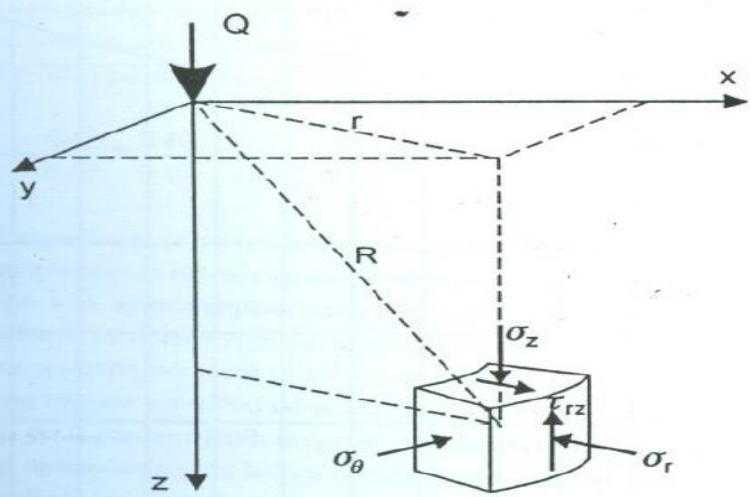
Za određivanje veličina napona usljed vertikalnih opterećenja najviše se primjenjuje rješenje Businesska, koje predstavlja osnovu i za druga izvedena rješenja za praktičnu primjenu

$$\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (7.9)$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{3rz^2}{(r^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{(1-2\nu)}{r^2 + z^2 + z(r+z)^{1/2}} \right) \quad (7.10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Q}{2\pi} (1-2\nu) \left(\frac{z}{(r^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{1}{r^2 + z^2 + z(r+z)^{1/2}} \right) \quad (7.11)$$

$$\tau_{rz} = \frac{3Qrz^2}{2\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (7.12)$$



Slika 7.8: Komponentalni naponi u tački elastičnog poluprostora usled koncentrisane sile na površini

Vertikalni napon može se napisati i u obliku:

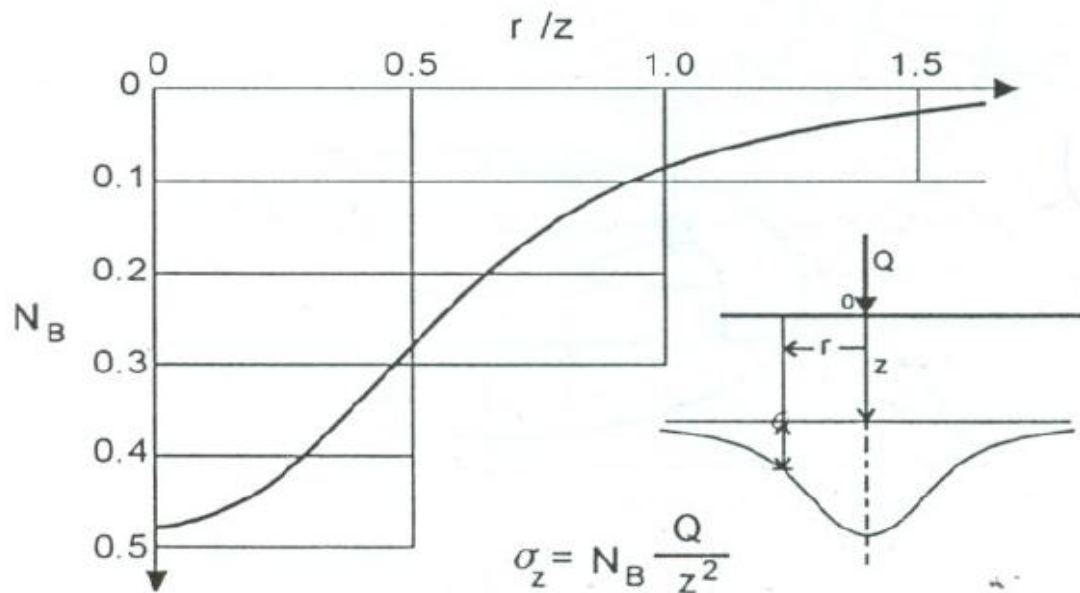
$$\sigma_z = N_B \cdot \frac{Q}{z^2}$$

Gdje je:

$$N_B$$

uticajni koeficijent koji zavisi od odnosa r/z :

$$N_B = \frac{3}{2\pi} \left(\frac{1}{1 + r^2/z^2} \right)^{5/2}$$



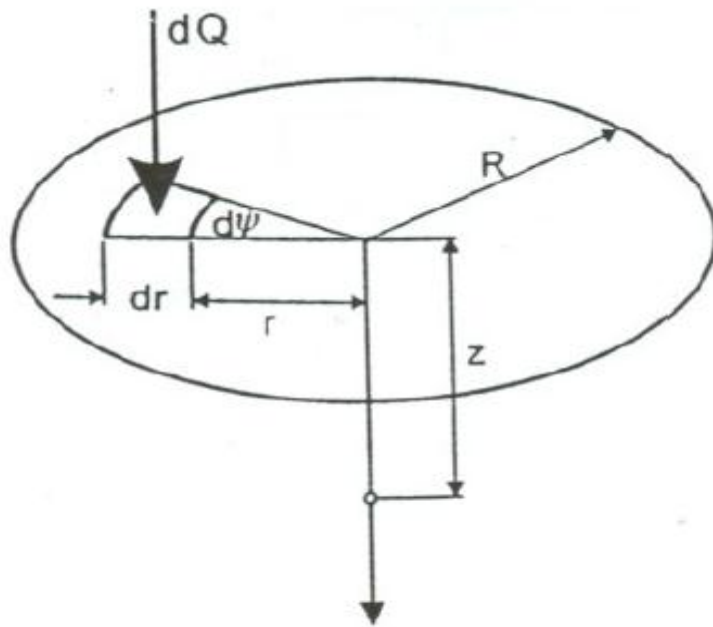
Slika 7.9. Uticajni koeficijent za određivanje vertikalnih napona

Ako se opterećena površina podijeli na infinitezimalne površine dA , odgovarajuće male koncentrisane sile dQ su intenziteta: $dQ = q \cdot dA$

Vertikalni napon usljed ovog infinitezimalnog opterećenja je:

$$d\sigma_z = \frac{3 dQ z^3}{2 \pi R^5} = \frac{q}{2 \pi} \frac{3 z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} dA$$

a ukupna veličina vertikalnog napona σ_z se može odrediti integriranjem po opterećenoj površini.



Slika 7.10. Integrisanje uticaja po kružnoj opterećenoj površini za tačke na vertikali kroz centar

Prema tome:

$$\sigma_z = \frac{q}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{3z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} dA = q \left(1 - \frac{1}{(R^2/z^2 + 1)^{3/2}} \right)$$

ili kraće:

$$\sigma_z = q \cdot N_z$$

gdje je N_z uticajni koeficijent koji zavisi samo od odnosa z/R .

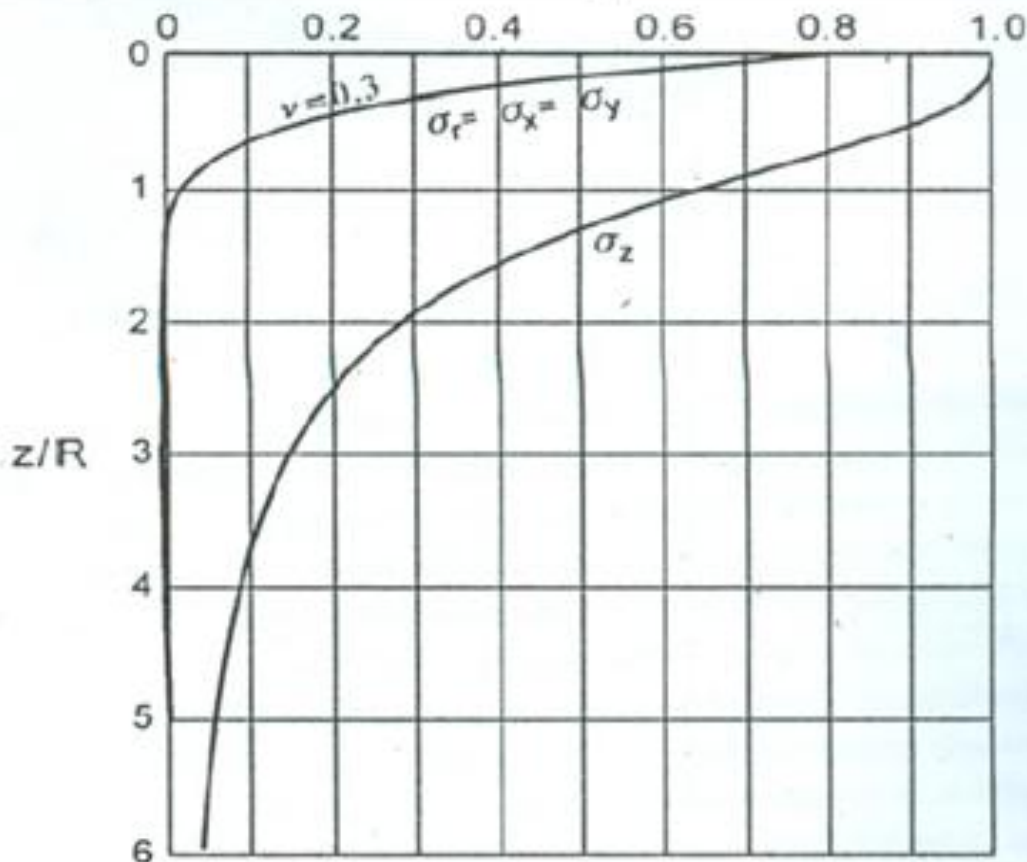
Na sličan način
može se
integrirati izraz
za radijalni
napon i dobija

se:



$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left((1 + 2\nu) - \frac{2(1 + \nu)}{(R^2/z^2 + 1)^{1/2}} + \frac{1}{(R^2/z^2 + 1)^{3/2}} \right)$$

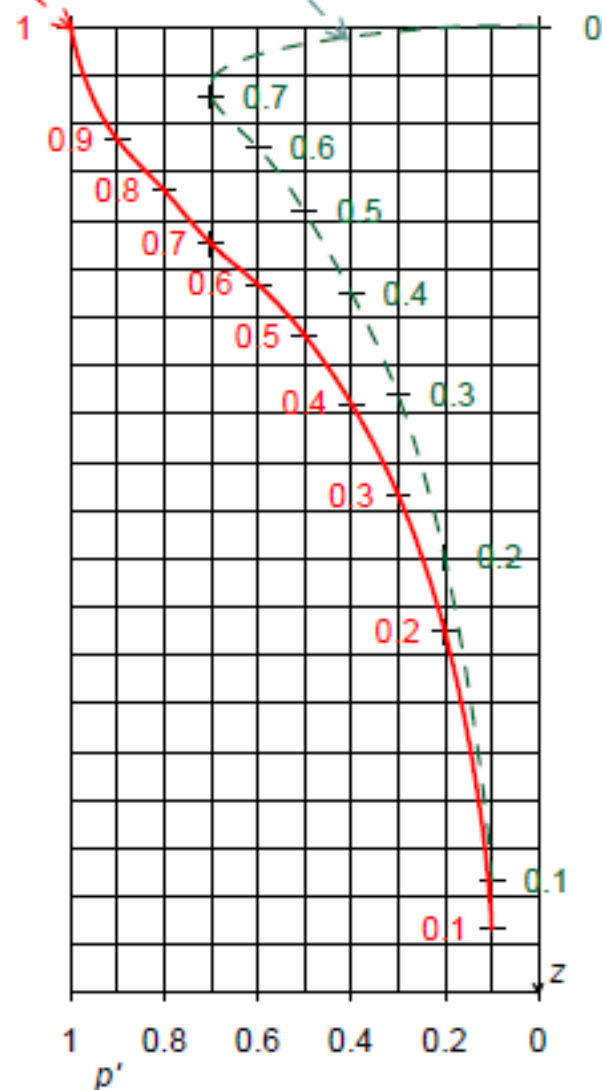
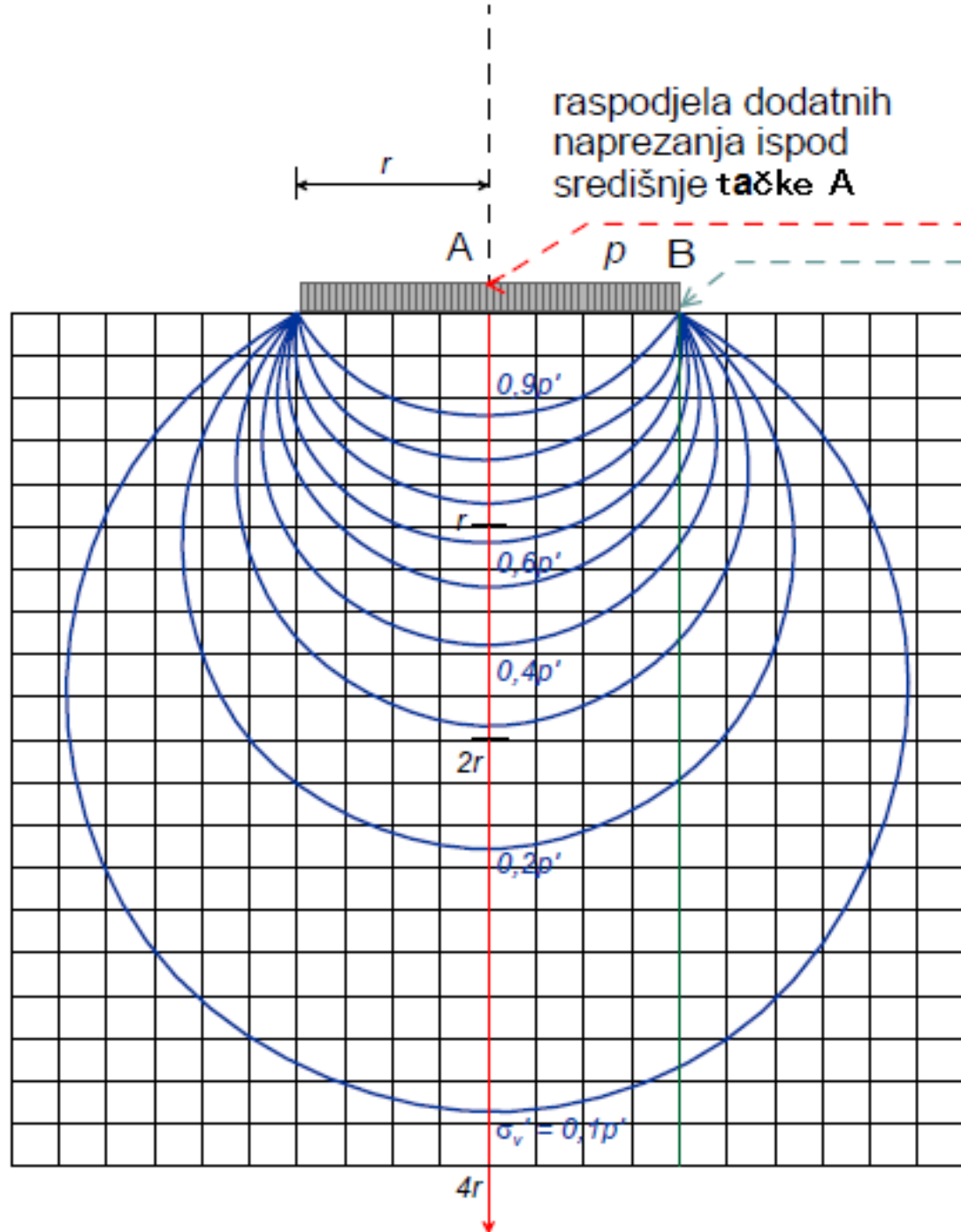
ili kraće: $\sigma_r = q \cdot N_r$



