

# **NOSIVOST TEMELJNOG TLA**

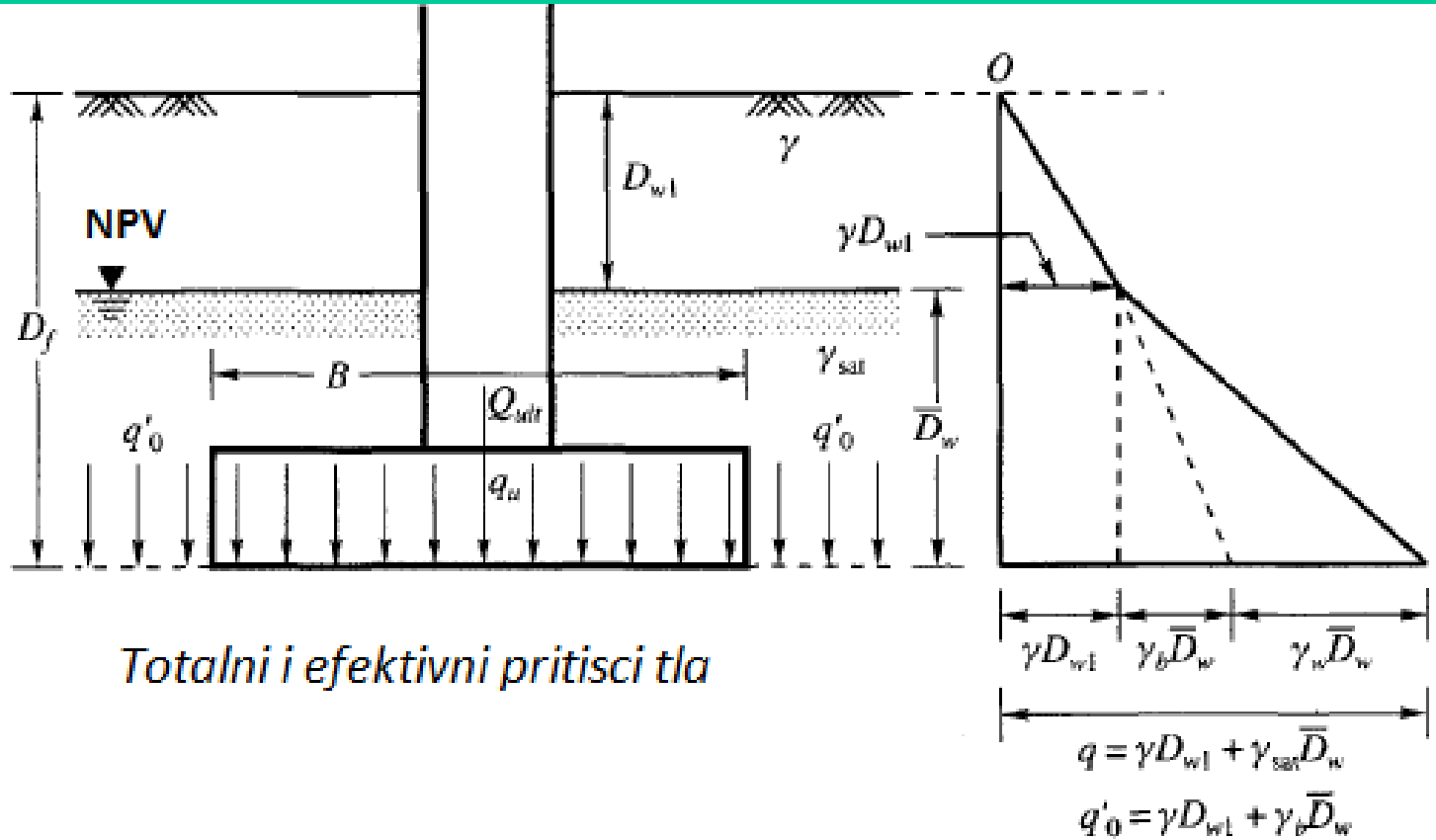
# NOSIVOST TEMELJNOG TLA

## Uvod

Ukoliko tlo u površinskoj zoni može da na adekvatan način primi opterećenja od konstrukcije građevinskog objekta, govori se o plitkom temeljenju.

Plitki temelji prenose na tlo opterećenje najčešće preko horizontalne temeljne spojnice, pri čemu je doprinos smičućih napona po kontaktu između tla i konstrukcije temelja iznad nivoa temeljne spojnice zanemarljiv.

Ako se na zadovoljavajući način na tlo ne mogu prenijeti opterećenja plitkim temeljima, primjenjuje se duboko temeljenje na šipovima, dijafragmama, bunarima ili kesonima, ili se primjenjuju mjere poboljšanja tla.



Granična nosivost je:

$$q_f = Q_f / A$$

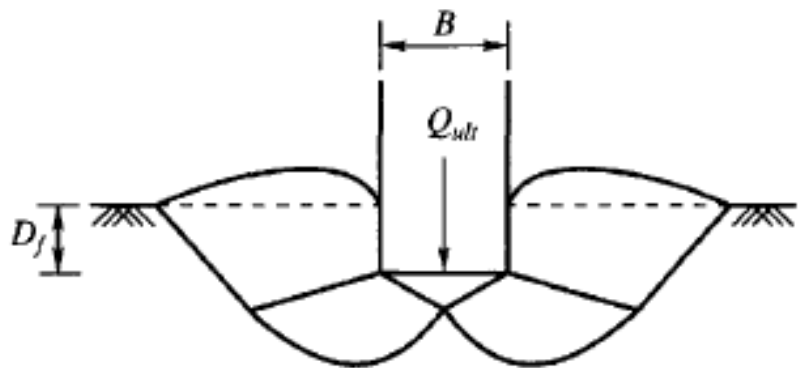
gdje je  $Q_f$  centrična sila usljed koje dolazi do loma, a  $A$  površina na koju djeluje.

Svi temelji moraju imati izvjesnu sigurnost protiv proloma temeljnog tla tako da je dopušteno opterećenje:

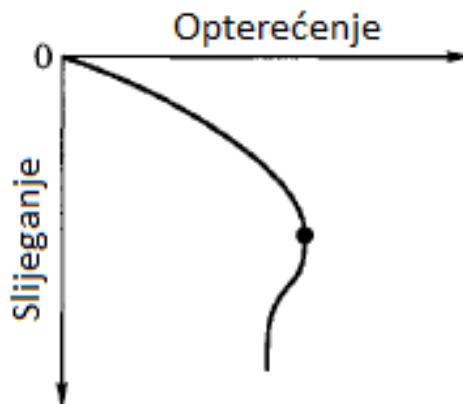
$$q_a = q_f / F_s$$

gdje je  $F_s$  faktor sigurnosti definisan odnosom  $F_s = q_f / q_a$ .

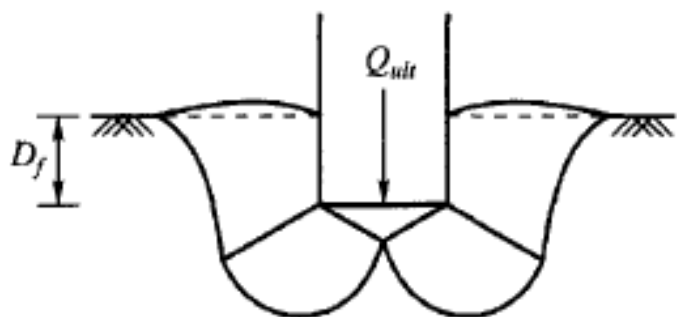
Prolom temeljnog tla nastaje usljed smičućeg loma u tlu u području opterećenja. Tri osnovna oblika loma se mogu opisati kao *opšti* smičući lom, *lokalni* smičući lom i *probojni* smičući lom.