Slika 7.11. Raspodela vertikalnih i horizontalnih napona ispod centra kruga opterećenog podjeljenim opterećenjem

raspodjela dodatnih napreznja ispod središnje tačke A

raspodjela dodatnih napreznja ispod rubne tačke B (neposredno s vanjske strane, gdje je rubno napr. $p=0$)



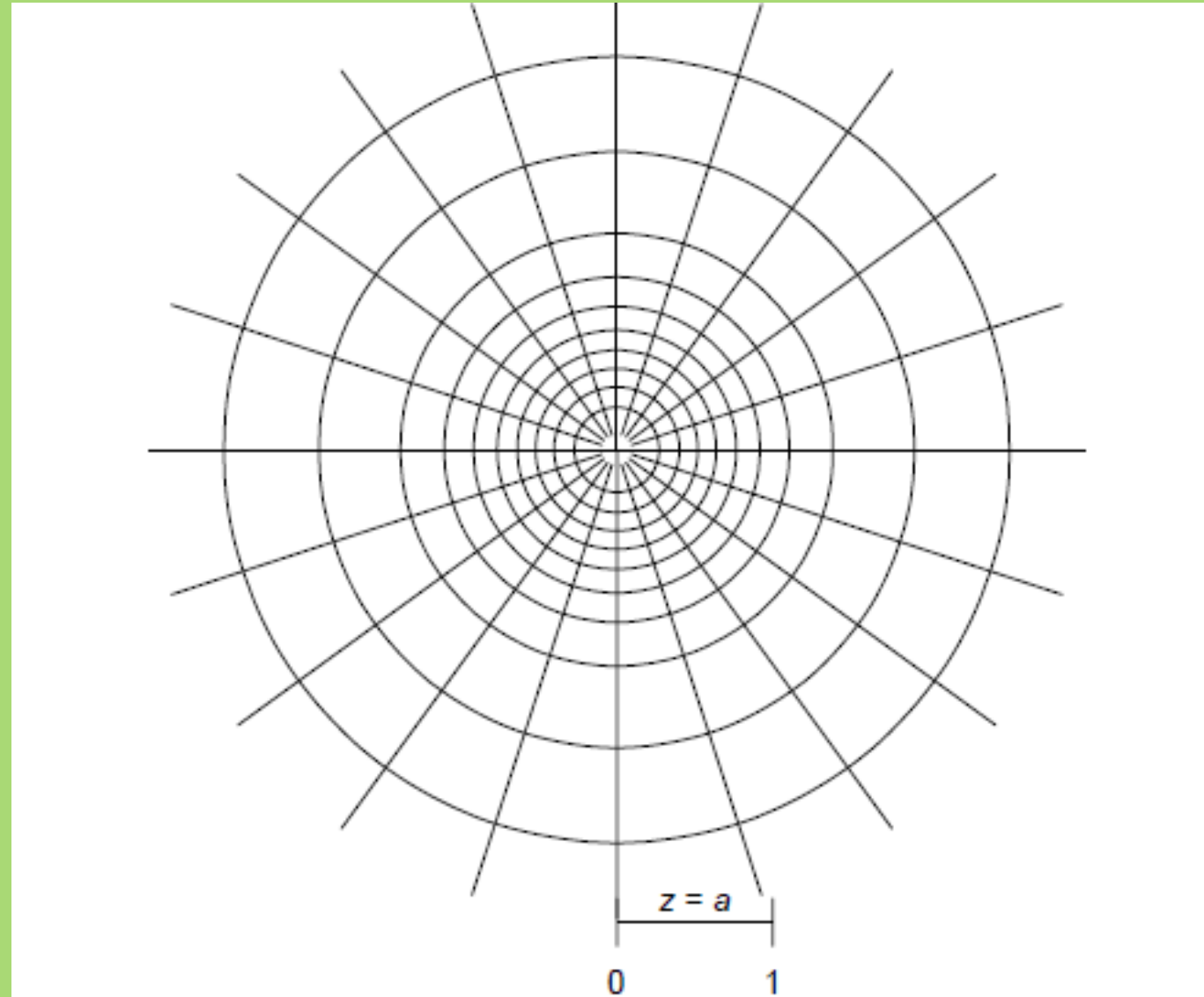
Uticaj svake površnice ograničene lukovima jednog prstena i susjednim radijalnim pravcima iznosi:

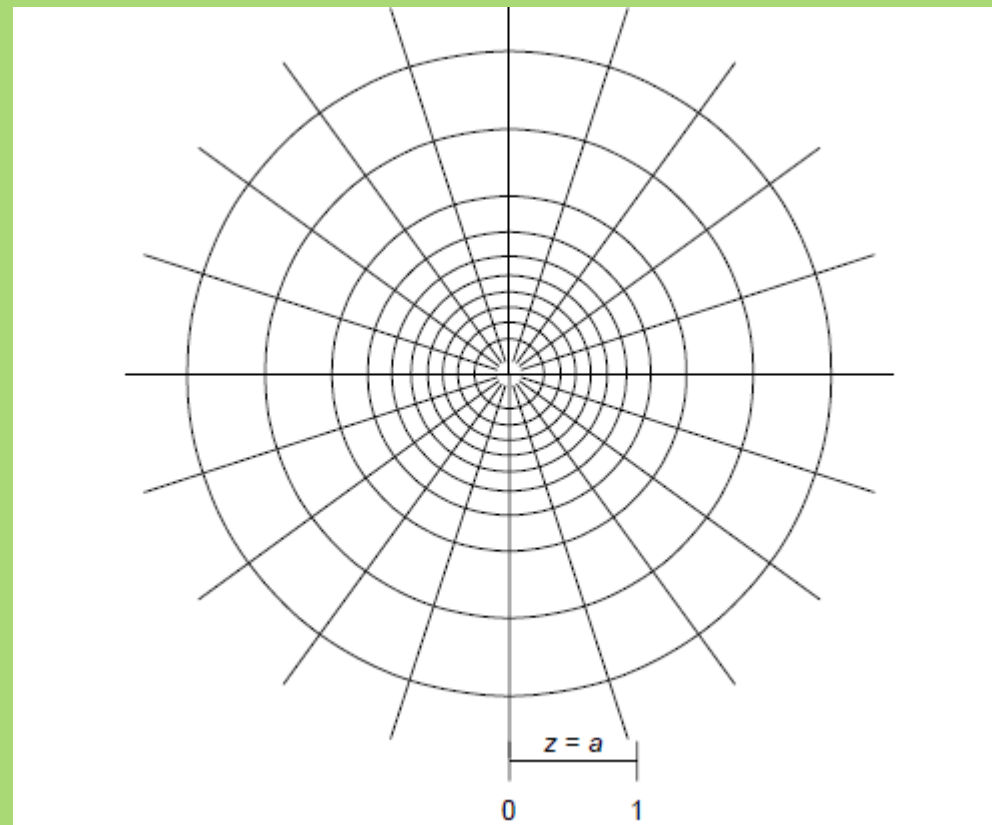
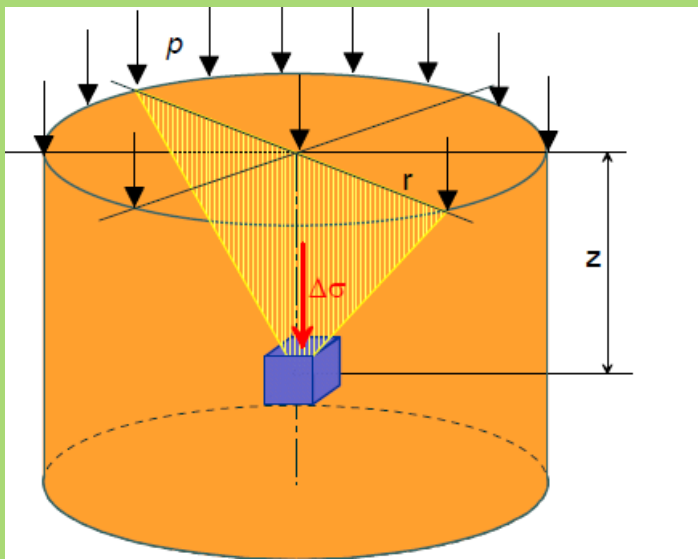
$$\Delta\sigma_z = (1/10) \cdot (1/20)q = 0,005q$$

Napon se izračunava po formuli:

$$\sigma_z = 0,005nq$$

gdje je **0.005** uticajna vrijednost jedne površnice, a ***n*** broj uticajnih površnica koje opterećenje pokriva





$$\Delta\sigma_v = p \cdot I_c$$

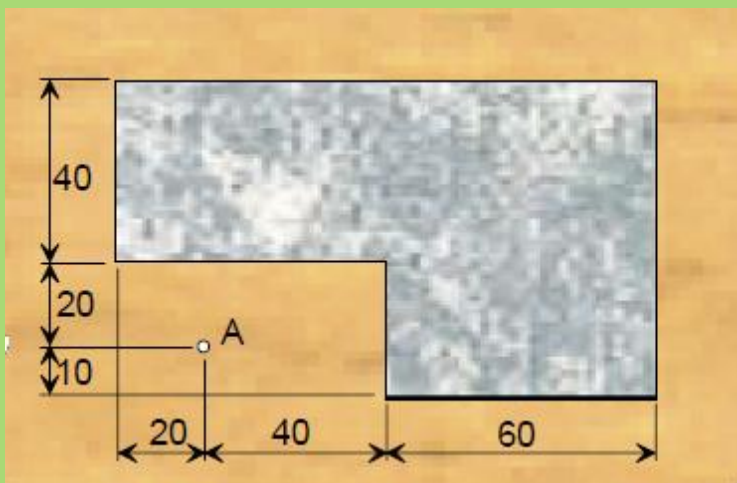
$$\Delta\sigma_v = p \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{r}{z} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \right\}$$

$$\frac{r}{z} = \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta\sigma_v}{p} \right)^{\frac{2}{3}} - 1}$$

| | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| <i>N</i> | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,95 | 1,0 |
| <i>r/z</i> | 0,270 | 0,400 | 0,518 | 0,637 | 0,766 | 0,918 | 1,110 | 1,387 | 1,908 | 2,523 | : |

Primjer :-1

Zadan je temelj dimenzija prema slici dolje, s *kontaktnim opterećenjem* $p_k = 250 \text{ kN/m}^2$. Odredi dodatno vertikalno naprezanje ispod tačke **A**, na dubini od **80 m**, pomoću **Newmark**-ove mreže



Rješenje:

Na Newmark-ovu mrežu za određivanje naprezanja ispod temelja proizvoljnog oblika potrebno je ucrtati zadani temelj, i to na sljedeći način:

- prvo odredimo mjerilo tako da nam dužina **01** odgovara dubini tačke (**A**) u kojoj određujemo naprezanje ($z = 80 \text{ m}$)
- zatim u tom mjerilu nacrtamo zadani temelj, s tačkom **A** u centru Newmark-ove mreže
- izbrojimo koliko segmenata Newmark-ove mreže pokriva (ili djelomično pokriva) temelj (**n**)
- uticajni faktor jednog segmenta naznačen je na mreži (**I**)
- dodatno naprezanje izračunamo prema formuli



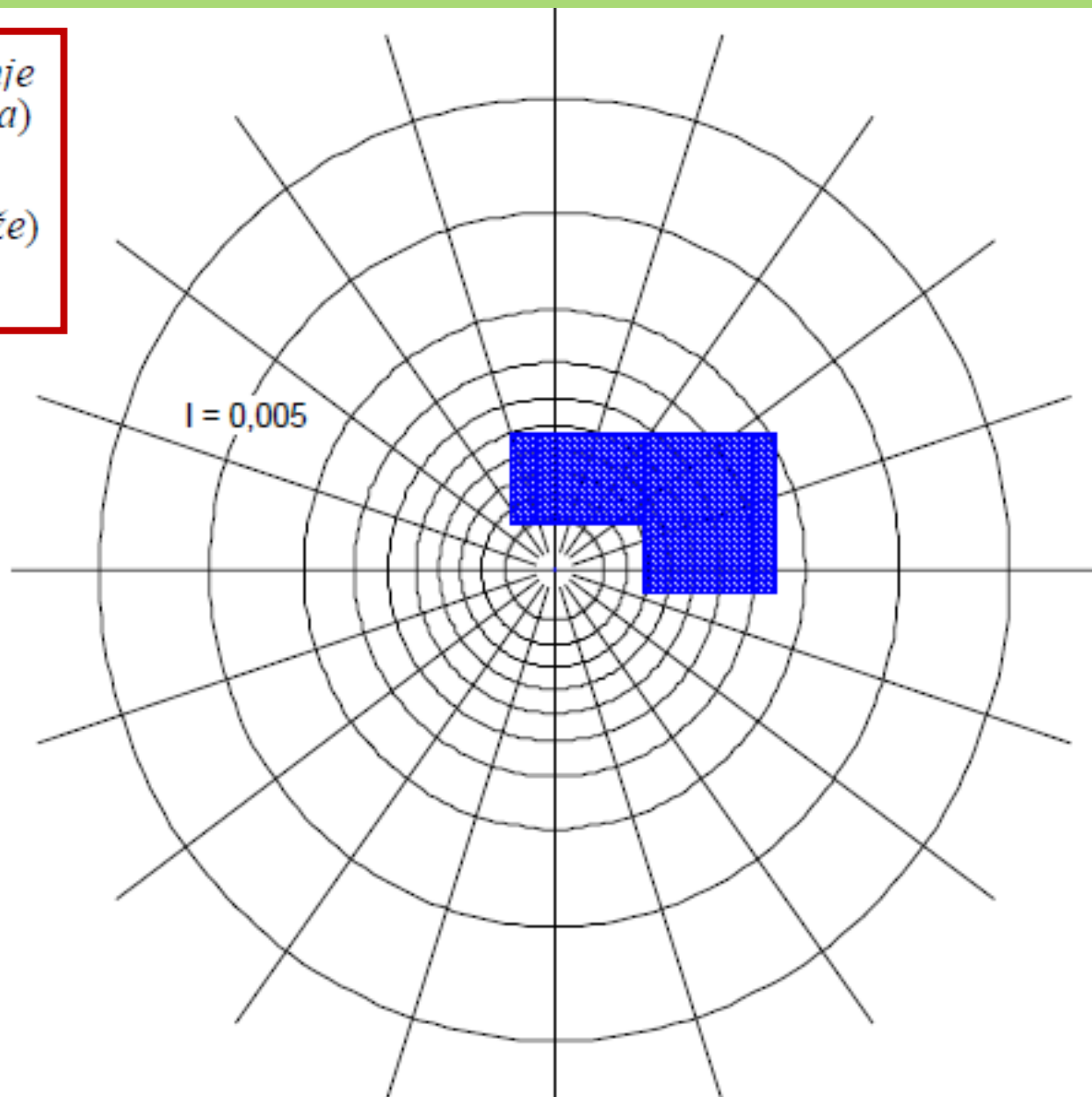
$$\Delta\sigma_v = p_k \cdot n \cdot I \left[\text{kN} / \text{m}^2 \right]$$

$p_k = 250 \text{ kN/m}^2$ (opterećenje temelja)

$I = 0,005$ (utjecajni faktor jednog segmenta mreže)

$n = 31$ (broj segmenata)

Rješenje:



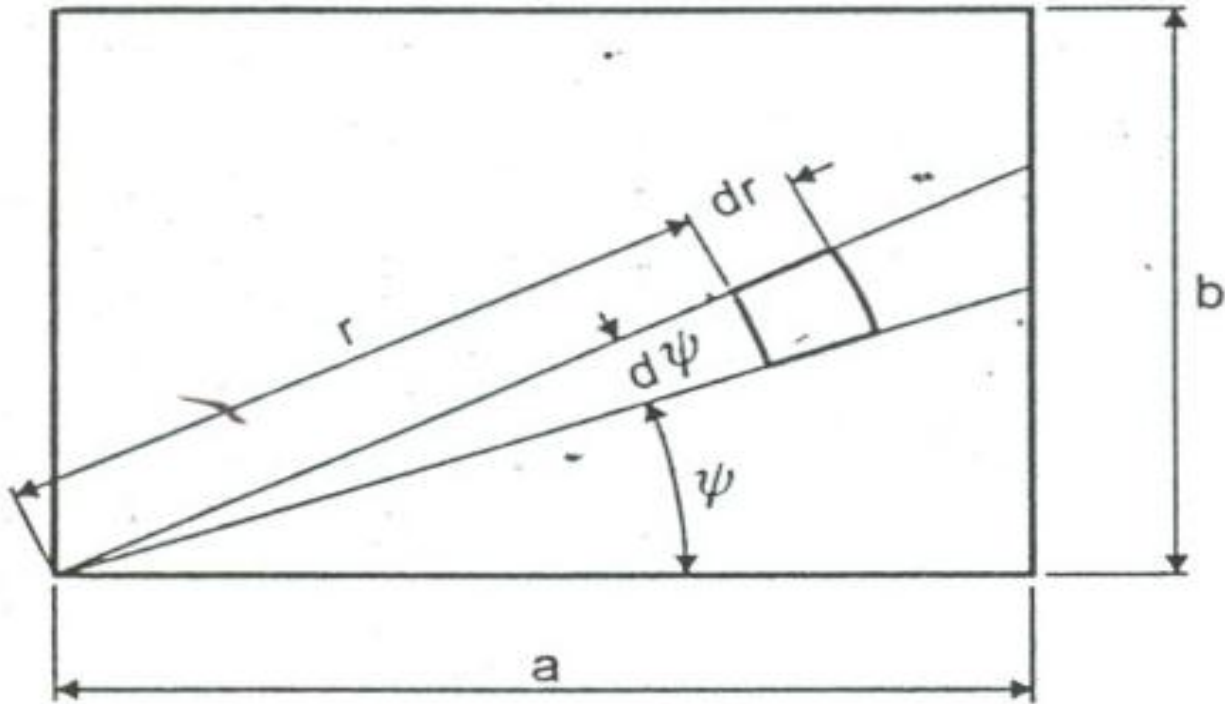
$$\Delta\sigma_v = p_k \cdot n \cdot I = 250 \cdot 31 \cdot 0,005 = 38,75 \text{ kN/m}^2$$

(dodatno naprezanje)

$z = a$
80 m
0 1

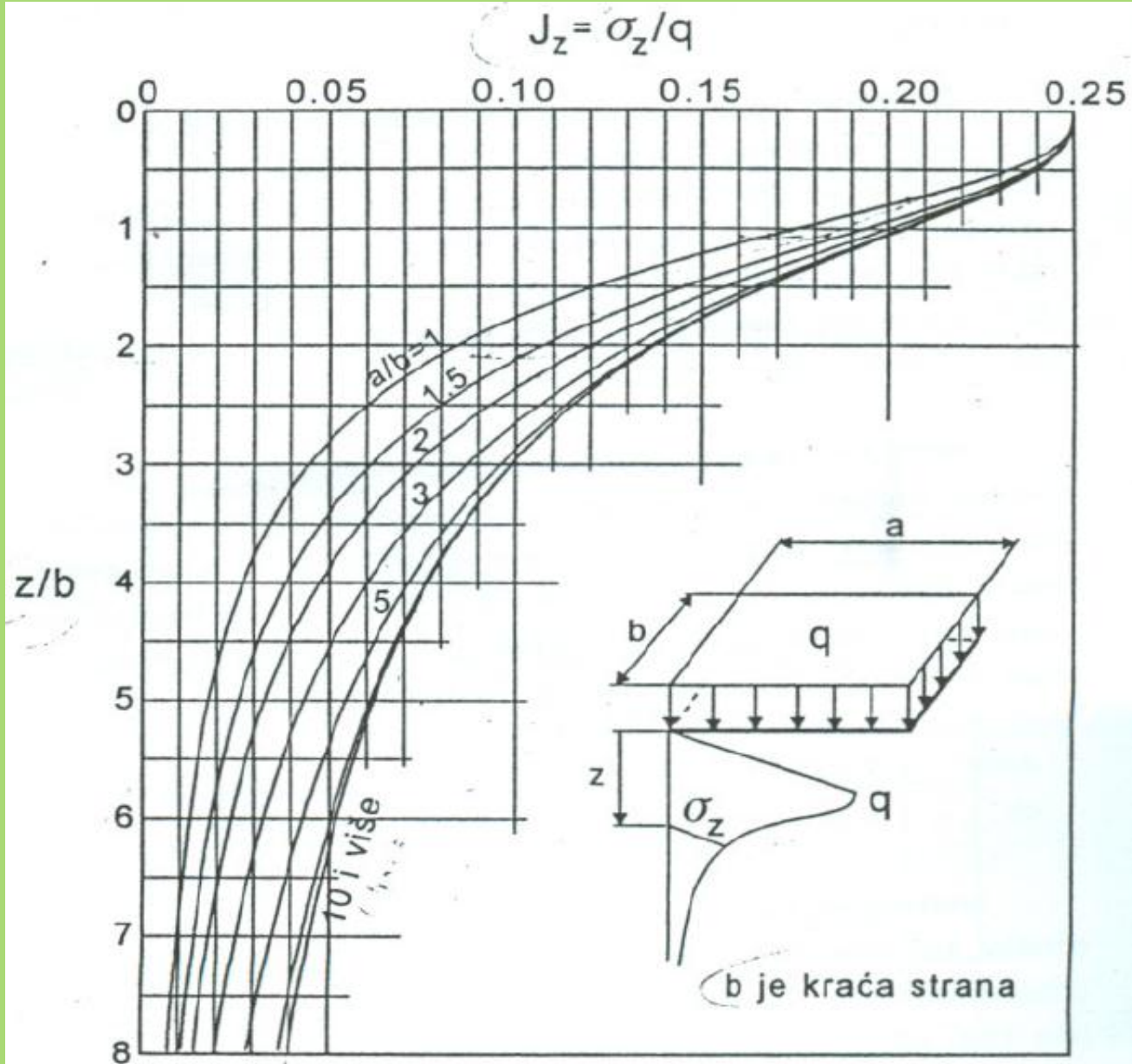
Ukoliko razmatramo raspodjelu vertikalnih napona na vertikalnoj liniji koja prolazi kroz jedan ugao pravougaonika, onda je slično kao i ranije:

$$dQ = qdA = qrd\psi dr$$



Slika 7.13. Integrisanje uticaja po pravougaonoj opterećenoj površini

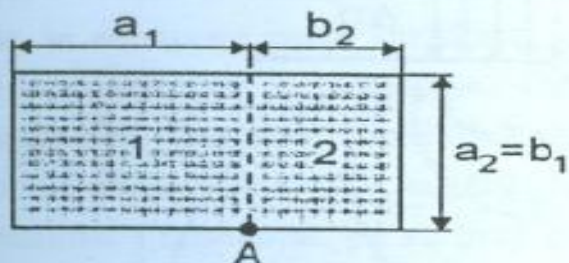
Integrisanjem se dobija relativno dug izraz koji je izveo **Štajnbrener**.



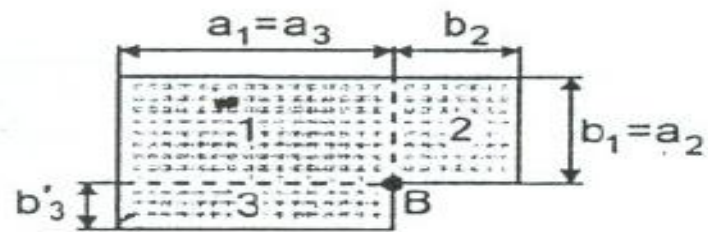
Slika 7.14. Štajnbrenerov dijagram za određivanje vertikalnih napona

$$\sigma_z = q \cdot I_z$$

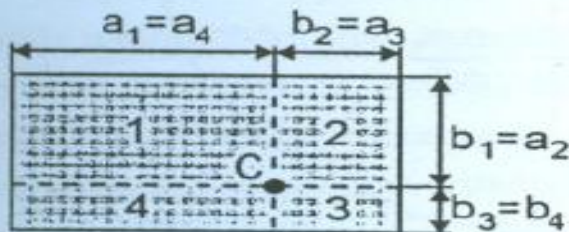
gdje je I_z uticajni koeficijent koji zavisi od proporcija a/b pravougaone opterećene površine i dubine z .



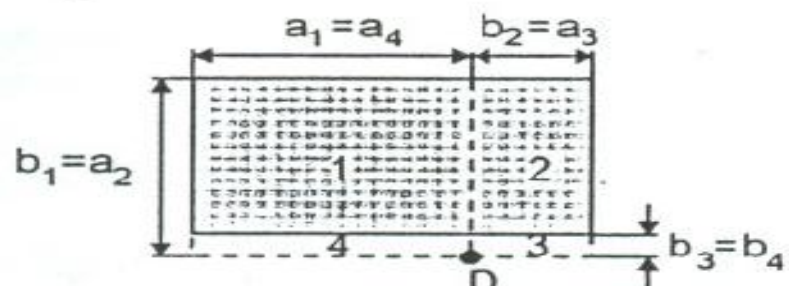
$$J_A = J_1 + J_2$$



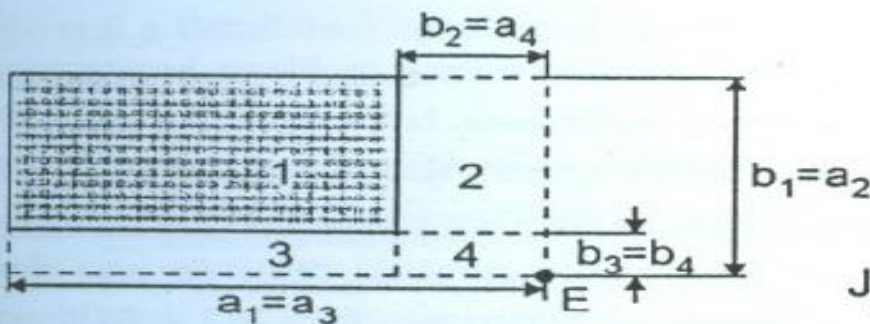
$$J_B = J_1 + J_2 + J_3$$



$$J_C = J_1 + J_2 + J_3 + J_4$$

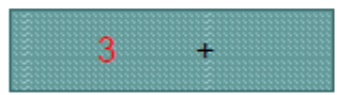
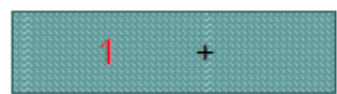
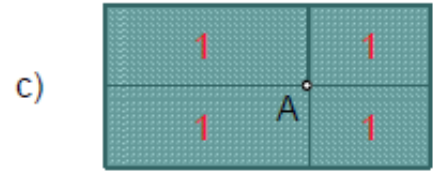
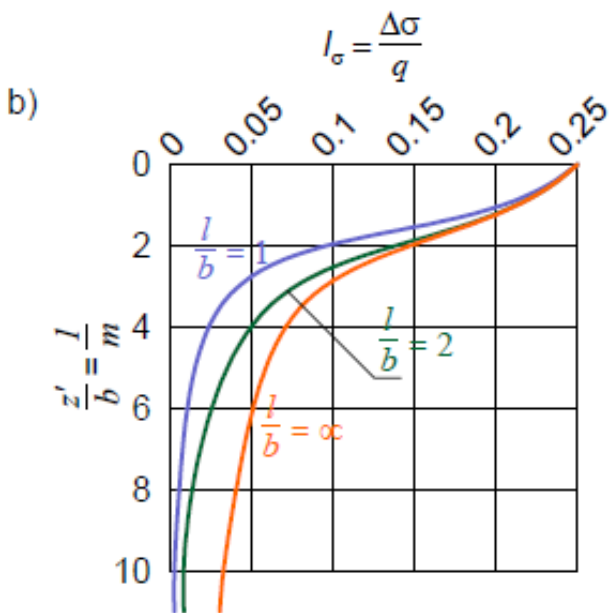
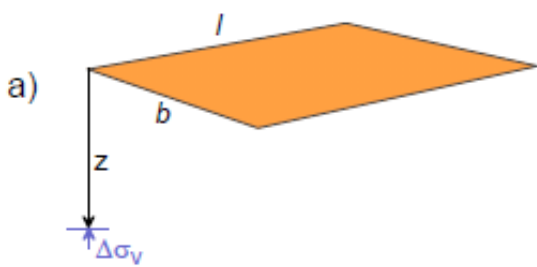


$$J_D = J_1 + J_2 - J_3 - J_4$$



$$J_E = J_1 - J_2 - J_3 + J_4$$

Slika 7.15. Primeri superpozicije pri izračunavanju vertikalnih napona primenom rešenja Štajnbrenera



A: $I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$

B: $I = I_1 + I_2 - I_3 - I_4$

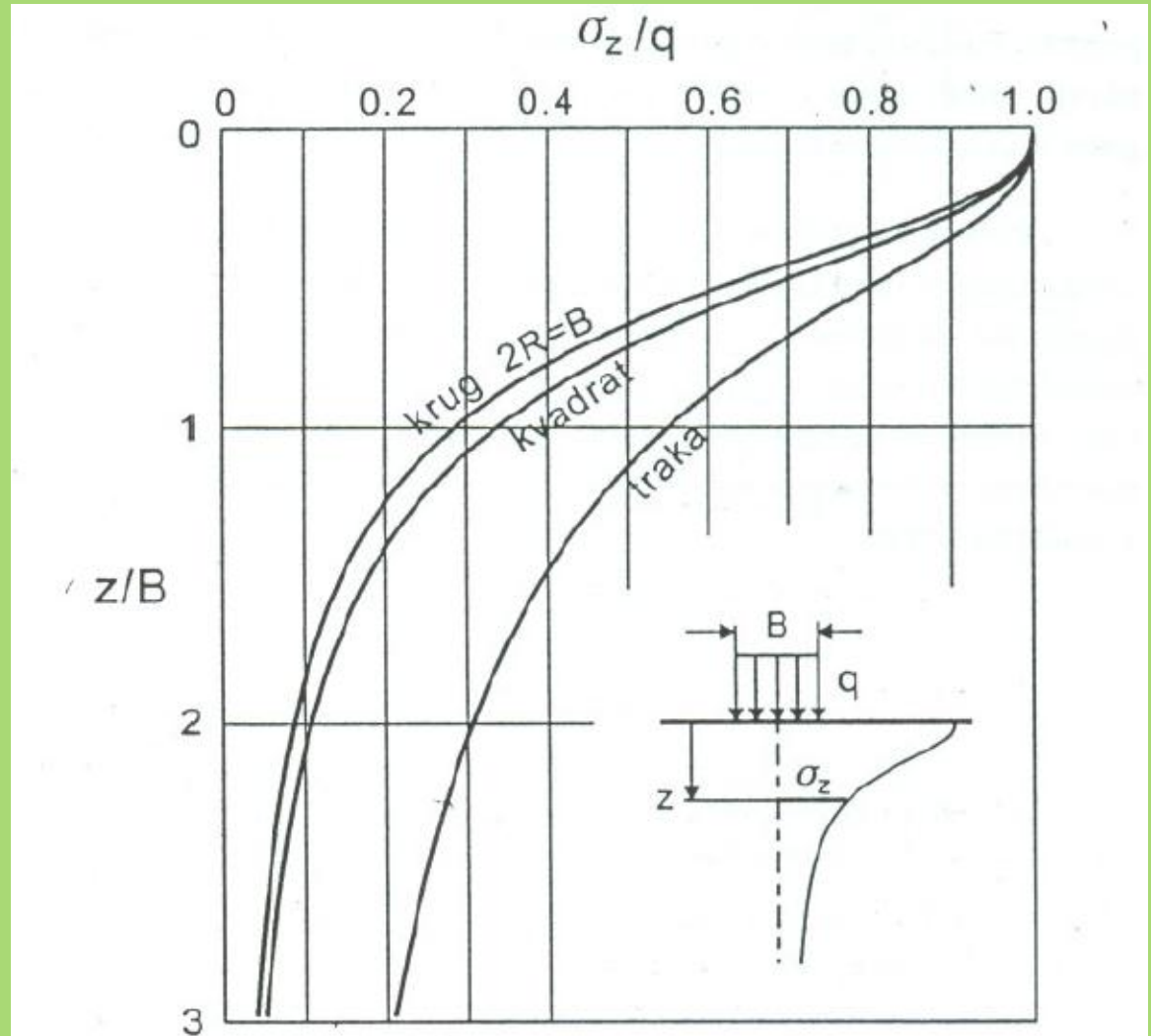
a) shema za proračun dodatnih vertikalnih napreznja ispod ugla pravougaone površine, b) dijagram uticajnog koeficijenta I , c) shema površina za proračun napreznja ispod unutrašnje i d) vanjske tačke na površini

Numeričku vrijednost za uticajni koeficijent I , ispod ugla pravougaone opterećene površine, prema Newmarku (Newmark, 1935, iz Terzaghi, 1943):

$$I = \frac{1}{4\pi} \frac{2mn(m^2 + n^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{m^2 + n^2 - m^2n^2 + 1} \cdot \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \operatorname{tg}^{-1} \frac{2mn(m^2 + n^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1}$$

gdje je $m = b/z$, a $n = l/z$.