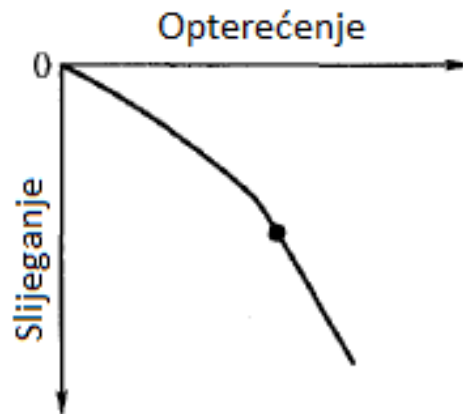
a) Opšte smicanje



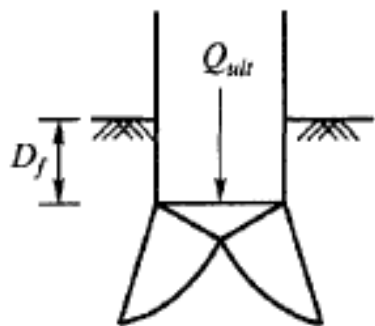
**Zbijeno tlo**



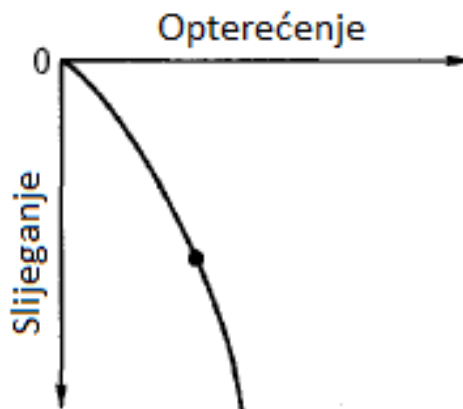
b) Lokalno smicanje



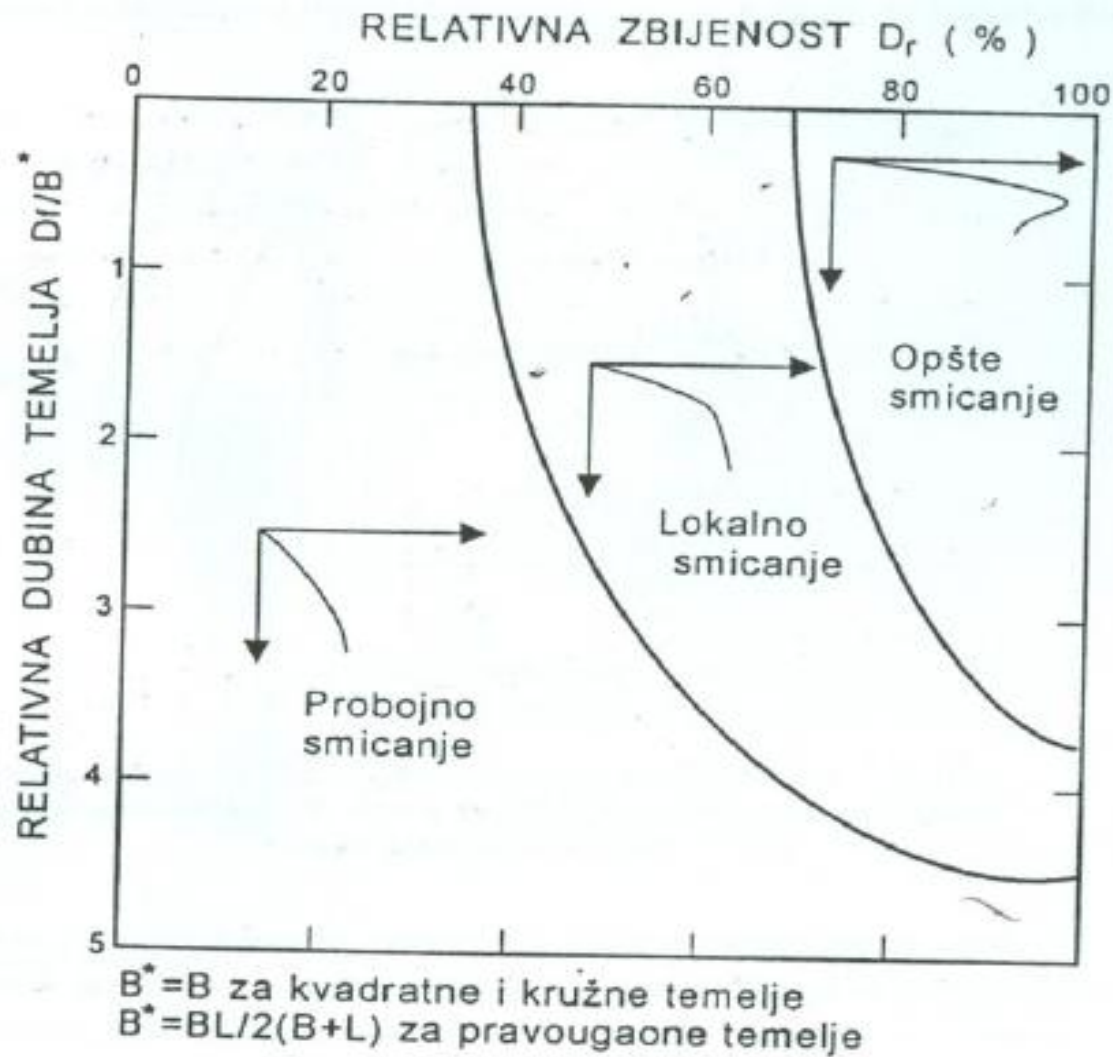
**Srednje  
zbijeno tlo**



c) Probijajuće smicanje



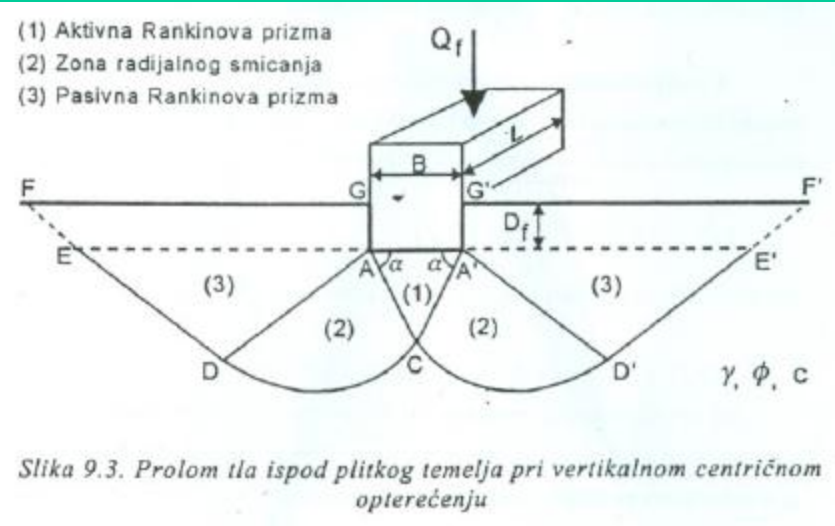
**Rahlo tlo**



Slika 9.2. Oblici proloma tla opterećenog temeljom na pesku

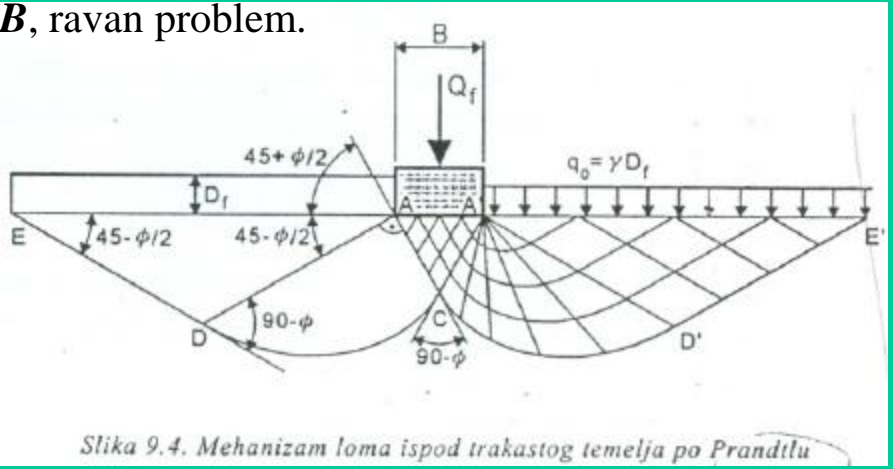
Za svaki realni temelj postoji izvjestan nivo opterećenja za koji su sleganja velika ili se njihove veličine veoma teško mogu predvidjeti. Ovo opterećenje se naziva *graničnom nosivošću tla*.