" b " je uvijek kraća stranica elementarnog pravougaonika koji se koristi u izračunavanju bezdimenzionalnih odnosa a/b i z/b radi očitavanja uticajnog koeficijenta I_z za odgovarajući elementarni pravougaonik.

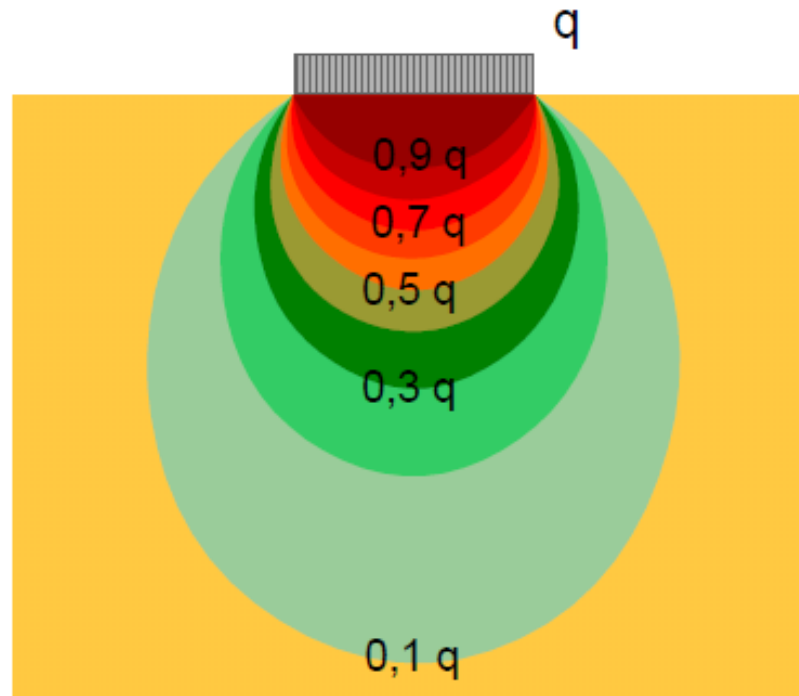
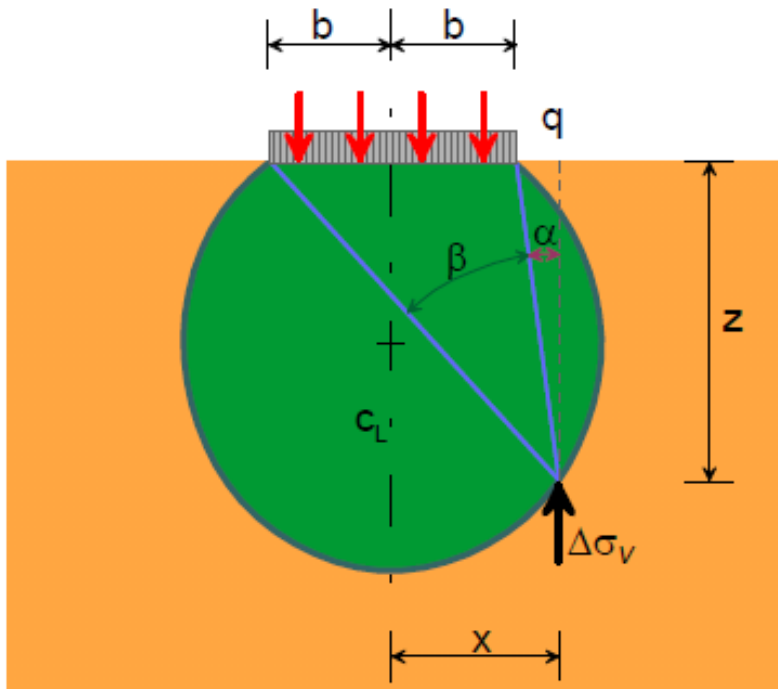


Slika 7.16. Vertikalni naponi po centralnoj vertikali ispod podijeljenog opterećenja

Dodatna naprezanja ispod trakastog opterećenja

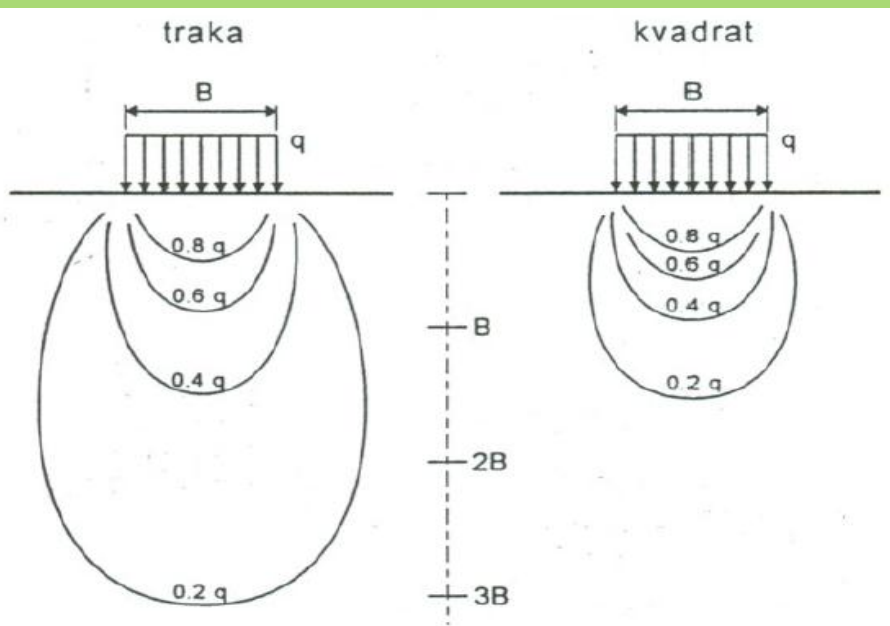
Ako je jedna dimenzija vrlo dugačka, možemo temelj smatrati tzv. “*beskonačnom trakom*”, za koju je izraz dao Terzaghi (1943):

$$\Delta\sigma_v = q \cdot I_s, \text{ gdje je } I_s = [\beta + \sin \beta \cdot \cos(\beta + 2\alpha)] / \pi$$

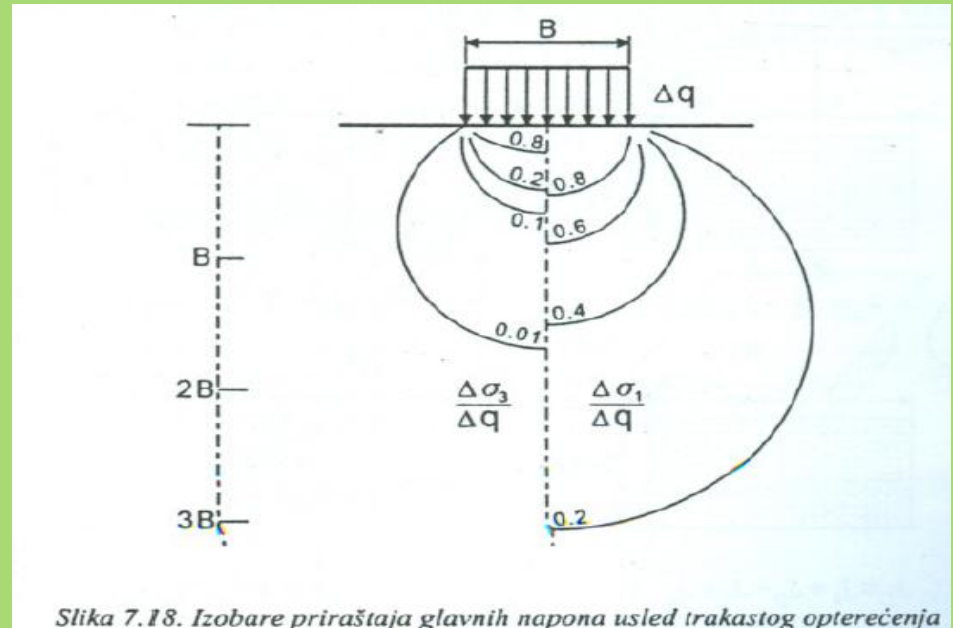


Shema za proračun dodatnih vertikalnih naprezanja

Prikaz širenja dodatnih vertikalnih naprezanja ispod trakastog temelja



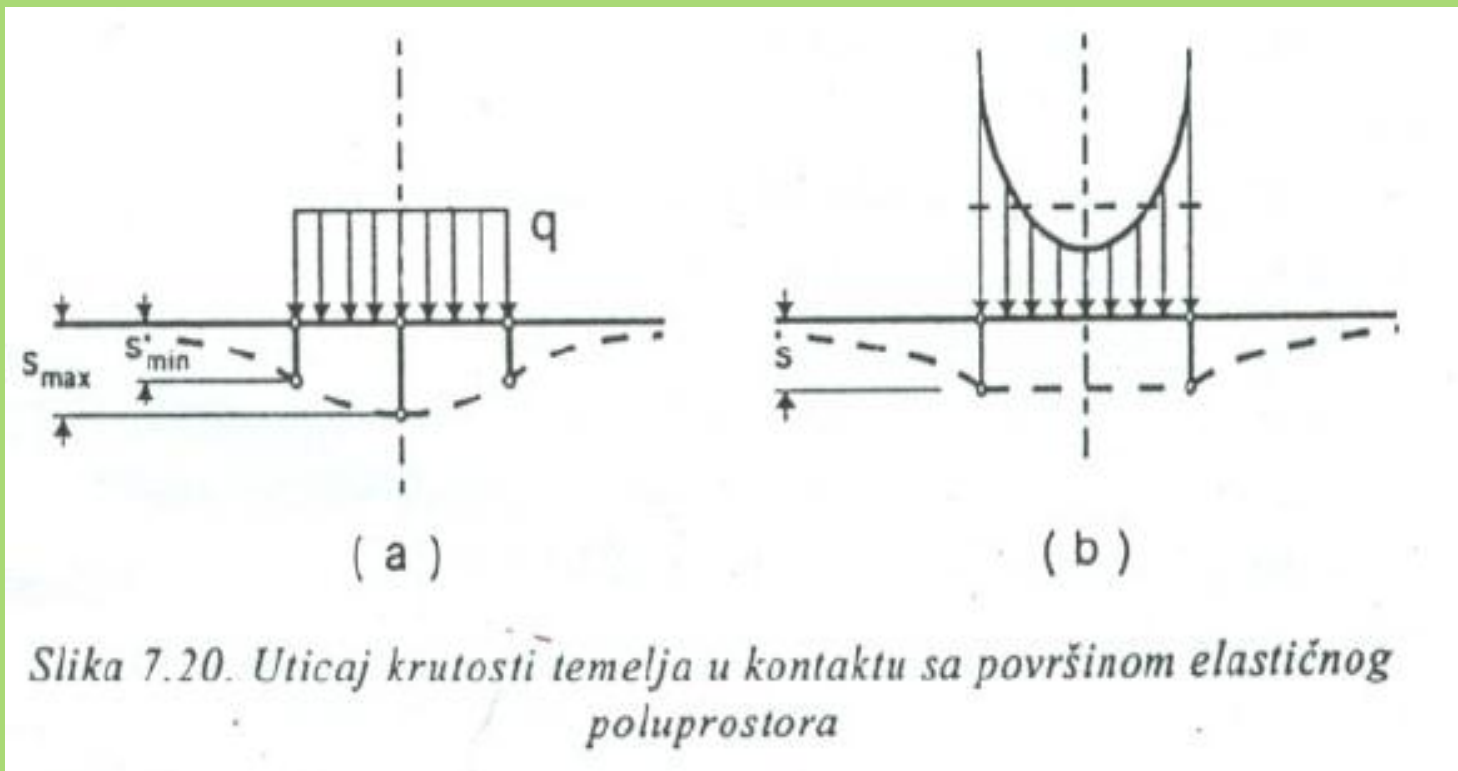
Slika 7.17. Izobare vertikalnih napona ispod trake i kvadrata



Slika 7.18. Izobare priraštaja glavnih napona usled trakastog opterećenja

Priraštaj minimalnog glavnog napona opada sa dubinom znatno brže od priraštaja maksimalnog glavnog napona, dok obe komponente priraštaja relativno brzo opadaju po horizontali

Sleganje opterećene površine će najčešće imati oblik sa maksimalnom veličinom u centralnom području, a najmanjom na krajevima. Međutim, konstrukcije temelja građevinskih objekata su manje ili više krute konstrukcije, tako da centrično opterećena kruta ploča ima jednaka sleganja u svim tačkama na kontaktu sa površinom tla.

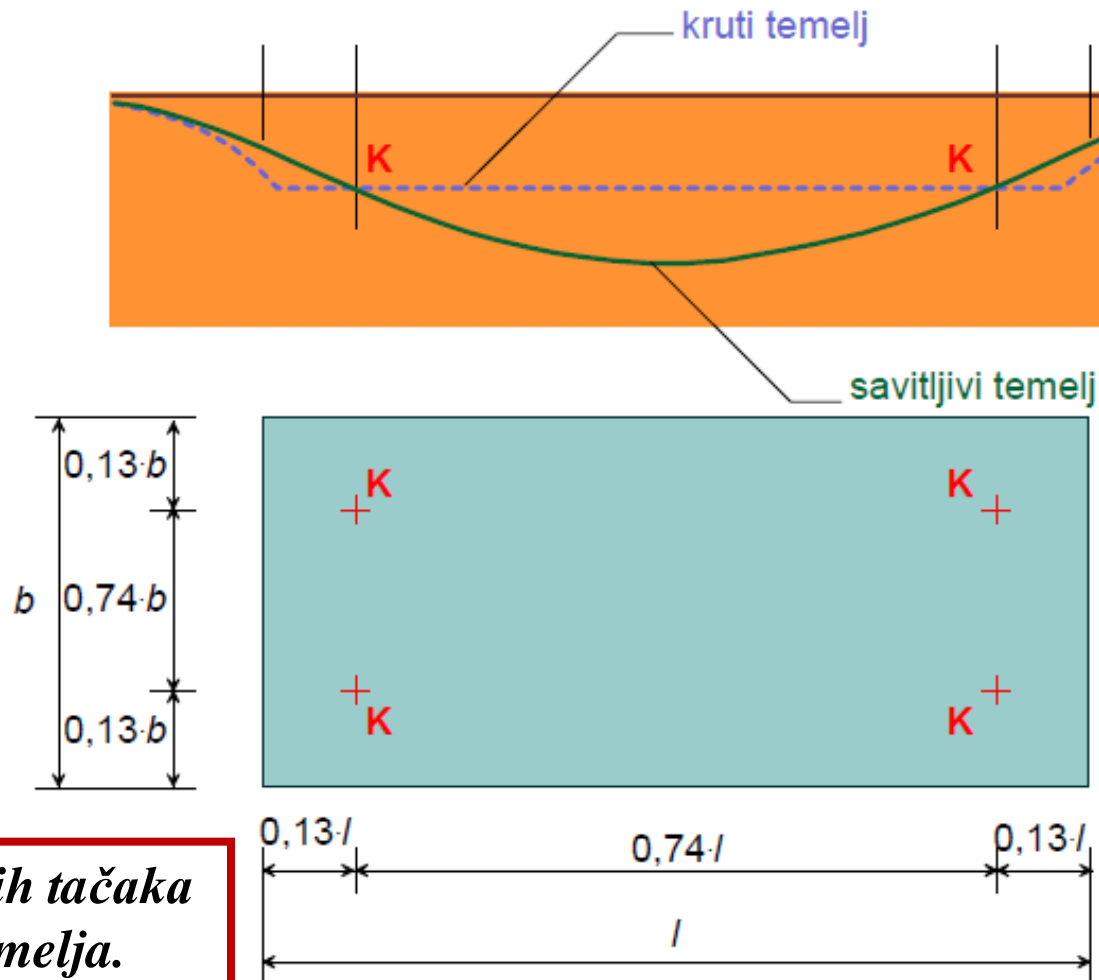


Da bi se izazvala jednaka sleganja mora doći do preraspodjele kontaktnih napona tako da bi se naponi povećali prema ivicama i smanjili u centralnom dijelu pod uslovom da je poluprostor elastičan.