# Metode za proračun nosivosti plitkih temelja



Koriste se sljedeće pretpostavke:

- čvrstoća tla na dijelu klizne površi  $EF$  i  $E'F'$  između površine terena i dubine  $D_f$  može se zanemariti,
- naponi smicanja na vertikalnom kontaktu temelja i tla  $AG$  i  $A'G'$  su jednaki nuli,
- dužina temelja  $L$  je velika u odnosu na širinu temelja  $B$ , ravan problem.



**Prandtl** je razvio postupak koji, primjenjen u mehanici tla, podrazumjeva pretpostavke da je homogeno i izotropno tlo bez težine ( $\gamma = 0$ ), i da je temelj krut i potpuno gladak.

On nalazi granično opterećenje trakastog temelja u obliku:

$$q_f = c [ \operatorname{tg}^2 ( 45^\circ + \varphi/2 ) e^{\pi \operatorname{tg} \varphi} - 1 ] \operatorname{ctg} \varphi$$

Rješavanjem zadatka u kojem figurišu i trenje i kohezija dobija se isti mehanizam loma i za tako definisan specijalan slučaj tla bez težine analitičko rješenje ima oblik:

$$q_f = c N_c + q_0 N_q$$

gdje su  $N_c$  i  $N_q$  faktori nosivosti po Prandtlu.

$$N_c = \operatorname{tg}^2 ( 45^\circ + \varphi/2 ) e^{\pi \operatorname{tg} \varphi}$$

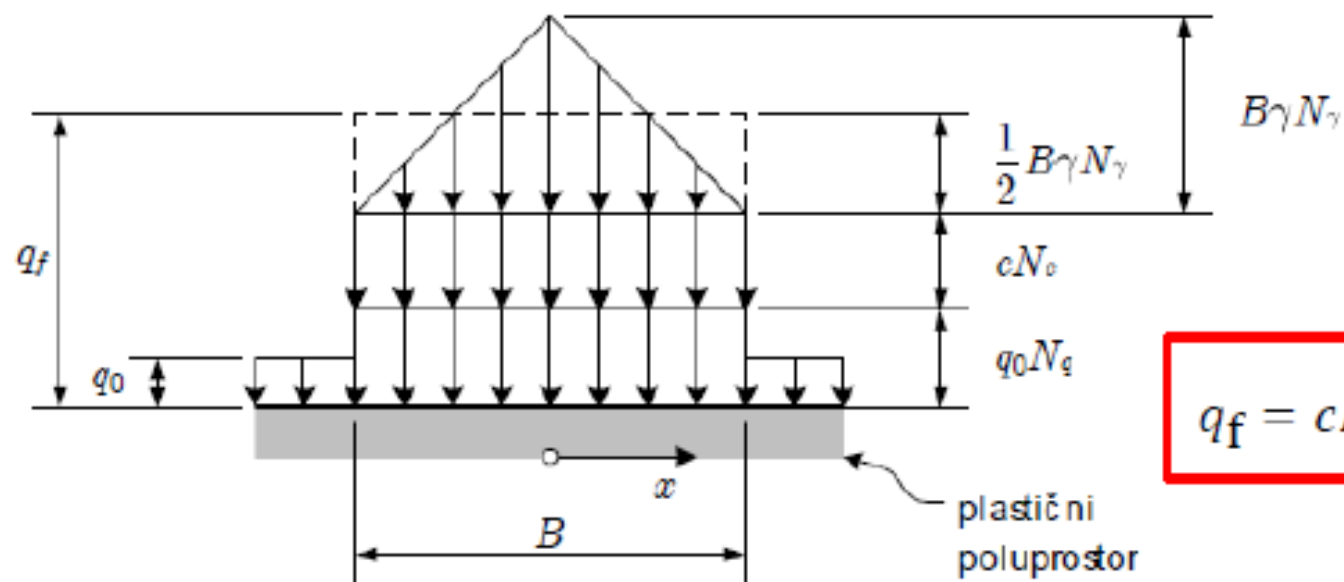
$$N_q = ( N_c - 1 ) \operatorname{ctg} \varphi$$

Granična nosivost tla ispod plitkog trakastog temelja opterećenog vertikalnom centričnom silom i parametrima  $c \neq 0$ ,  $q_0 \neq 0$  i  $\gamma \neq 0$  se može opisati opštom jednačinom Terzagija u obliku:

$$q_f = 1/2 \gamma B N_\gamma + c N_c + \gamma D_f N_q$$

gdje su  $N_\gamma$ ,  $N_c$  i  $N_q$  faktori nosivosti koji zavise samo od  $\varphi$  i oblika mehanizma loma tla.

Prvi član u izrazu predstavlja doprinos graničnoj nosivosti sopstvene težine tla ispod nivoa temeljne spojnice, drugi član opisuje doprinos kohezije, a treći učešće nadopterećenja na nivou temeljne spojnice.



$$q_f = cN_c + \frac{1}{2}B\gamma N_\gamma + q_0N_q$$

$q_f$  - nosivost tla (prosječno trakasto opterećenje koje izaziva slom u tlu)

$c, \varphi$  - parametri Mohr-Coulombovog zakona čvrstoće

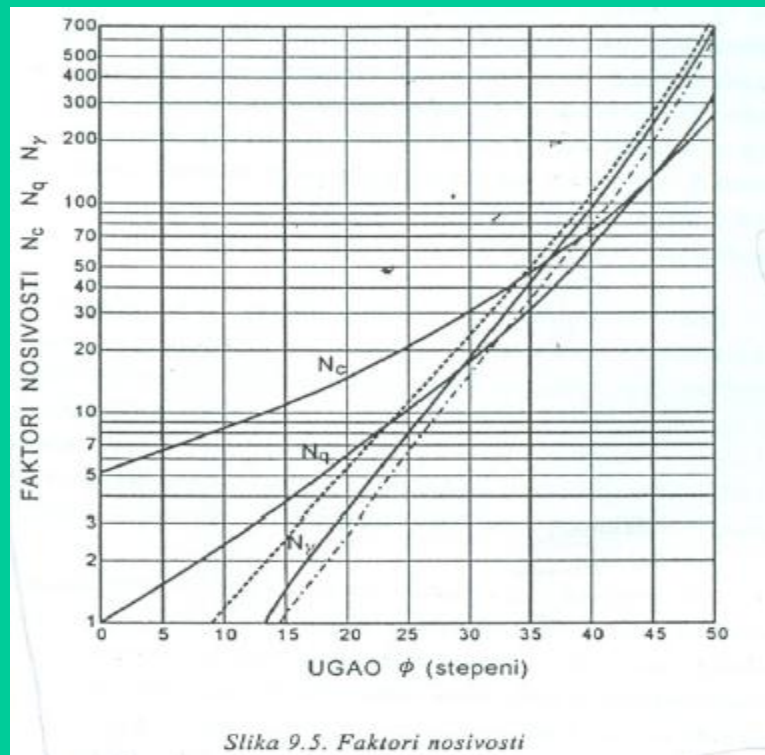
$\gamma$  - jedinična (zapreminska) težina tla

$q_0$  - jednoliko podijeljeno normalno opterećenje

$B$  - širina temeljne trake

$N_c, N_\gamma, N_q$  - faktori nosivosti, funkcije parametra  $\varphi$





Slika 9.5. Faktori nosivosti

Za faktor nosivosti  $N_\gamma$  se u našoj zemlji primjenjuje izraz koji je predložio Hansen, a može se aproksimirati izrazom:

$$N_\gamma = 1.80 (N_c - 1) \tan \phi$$

Nivo podzemne vode može znatno da utiče na nosivost plitkog temelja. Potapanjem tla gubi se prividna kohezija koja je prije potapanja mogla postojati usljed kapilarnih efekata ili slabih cementacionih veza.

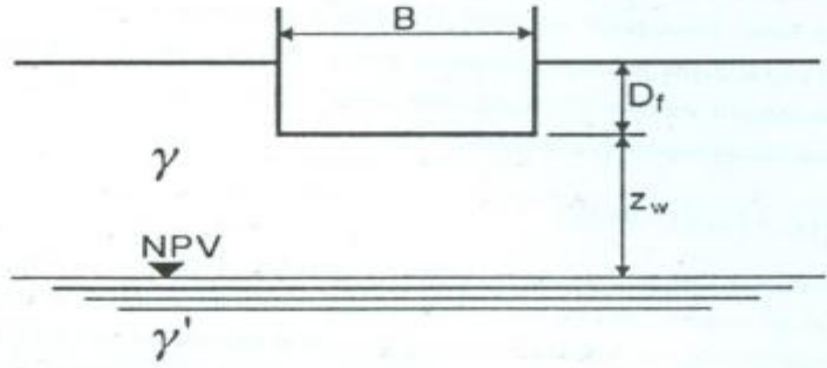
Zbog toga se proračun nosivosti tla provodi za najviši moguć nivo podzemne vode.

Ako je najviši moguć nivo podzemne vode na dubini  $z \leq B$  ispod nivoa temeljne spojnice, efektivna jedinična težina tla uz faktor  $N^w$  može se uzeti na osnovu izraza:

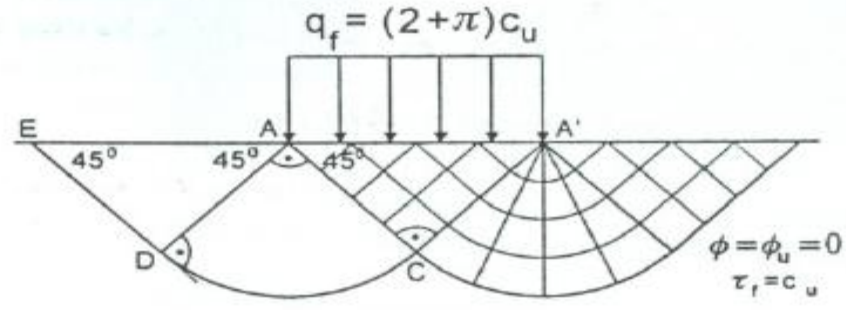
$$\gamma = \gamma' + (z / B)(\gamma - \gamma')$$

gdje je  $\gamma'$  potopljena jedinična težina tla, a  $\gamma$  je jedinična težina vlažnog tla iznad nivoa podzemne vode pri minimalnoj vlažnosti.