Ako je krutost temelja velika ($EI = \infty$), a opterećenje na površini temelja jednoliko rasprostrto, sve tačke temelja sliježu se jednako. Ako je pak, krutost temelja mala do vrlo mala ($EI = 0$), slijeganja su u formi udubljene plohe (sl.).

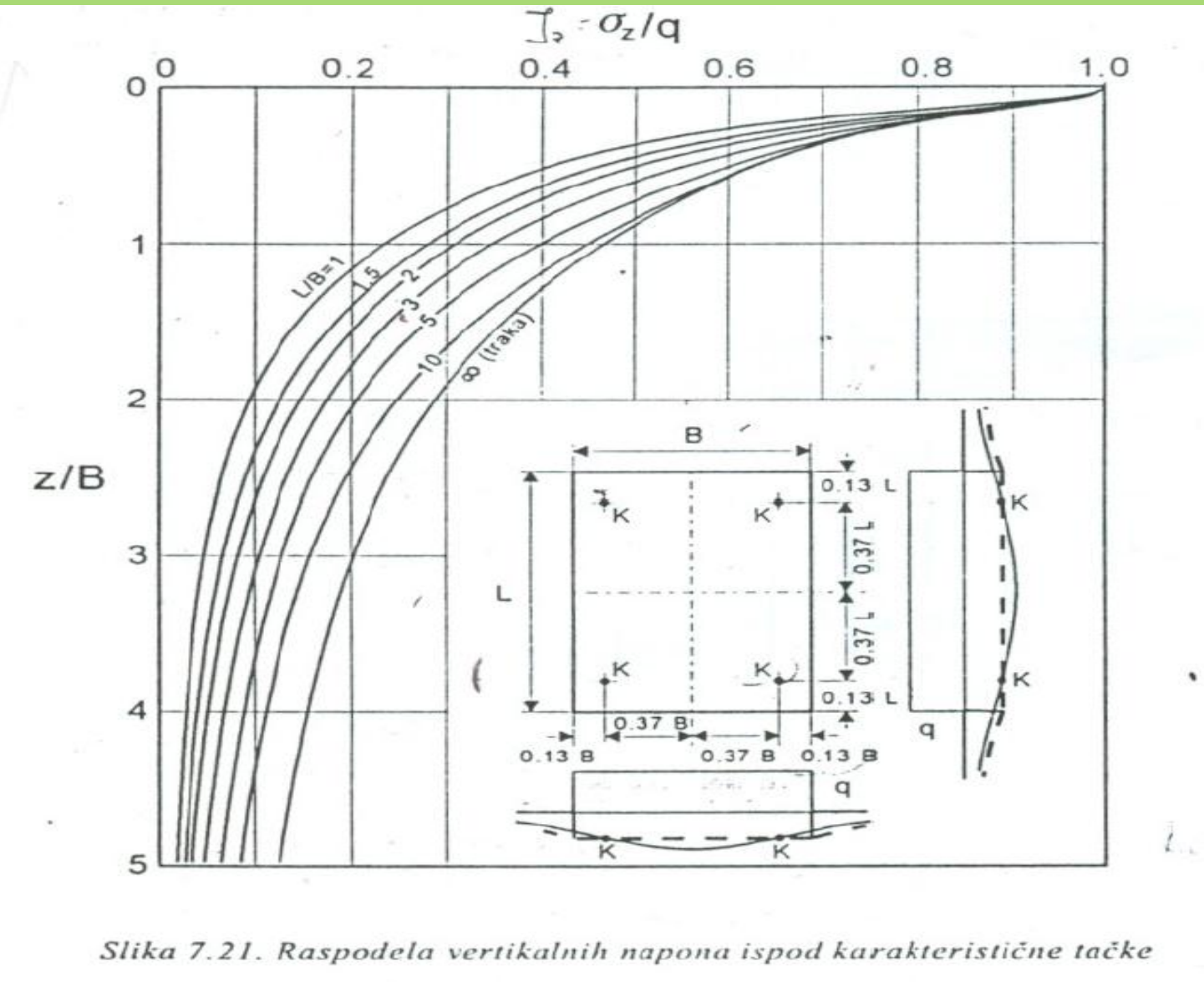
Za sve krutosti temelja postoje tačke u kojima su slijeganja jednaka (Grasshoff, 1951) i zovu se karakteristične tačke.

Položaji karakterističnih tačaka su prikazani na sl.. Kod proračuna slijeganja, veličine slijeganja proračunavaju se najčešće upravo za te tačke. Naime, ako kroz tu tačku prolazi linija slijeganja za vrlo kruti i za vrlo savitljivi temelj, onda će kroz nju prolaziti i linije slijeganja za temelje svih ostalih krutosti.



Položaji karakterističnih tačaka ispod pravougaonog temelja.

Za temelje pravougaonog oblika rješenje opisanog problema se svodi na određivanje položaja ekvivalentnih tačaka koje se nalaze na dijagonalama pravougaonika.



Slika 7.21. Raspodela vertikalnih napona ispod karakteristične tačke

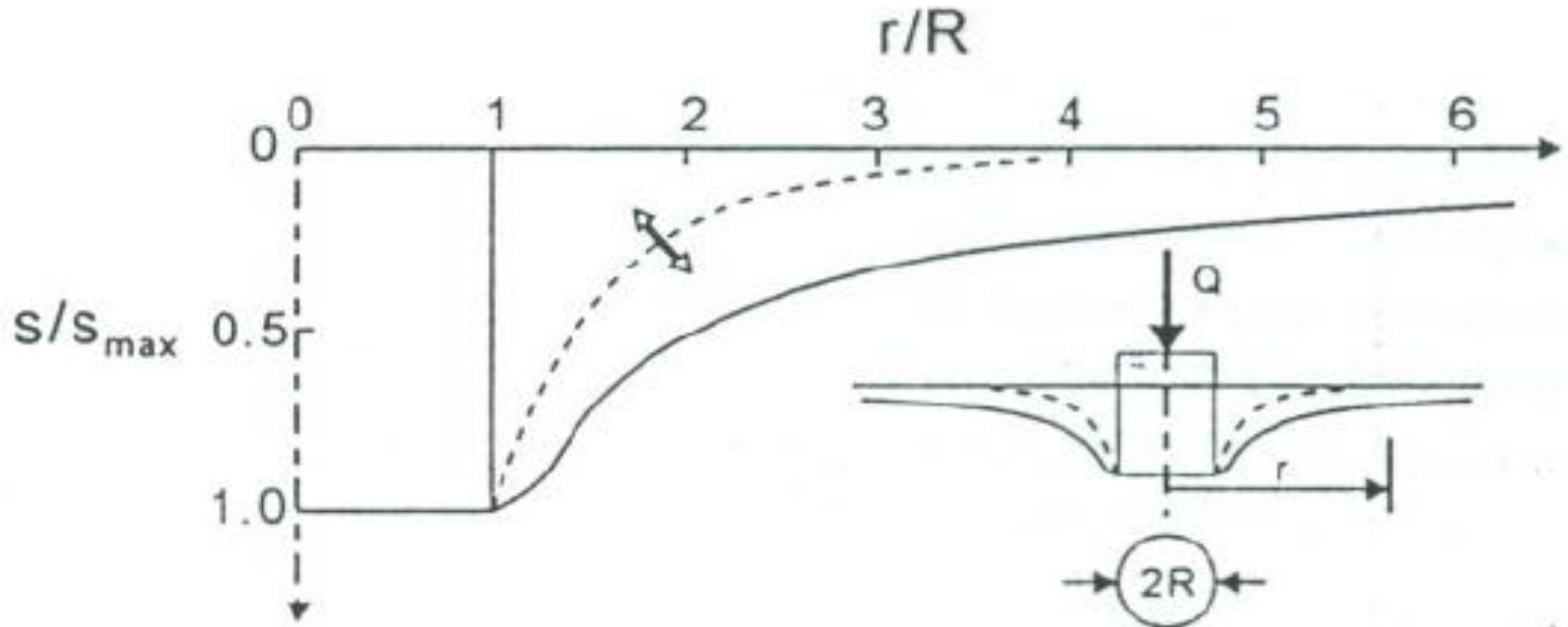
Slijeganje površine elastičnog poluprostora

Vertikalna deformacija u z pravcu u funkciji komponentnih napona je:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)]$$

Vertikalno pomjerenje, sleganje tačke na površini elastičnog poluprostora, može se dobiti integriranjem:

$$S = \int_0^\infty \varepsilon_z dz \quad \Rightarrow \quad S = \frac{1-\nu^2}{E \cdot \pi \cdot r} Q$$



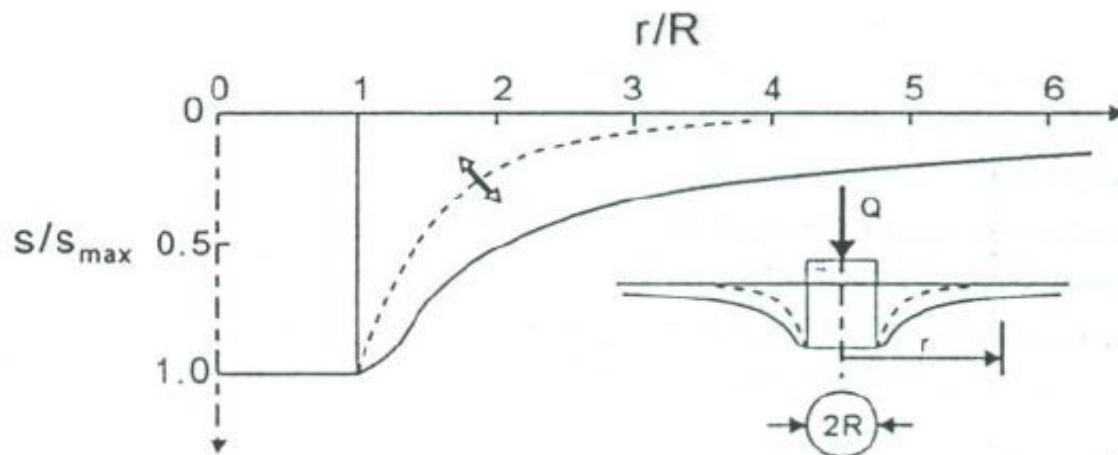
Slika 7.22. Sleganje površine elastičnog poluprostora usled opterećenja po krutoj kružnoj ploči

Ukoliko je kružna ploča potpuno kruta i glatka ploča (naponi smicanja na kontaktu između krute ploče i površine elastičnog poluprostora jednaki nuli) i centrično je opterećena silom Q , slijeganje je:

$$S = \frac{1-\nu^2}{2 \cdot E \cdot R} Q$$

Slijeganje površine terena izvan područja djelovanja opterećenja na krutoj kružnoj ploči, dato je izrazom:

$$S(r) = \frac{1-\nu^2}{2 \cdot E \cdot R} Q \arcsin\left(\frac{R}{r}\right) \text{ za } r \geq R$$



Slika 7.22. Sleganje površine elastičnog poluprostora usled opterećenja po krutoj kružnoj ploči

Slijeganje usljed jednako podjeljenog opterećenja na površini proizvoljnog oblika na površini elastičnog poluprostora može se, u načelu, dobiti analitičkim ili numeričkim intagrisanjem



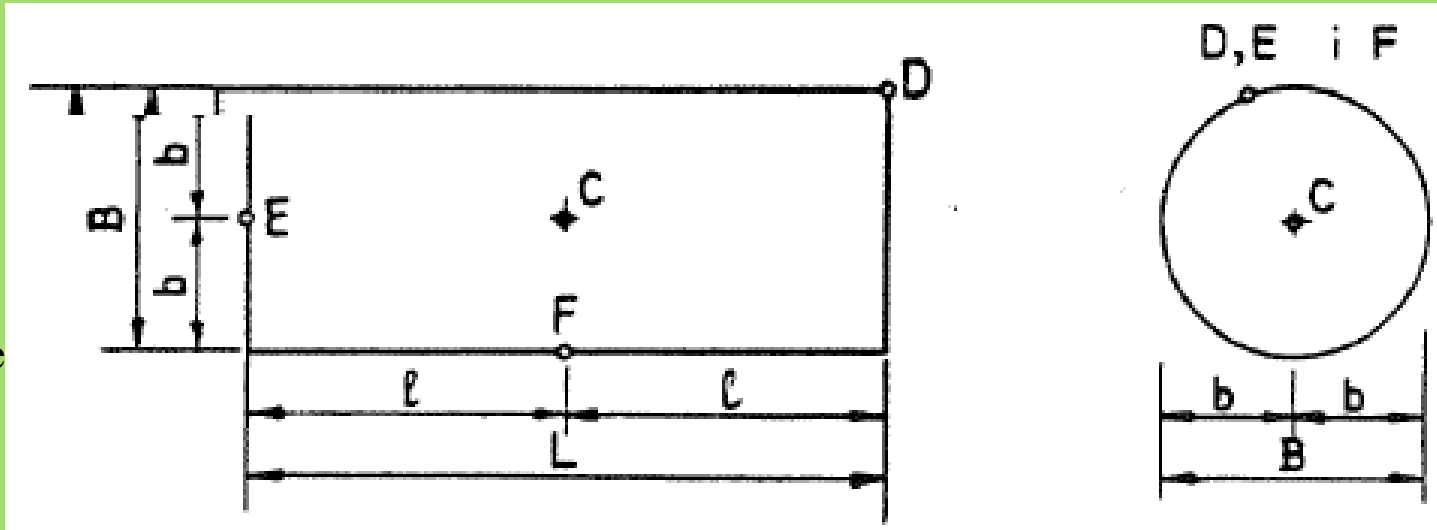
Opšti izraz za sleganje glasi:

$$S = (1 - \nu^2) \frac{q \cdot B}{E} I_s$$

Gdje je:

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

Za fleksibilne opterećene površine pravougaonog oblika sleganje ugla je dva puta manje od sleganja centralne tačke, a sleganje krutog temelja iznosi oko 80% maksimalnog sleganja centralne tačke fleksibilne opterećene površine.