Ukoliko je nivo podzemne vode na nivou temeljne spojnice ili iznad nje, treba koristiti jediničnu težinu tla u potopljenom stanju  $\gamma'$ .



Slika 9.6. Uticaj nivoa podzemne vode



Slika 9.7. Mehanizam loma traksatog temelja na zasićenoj glini

Jedno od rijetkih tačnih rješenja, primjenom teorije plastičnosti može se dobiti za material bez trenja, kada je

u nedreniranim uslovima  $\varphi = 0$  sa smičućom čvrstoćom u totalnim naponima  $\tau = c_u$ .

$$q_f = N_c c_u = (2 + \pi) c_u = 5.14 c_u$$

$$c_u = q_f / 2$$

$$q_f = 2.57 q_u$$

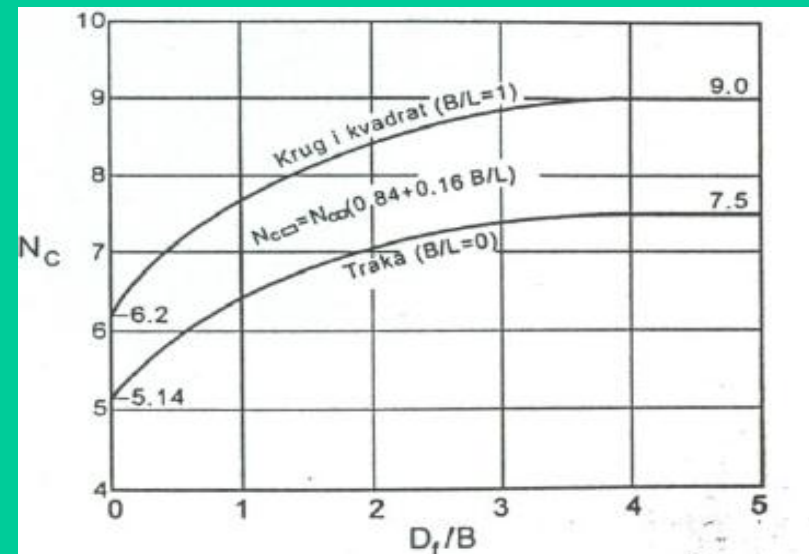
Ako se usvoji faktor sigurnosti  $F_s = 2.57$ , što je vrijednost u granicama za faktor sigurnosti 2 do 3, dobija se da je dopušteno opterećenje tla:

$$q_a = q_f / F_s = q_u$$

Veoma jednostavno i korisno rješenje za graničnu nosivost temelja na zasićenim glinama u nedreniranim uslovima ( $\varphi = 0$ ), dao je **Skempton** u obliku:

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

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



Slika 9.8. Faktori nosivosti prema Skemptonu

**Opšti oblik formule za ekscentrično i koso opterećenje plitkih temelja**

$$q = 0.5 \gamma B N_s d_i + c N_c s d_i + \gamma D N_f q q q q$$

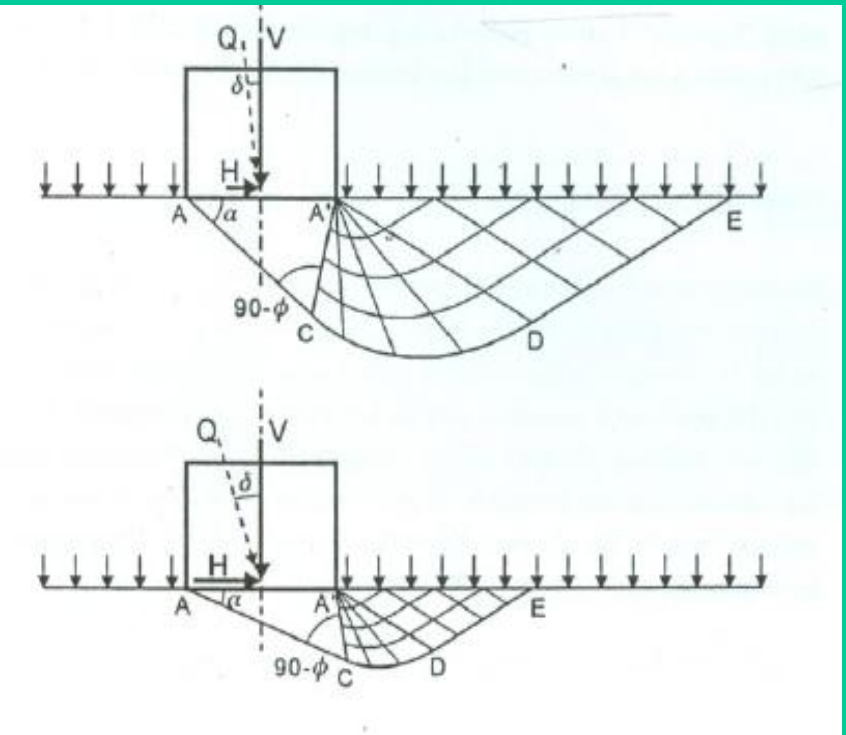
$s, s, s$  su korektivni faktori oblika temelja