| Oblik osnove temelja | I_s za sleganje tačaka | | | | Prosečna vrednost |
|------------------------------|---|------|------|------|-------------------|
| | C | D | E | F | |
| Krug | 1,00 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,85 |
| Krug (krut) | 0,79 | 0,79 | 0,79 | 0,79 | 0,79 |
| Kvadrat | 1,12 | 0,56 | 0,76 | 0,76 | 0,95 |
| Kvadrat (krut) | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Pravougaonik za $L/B = 1,50$ | 1,36 | 0,67 | 0,89 | 0,97 | 1,15 |
| 2,00 | 1,52 | 0,76 | 0,98 | 1,12 | 1,30 |
| 3,00 | 1,78 | 0,88 | 1,11 | 1,35 | 1,52 |
| 5,00 | 2,10 | 1,05 | 1,27 | 1,68 | 1,83 |
| 10,00 | 2,53 | 1,26 | 1,49 | 2,12 | 2,25 |
| 100,00 | 4,00 | 2,00 | 2,20 | 3,60 | 3,70 |
| 1.000,00 | 5,47 | 2,75 | 2,94 | 5,03 | 5,15 |
| 10.000,00 | 6,90 | 3,50 | 3,70 | 6,50 | 6,60 |

Uticaj dubine temeljenja i nedeformabilne konture na veličinu elastičnog sleganja

U graničnom slučaju za $D/B = 1$ sleganje po elastičnom rešenju je oko 75% veličine sleganja pri opterećenju na površini. Korekcija dubine i korekcija usljed prisustva nedeformabilne horizontalne konture mogu se obuhvatiti rješenjem za **prosječnu** veličinu sleganja opterećene površine, koje su dali Janbu i dr. u obliku

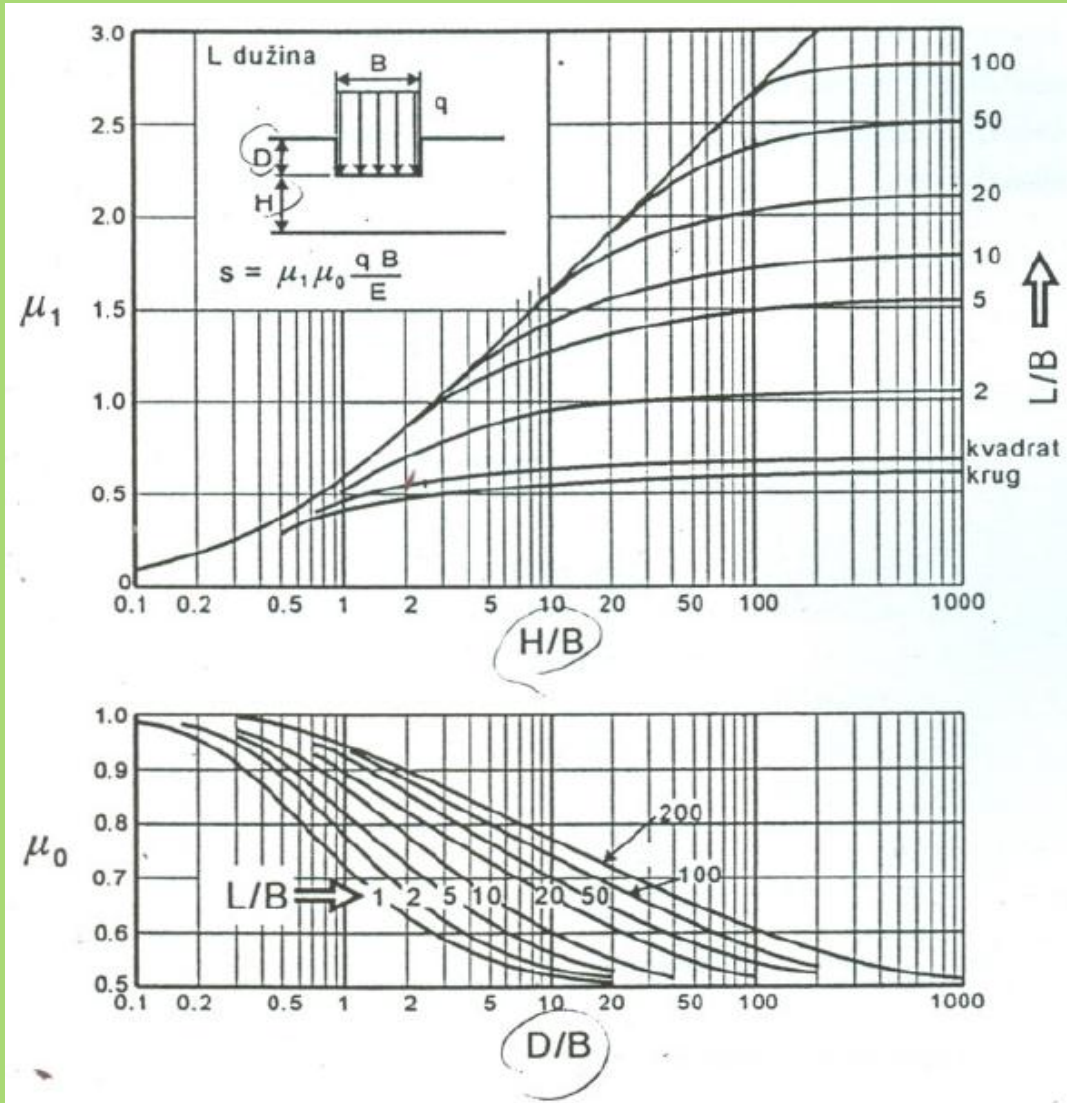
izraza:

$$S = \mu_0 \cdot \mu_1 \frac{q \cdot B}{E}$$

gdje su koeficijenti μ_0 i μ_1 dati

sljedećim dijagramima, a rješenje podrazumjeva da je Poasonov koeficijent

$$\nu = 0.5.$$



Slika 7.23. Uticajni koeficijenti za proračun prosečnog elastičnog sleganja

Komponente sleganja na realnom tlu

Ukupna veličina sleganja opterećene površine se može opisati zbirom:

$$s = s_i + s_c + s_{sc}$$

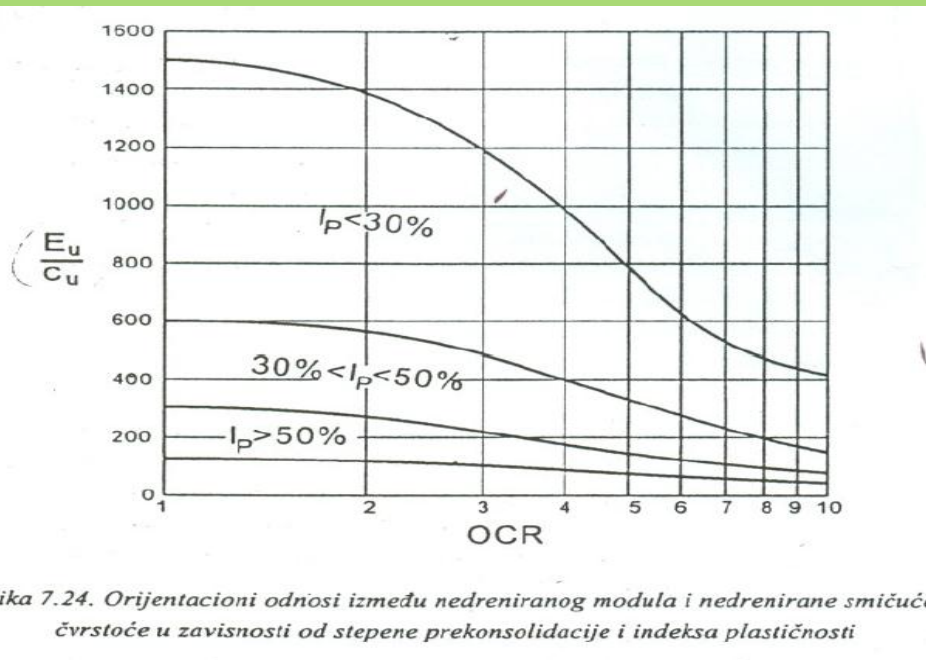
gdje je: s_i trenutno sleganje

s_c konsolidaciono sleganje

s_{sc} sekundarna kompresija.

Trenutno sleganje opterećenih površina može se izračunati primjenom ranije opisanih rješenja iz teorije elastičnosti za Poasonov koeficijent $\nu = 0.5$, pod pretpostavkom da je faktor sigurnosti protiv loma temeljnog tla relativno visok, tako da ne dolazi do značajnije plastifikacije tla u opterećenoj zoni.

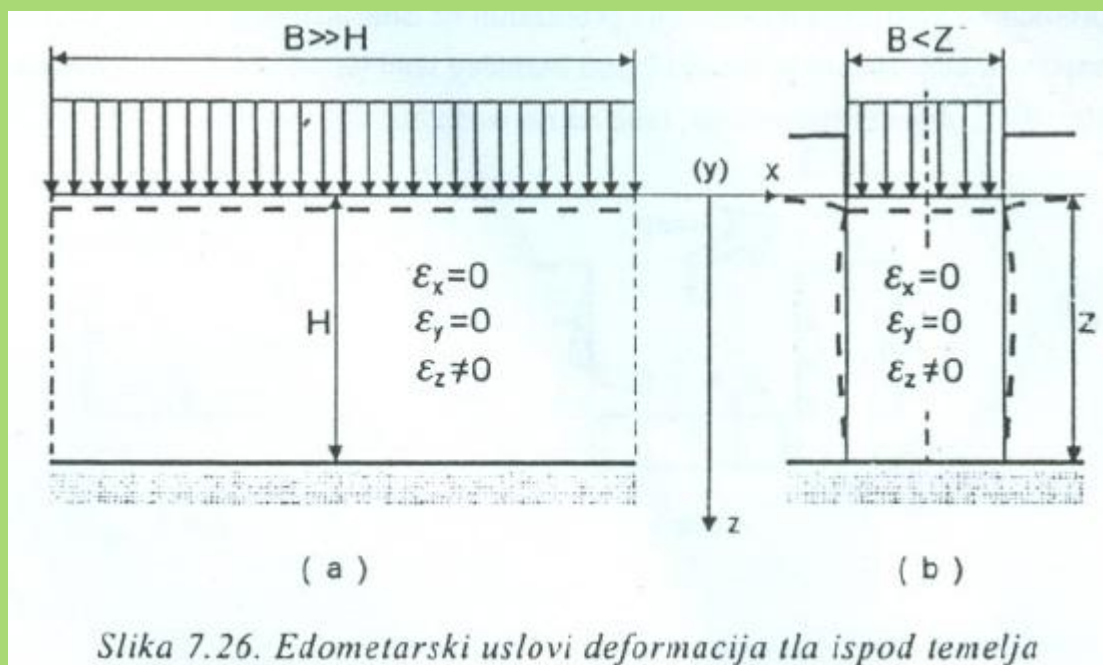
Najvažnija promjenljiva, od koje zavisi konačna tačnost rezultata u ovom slučaju, je veličina nedreniranog modula E_u koju treba eksperimentalno ustanoviti.



Alternativno, nedrenirani moduli se mogu određivati različitim postupcima "in situ", opterećenjima kružnom pločom i analizom rezultata mjerenja sleganja na već izvedenim objektima. Mogu se koristiti i empirijske korelacije izvedene na osnovu paralelnih mjerenja na većem broju objekata u raznim sredinama.

$$E_u = p'_v (200 + 40 \cdot OCR)$$

gdje je p'_v početni vertikalni efektivni napon OCR stepen prekonsolidacije. Veličina konsolidacionog sleganja vodom zasićenih glina može se izračunati korišćenjem rezultata opita stišljivosti u edometarskom aparatu.



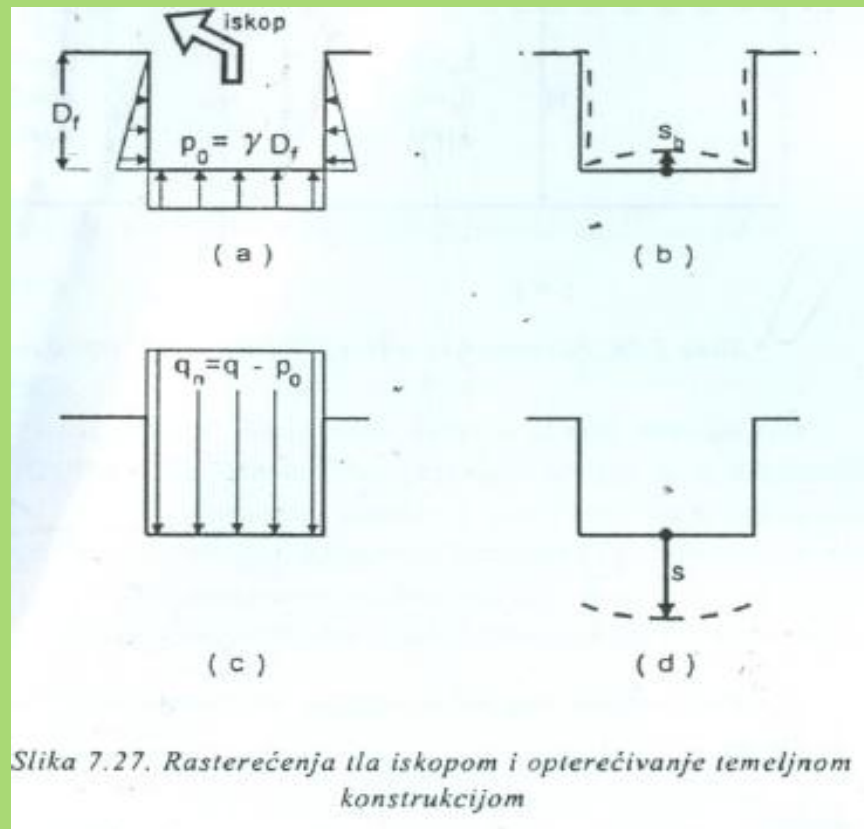
"Edometerska pretpostavka" podrezumjeva da se stub tla ispod opterećene površine u pogledu deformacija ponaša isto kao i uzorak u edometru tako da su bočne deformacije $\epsilon_x = 0$ i $\epsilon_y = 0$ i postoji samo vertikalna deformacija ϵ_z

U načelu, veličina sleganja se izračuna integriranjem vertikalnih deformacija ϵ_z po dubini: Z

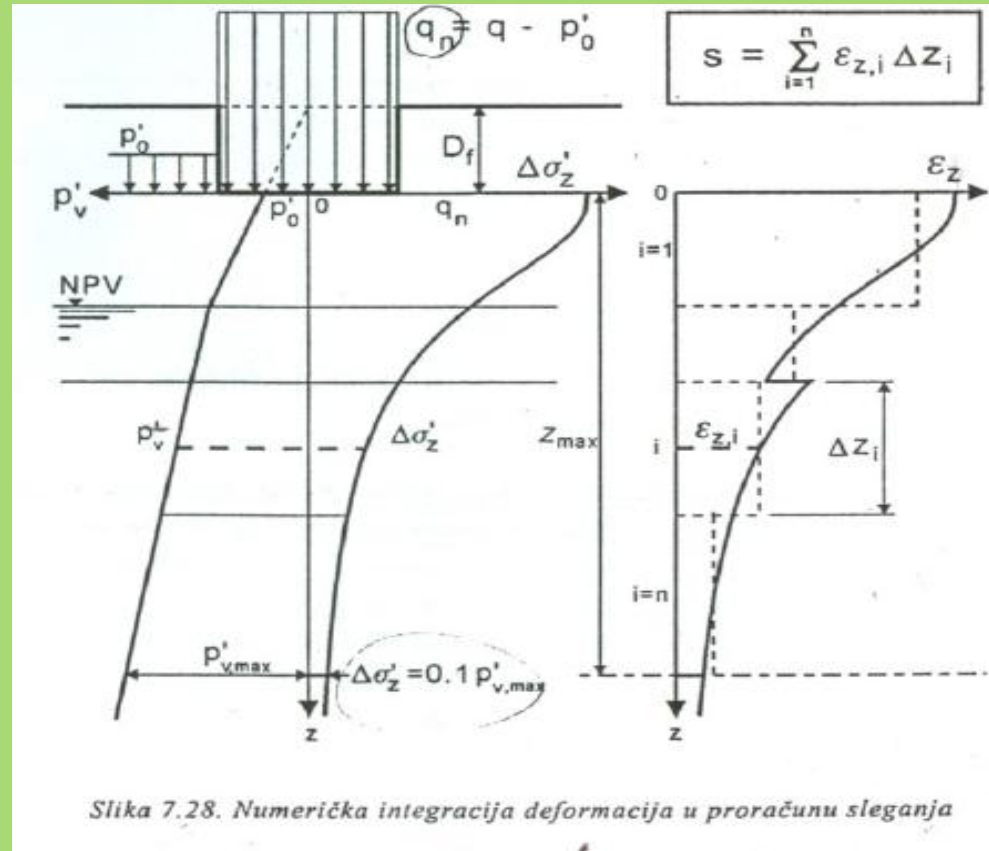
$$s = \int_0^Z \epsilon_z dz$$

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

Značajne deformacije za proračun veličine sleganja se prostiru do dubine na kojoj je priraštaj vertikalnog napona veći od 10% početnog vertikalnog efektivnog napona od sopstvene težine tla p'_v .



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



Ukoliko je zavisnost između napona i deformacije približno linearna, tada je:

$$\varepsilon_z = m_v \Delta \sigma'_z$$

ili kod nas u popularnijem obliku:

$$\varepsilon_z = \Delta \sigma'_z / M_v$$

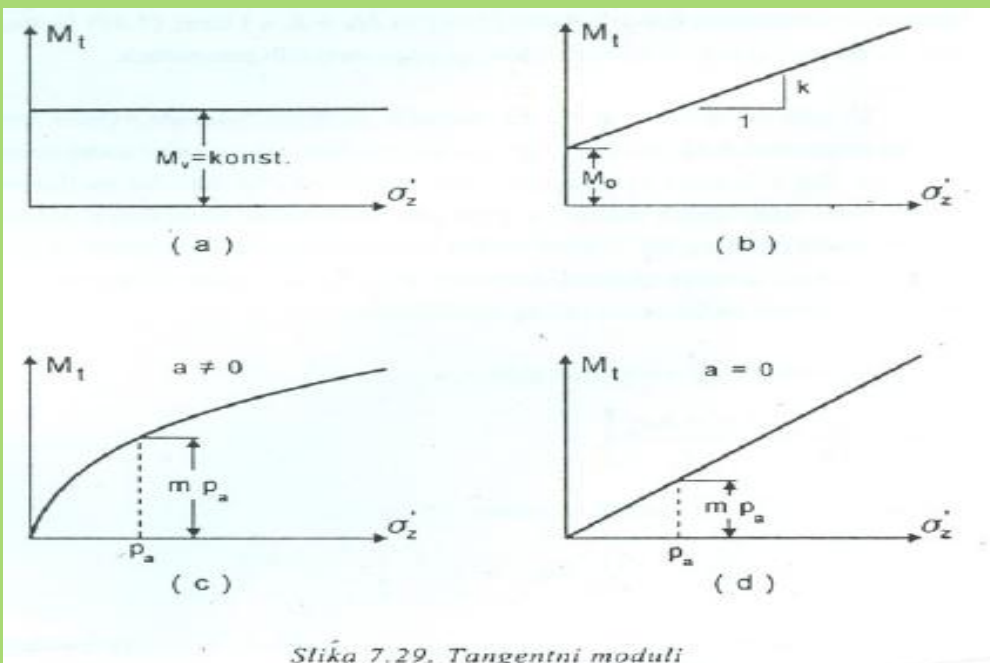
Međutim, ukoliko se tangenti modul može opisati linearnom ili stepenom funkcijom vertikalnih napona, izrazi za deformacije su:

-za linearnu funkciju:
$$\varepsilon_z = \frac{l}{k} \ln \left[\frac{M_0 + K(P'_v + \Delta\sigma'_z)}{M_0 + KP'_v} \right] \quad \text{Za } k > 0$$

-za paraboličnu funkciju:
$$\varepsilon_z = \frac{l}{ma} \left[\left(\frac{P'_v + \Delta\sigma'_z}{Pa} - \frac{P'_v}{Pa} \right)^a \right] \quad \text{Za } a \neq 0$$

-u specijalnom slučaju:

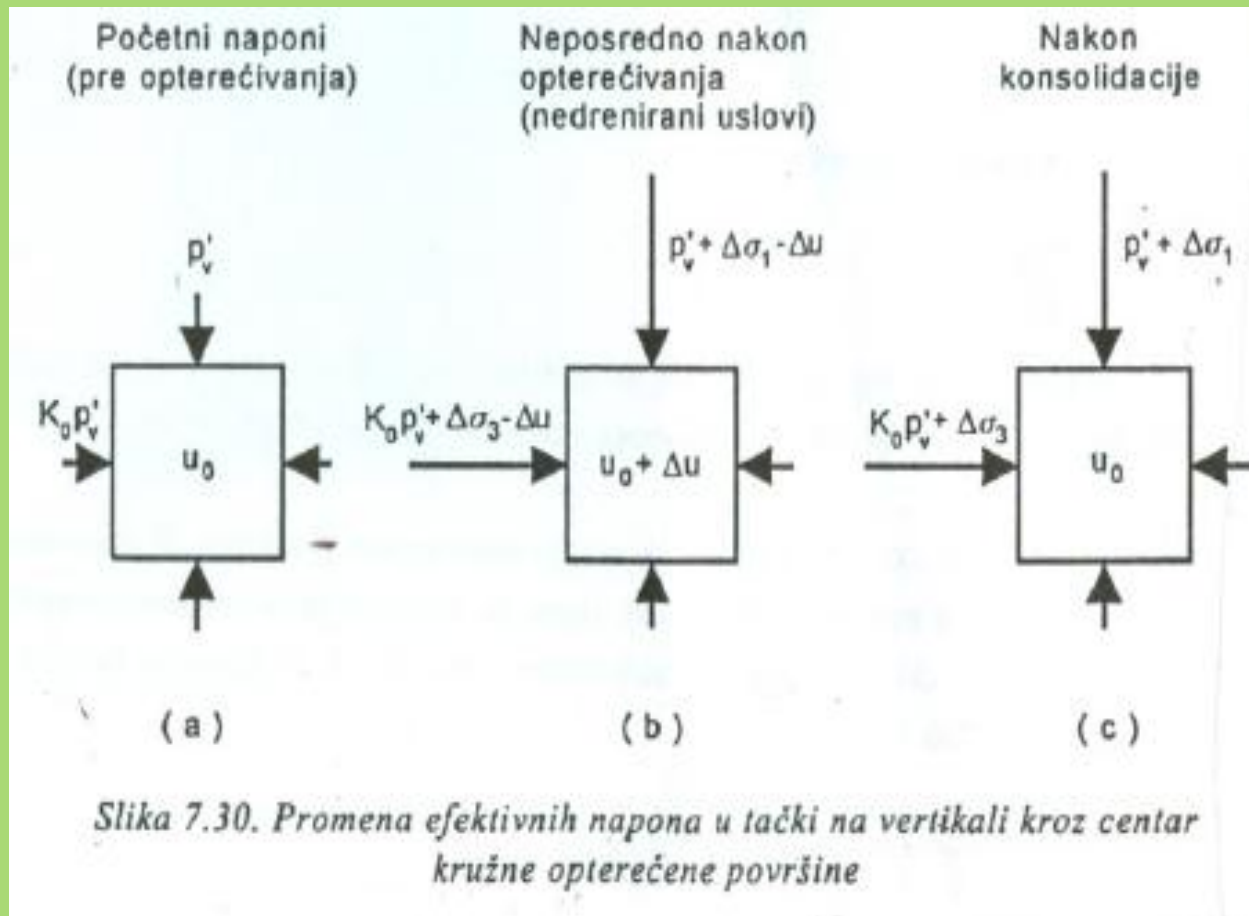
$$\varepsilon_z = \frac{l}{m} \ln \left(\frac{P'_v + \Delta\sigma'_z}{P'_v} \right) \quad \text{Za } a = 0$$



Slika 7.29. Tangenti moduli

Metoda Skemptona i Bjeruma

U stvarnosti pojaviće se i bočne deformacije usljed opterećenja na ograničenoj površini. Da bi ocijenili grešku koja se "edometarskom hipotezom" čini, posmatraćemo tačke na vertikali kroz centar kružnog ili kvadratnog temelja gdje je poznato da je naponsko stanje rotaciono simetrično, tako da je $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$.



Priraštaj pornih pritisaka u uslovima rotaciono simetričnog naponskog stanja za zasićeno tlo glasi:

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

a može se napisati i u obliku: $\Delta u = \Delta \sigma_1 \left[A + \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1} (1 - A) \right]$

gdje su $\Delta \sigma_1$ i $\Delta \sigma_3$ priraštaji glavnih napona usljed površinskog opterećenja.

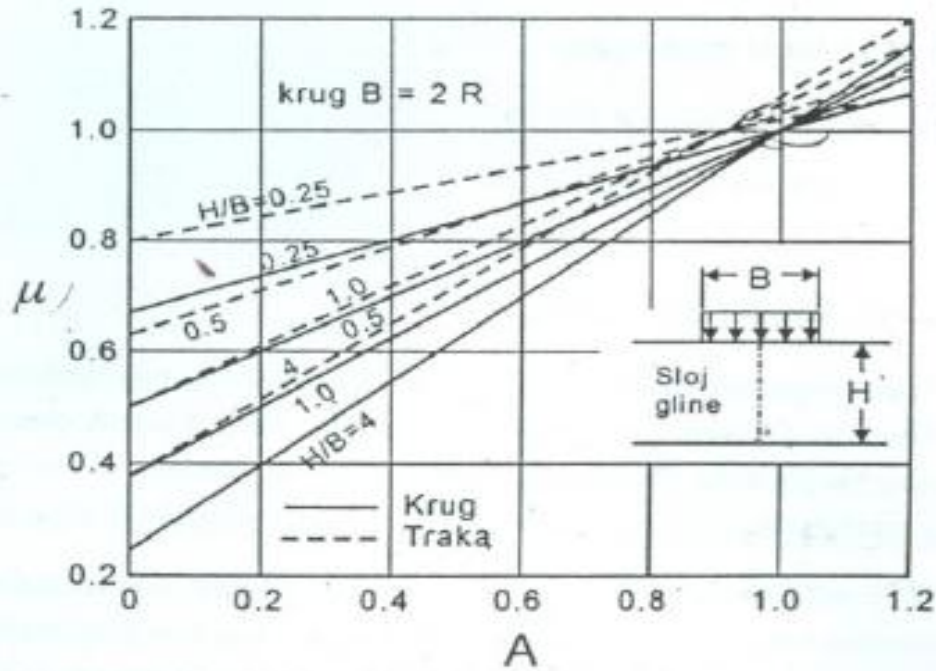
Veličina sleganja pri edometarskoj pretpostavci je:

$$S_{edo} = \int_0^H \frac{\Delta \sigma_1}{M_v} dz \quad S_c = \mu \cdot S_{edo} \quad \Rightarrow \quad \mu = \frac{\int_0^H \frac{\Delta \sigma_1}{M_v} \left[A + \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1} (1 - A) \right] dz}{\int_0^H \frac{\Delta \sigma_1}{M_v} dz}$$

Pretpostavimo da su M_v i A konstante nezavisne od dubine i veličina napona, tako da se sređivanjem prethodne jednačine dobija:

$$\mu = A + (1 - A) \frac{\int_0^H \Delta \sigma_3 dz}{\int_0^H \Delta \sigma_1 dz} = A + (1 - A) \alpha \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{\int_0^H \Delta \sigma_3 dz}{\int_0^H \Delta \sigma_1 dz}$$

Ako se usvoji Poasonov koeficijent $\nu = 0.5$ za zasićenu glinu opterećivanu u nedreniranim uslovima, odnos integrala α zavisi od oblika opterećene površine i debljine deformabilnog sloja gline u odnosu na dimenzije opterećene površine i može se odrediti iz elastičnih rješenja.



Slika 7.31. Koeficijenti za proračun konsolidacionog sleganja

Edometarska pretpostavka, i pored svih znatnih teorijskih pojednostavljenja, daje rezultate koji su ili veoma bliski korektnim ili su na strani sigurnosti, tako da je to i jedan od glavnih razloga za njenu praktičnu primjenu

Burland i dr.(1977) daju slijedeće orijentacione odnose veličina:
inicijalnih; edometarskih i ukupnih slijeganja:

Za prekonsolidovane gline:

$$s_i = (0,5 \text{ do } 0,6) s_{edo} \text{ i } s_c = (0,5 \text{ do } 0,4) s_{edo} \Rightarrow s \approx s_{edo}$$

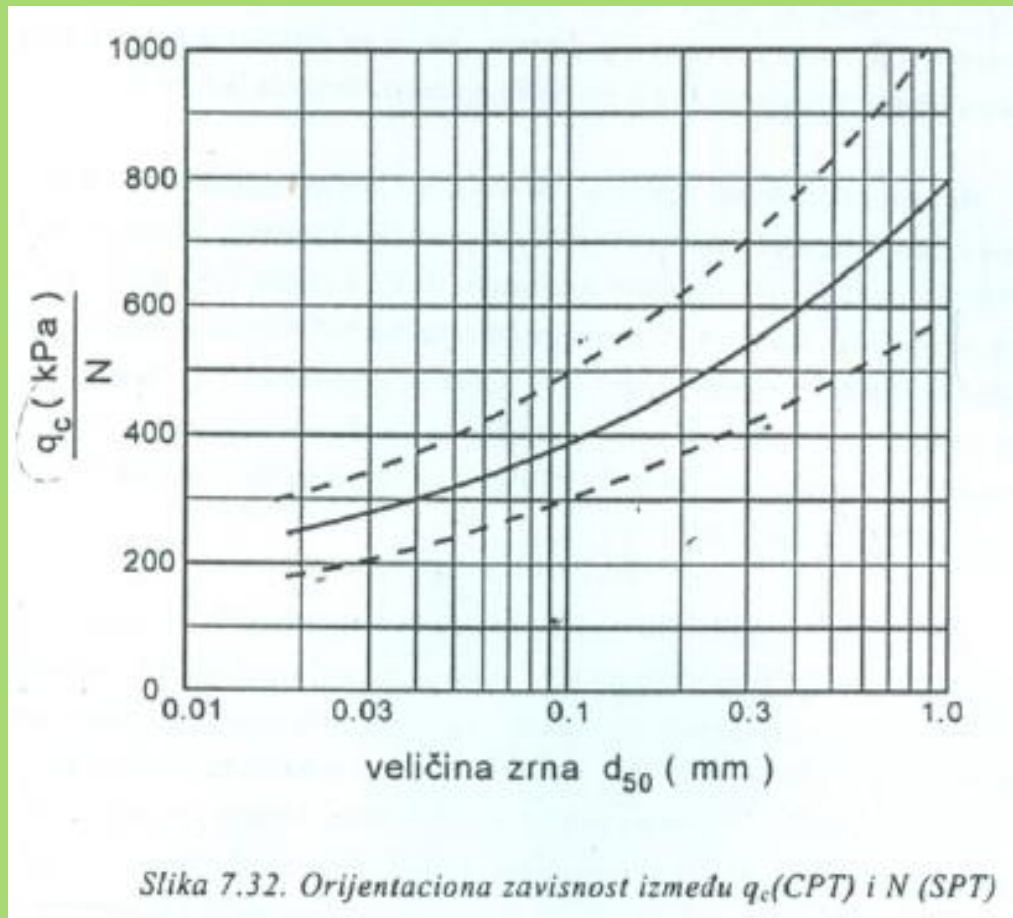
Za normalno konsolidovane gline:

$$s_i = 0,1 \cdot s_{edo} \text{ i } s_c = s_{edo} \Rightarrow s \approx 1,1 \cdot s_{edo}$$

Slijeganje temelja na pijesku

Rastresiti pijeskovi stišljiviji su od zbijenih, dok su gline znatno stišljivije od pijeska ili šljunka.