$d, d, d$  su korektivni faktori dubine

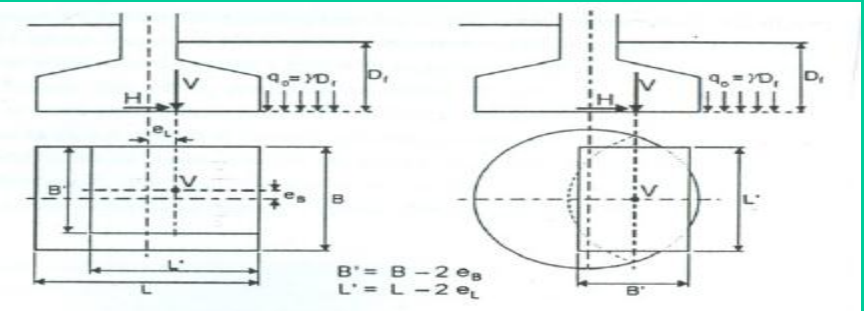
$i, i, i$  su korektivni faktori inklinacije.

Ekscentrični položaj sile može se uzeti u obzir uvođenjem fiktivne efektivne dimenzije osnove temelja koja je datim ekscentričnom opterećenjem stope centrično opterećena.

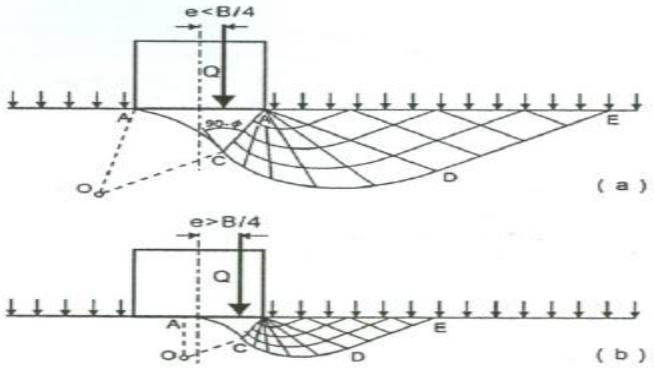
$$B' = B - 2e$$



Slika 9.11. Mehanizam loma tla pri kosom opterećenju plitkog temelja



Slika 9.9. Ekvivalentne i efektivne površine temelja pri ekscentričnom opterećenju



Slika 9.10. Mehanizam loma ispod ekscentrično opterećenog temelja

Vrijednosti  $N_{c'}$   $N_{q'}$   $i$  prema Meyerhof (M), Hansen (H) i Vesic (V)  $N_y$ -faktor

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_y$ (H)	$N_y$ (M)	$N_y$ (V)
0	5.14	1.0	0.0	0.0	0.0
5	6.49	1.6	0.1	0.1	0.4
10	8.34	2.5	0.4	0.4	1.2
15	10.97	3.9	1.2	1.1	2.6
20	14.83	6.4	2.9	2.9	5.4
25	20.71	10.7	6.8	6.8	10.9
26	22.25	11.8	7.9	8.0	12.5
28	25.79	14.7	10.9	11.2	16.7
30	30.13	18.4	15.1	15.7	22.4
32	35.47	23.2	20.8	22.0	30.2
34	42.14	29.4	28.7	31.1	41.0
36	50.55	37.7	40.0	44.4	56.2
38	61.31	48.9	56.1	64.0	77.9
40	72.25	64.1	79.4	93.6	109.4
45	133.73	134.7	200.5	262.3	271.3
50	266.50	318.50	567.4	871.7	762.84

Factors	Meyerhof	Hansen	Vesic
$s_c$	$1 + 0.2 N_\phi \frac{B}{L}$	$1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{B}{L}$	Faktori oblika i dubine po Veiću su isti kao prema Hansen-u
$s_q$	$1 + 0.1 N_\phi \frac{B}{L}$ for $\phi > 10^\circ$	$1 + \frac{B}{L} \tan \phi$	
$s_y$	$s_y = s_q$ for $\phi > 10^\circ$ $s_y = s_q = 1$ for $\phi = 0$	$1 - 0.4 \frac{B}{L}$	
$d_c$	$1 + 0.2 \sqrt{N_\phi} \frac{D_f}{B}$	$1 + 0.4 \frac{D_f}{B}$	
$d_q$	$1 + 0.1 \sqrt{N_\phi} \frac{D_f}{B}$ for $\phi > 10^\circ$	$1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B}$	
$d_y$	$d_y = d_q$ for $\phi > 10^\circ$ $d_y = d_q = 1$ for $\phi = 0$	1 for all $\phi$	
		Note: Vesic's $s$ and $d$ factors = Hansen's $s$ and $d$ factors	
$i_c$	$1 - \frac{\alpha^2}{90}$ for any $\phi$	$i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1}$ for $\phi > 0$	Isti kao H. za $\phi > 0$
		$0.5 \left( 1 - \frac{Q_h}{A_f c_\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}$ for $\phi = 0$	$1 - \frac{m Q_h}{A_f c_\alpha N_c}$
$i_q$	$i_q = i_c$ for any $\phi$	$1 - \frac{0.5 Q_h}{Q_u + A_f c_\alpha \cot \phi}^5$	$1 - \frac{Q_h}{Q_u + A_f c_\alpha \cot \phi}^m$
$i_y$	$1 - \frac{\alpha^2}{\phi}$ for $\phi > 0$ $i_y = 0$ for $\phi = 0$	$1 - \frac{0.7 Q_h}{Q_u + A_f c_\alpha \cot \phi}^5$	$1 - \frac{Q_h}{Q_u + A_f c_\alpha \cot \phi}^{m+1}$

# Nosivost plitkih temelja prema propisima

Za objekte uobičajenih dimenzija, proračun dopuštenog opterećenja temeljnog tla prema kriterijumu granične nosivosti se vrši po metodama koje su definisane odgovarajućim tehničkim propisima.