Da bi se omogućilo korišćenje i rezultata standardnih penetracionih opita, koji se u dubokoj praksi rutinski izvode u toku geotehničkog istražnog bušenja, mogu se uspostaviti približne korelacije između rezultata ove dvije vrste ispitivanja.



Metoda De Bera i Martensa

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

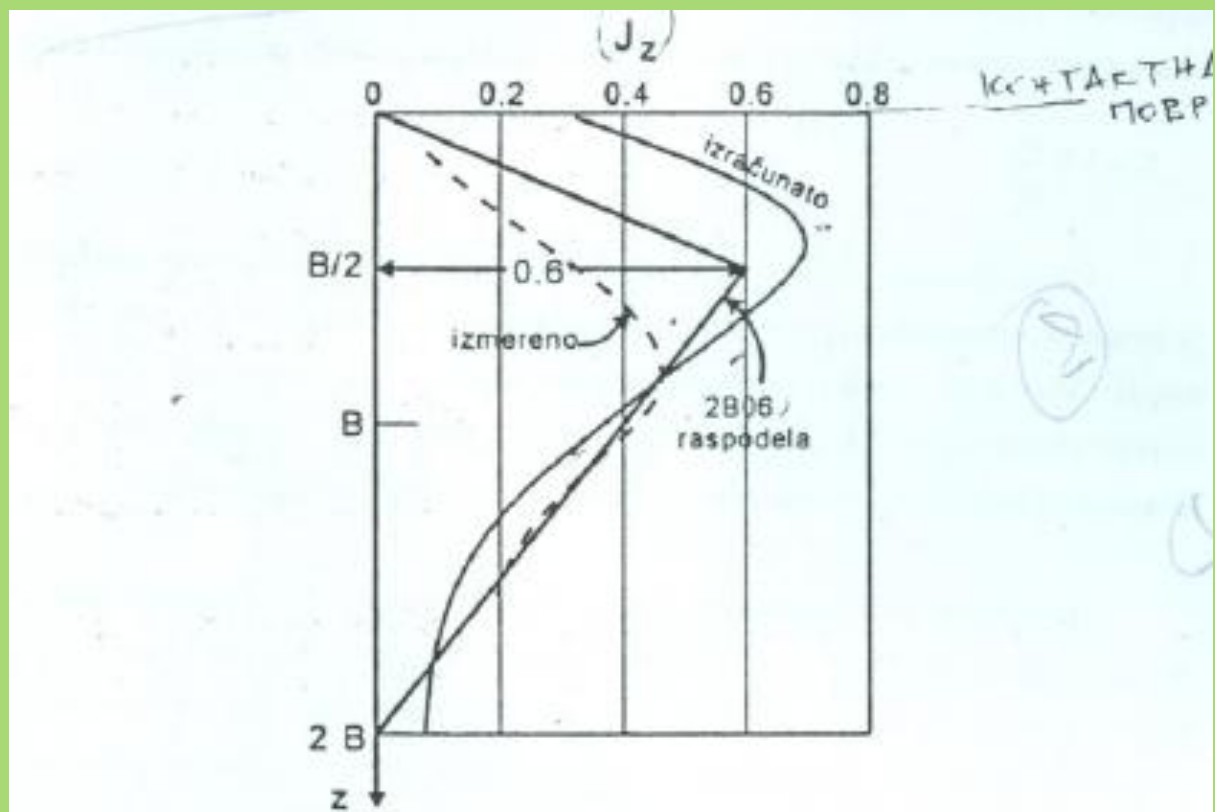
$$C = 1,5q_c / p'_v$$

a specifična deformacija je:

$$\varepsilon_z = 1 / C \ln \left[(p'_v + \Delta\sigma'_z) / p'_v \right]$$

Metoda De Bera i Martensa je primjenljiva isključivo za normalno konsolidovane pijeskovske.

Šmertman je uočio da raspodjela vertikalnih deformacija ipod središnje tačke temelja na jednoličnom pijesku nije kvalitativno slična raspodjeli priraštaja vertikalnih napona i da se najveća vertikalna deformacija pojavljuje približno na dubini



Slika 7.33. Funkcija raspodele deformacija prema Šmertmanu (1970)

Vertikalna deformacija ε u tački na vertikali kroz centar temeljne stope opterećene neto kontaktim

naponom q može se pisati u obliku: $\varepsilon = q \cdot I / E$
 gdje je: n z n z s

E odgovarajući modul elastičnosti
 s

I funkcija raspodjele vertikalnih
 z deformacija

Približan izraz za izračunavanje sleganja
 temelja glasi:

$$s = C_1 \cdot C_2 \cdot q_n \sum \frac{J_z}{E_s} \Delta z$$

gdje je $q_n = q - \gamma D_f$ neto kontakti napon
 Δz debljina posmatranog sloja

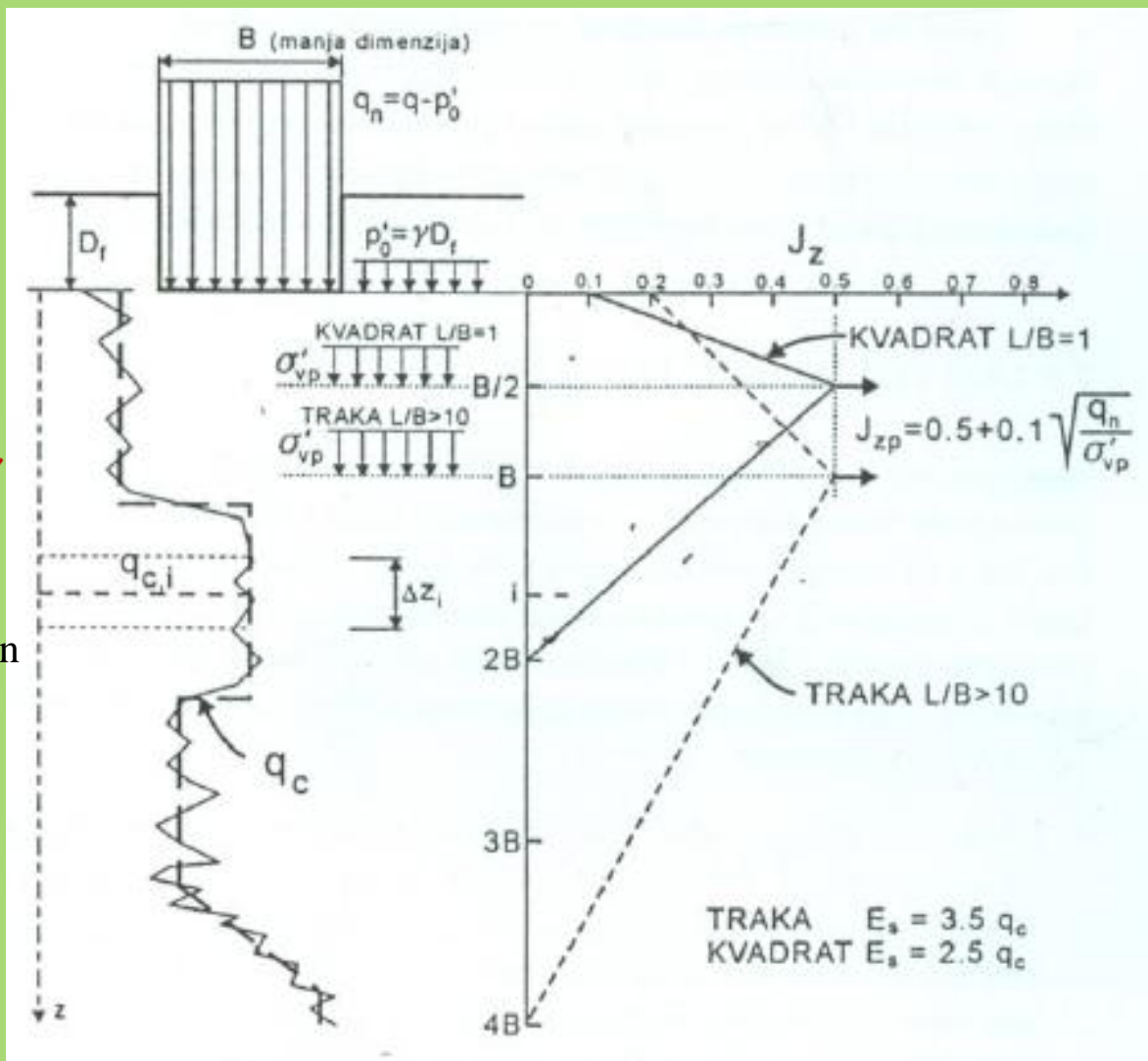
Faktor dubine

$$C_1 = 1 - 0.5 \left(\frac{\gamma D_f}{q_n} \right)$$

Faktor puzanja

$$C_2 = 1 + 0.2 \log(t/0.1)$$

t – vrijeme izraženo u godinama



Slika 7.34. Proračun sleganja metodom Šmertmana i dr. (1978)

Sekundarna kompresija

Treba imati u vidu sljedeće:

- Organska tla pokazuju značajne sekundarne efekte
- Mnoga tla pokazuju linearnu zavisnost sleganja u polu-logaritamskim dijagramu u toku dužeg vremenskog intervala, ali takva zavisnost ne može važiti do beskonačnog vremena
- Eksperimentalne rezultate dobijene uobičajenim laboratorijskim metodama ispitivanja treba primjenjivati sa rezervom.

Pomjeranja temelja bez znatne promjene napona

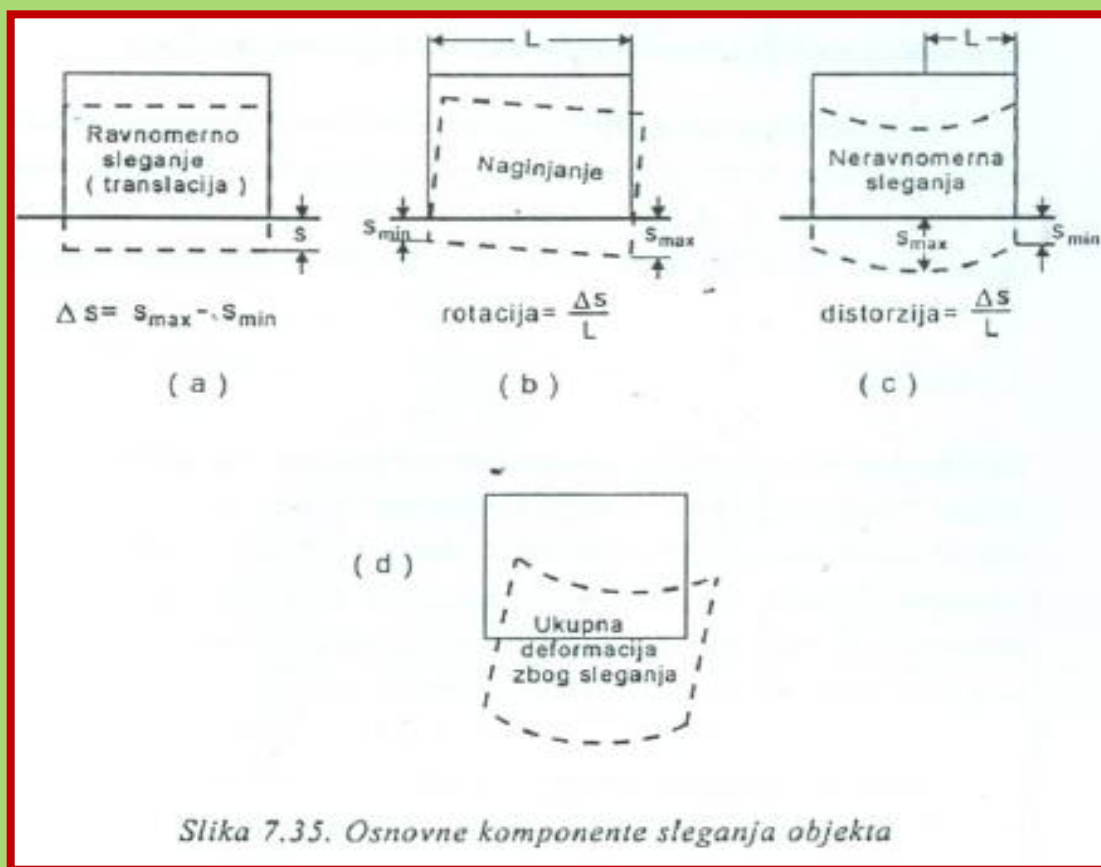
Treba se podsjetiti da su deformacije tla moguće i bez promjene napona (ponašanja kolapsibilnog tla, ekspanzivnog tla i dejstva mraza na tlo u prisustvu vode).

Prema tome, pomjeranja temelja su moguća i zbog ovakvih oblika ponašanja tla pri promjeni uslova sredine.

Neželjena pomjeranja temeljnog tla ispod objekta su moguća i usljed izvođenja iskopa za temeljenje susjednog objekta ili izvođenje drugih radova kao što su iskopi za tunele, što može biti od izuzetnog značaja pri izvođenju metroa, sanitarnih tunela i drugih objekata infrastrukture u području gusto izgrađenih gradova.

Dozvoljena sleganja

Dopušteno sleganje temelja objekata je veličina koju konstrukcija može da toleriše i zavisi od više faktora kao što su vrsta konstrukcije, njena visina, krutost, namjena, lokacija, kao i od brzine i raspodjele sleganja.



• **Ravnomjerno sleganje** je moguće u slučaju krutog simetričnog objekta na homogenom tlu. Čak i kada je relativno veliko, ravnomjerno sleganje obično nema štetne posljedice po sam objekat, ali može oštetiti veze instalacija po konturi objekta.

• **Naginjanje, čista rotacija** relativno krutog objekta može imati štetne posljedice po konstrukciju i instalacije u njoj, uticati na rad mašina, kranova i druge opreme.

• **Diferencijalna ili neravnomjerna sleganja** karakterističnih tačaka u osnovi objekta ograničena su fleksibilnošću konstrukcije i izazivaju zakrivljenost uz distorzijske deformacije koje mogu izazvati različita lokalna preopterećenja i oštećenja objekta. Ovaj oblik sleganja je najčešći i mora se ograničiti na dopuštene veličine.

REZIME

Veličine pomjeranja temelja objekata zavise od promjene napona i od uslova promjene sredine. Teorija elastičnosti se može korisno upotrijebiti za proračun napona i deformacija pri monotonim opterećenjima ako se parametri tla E odnosno G i ν izaberu na odgovarajući način. Ako se uvede pretpostavka o izotropiji, dovoljna su samo dva parametra, pri čemu treba imati u vidu veličine početnih komponenata napona i red veličine promjene napona usljed nanijetog opterećenja.

Sleganje vertikalno opterećenih temelja usljed nanijetog opterećenja se, u načelu, može razložiti na tri komponente i to na trenutnu, konsolidacionu i komponentu puzanja. Relativan značaj pojedinih komponenti zavisi od vrste tla. Edometarska pretpostavka se može koristiti u rješavanju uobičajenih proporcija temelja i konvencionalnih objekata, ali pri tome treba imati u vidu ograničenja koja ona podrazumjeva, tako da se mogu uvesti i odgovarajuće polu-empirijske korekcije.

Pomjerenje temelja, osim usljed nanijetih napona može zavisiti i od osjetljivosti tla na promjene uslova sredine. Na kolapsibilnom, metastabilnom djelimično zasićenom tlu, lesu, sleganja nastaju usljed kolapsa skeleta usljed provlažavanja. Na ekspanzivnom tlu se pojavljuju neravnomjerna izdizanja temelja usljed akumulacije vlage u tlu.

Dejstvo mraza u nekim podnebljima može biti glavni uticaj značajan za uslove temeljenja i građenja građevinskih objekata.

Veličine dopuštenih sleganja temelja i uslovi sigurnosti protiv proloma temeljnog tla su mjerodavni za prihvatljivost rješenja temeljenja objekata.