## NOSIVOST PO PRAVILNIKU

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

$$q_a = V/A' = 0.5 \gamma' B' N_{s i} + (c_m + q_0 \operatorname{tg} \varphi_m) N_{c c c c} + q_0$$

gdje je:

$V$  ukupno vertikalno opterećenje temelja,

$A'$  korisna površina temelja, tj. dio ukupne površine osnove temelja koji je

rezultantnom silom centrično opterećen:  $A' = B' * L'$ ,

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

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

$\varphi_m$  dozvoljeni mobilisani ugao smičuće otpornosti je takav da je:

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \operatorname{tg} \varphi / F_\varphi$$

gdje je  $F_\varphi$  parcijalni faktor sigurnosti za ugao smičuće otpornosti  $F_\varphi = 1.2$  do  $1.8$ ,

$N_\gamma$  i  $N_c$  su faktori nosivosti koji zavise od mobilisanog ugla  $\varphi_m$ ,  $c_m$  je dozvoljena mobilisana kohezija:

$$c_m = c / F_c \text{ gdje je } c \text{ kohezija, } F_c \text{ parcijalni faktor sigurnosti za koheziju } F_c = 2 \text{ do } 3,$$

Faktori oblika su:

$$s = 1 - 0.4 B'/L'$$

$$s_c = 1 + 0.2 B'/L'$$

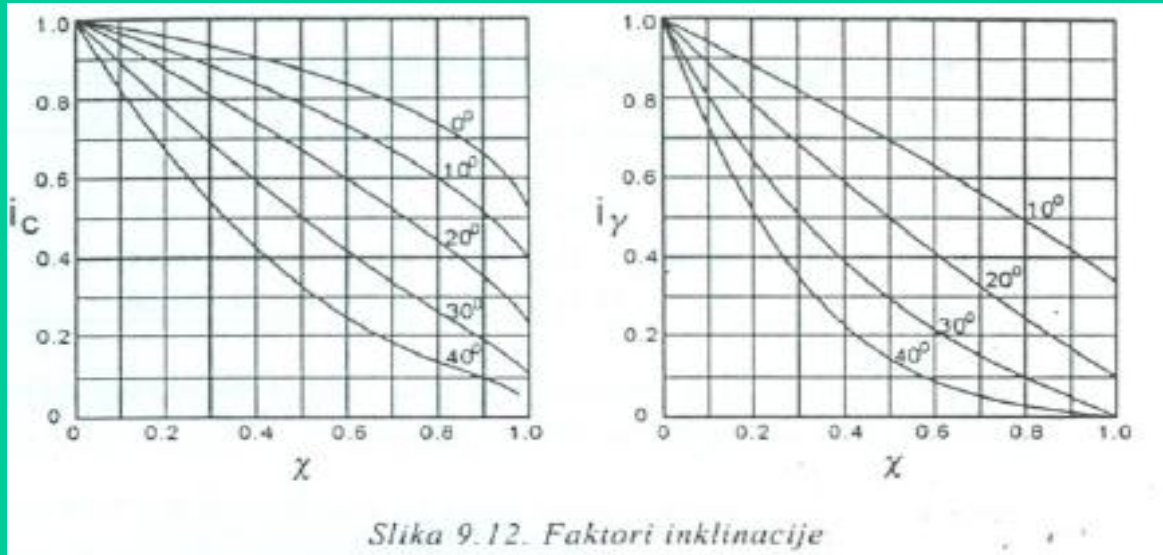
Faktor dubine:

$$d_c = 1 + 0.35 D_f / B' \leq 1.35$$

Faktori nagiba(inklinacije) sile zavise od ugla  $\varphi$  i od odnosa  $\chi$

$$\chi = H / (A' c_m + V \text{tg } \varphi_m)$$

gdje su  $H$  i  $V$  horizontalna, odnosno vertikalna komponenta rezultantne sile koja djeluje na temeljnu spojnicu.



Slika 9.12. Faktori inklinacije



Ako temelj nije centrično opterećen ili nije pravougaonog oblika, stvarna površina se transformiše u pravougaonu efektivnu površinu pod sljedećim uslovima:

- efektivna površina se transformiše kao radijalno simetrična površina tako da je rezultanta u težištu te radijalno simetrične površine,
- efektivna površina se transformiše u pravougaonik sa istim težištem, sa istim osama inercije sa jednakom površinom i sa približno jednakim odnosom dužine prema širini ( $L':B'$ ).

Naš "Pravilnik" iz 1990 god. ne razlikuje sasvim jasno totalne i efektivne napone, drenirane i nedrenirane uslove, a i nije sasvim jasno zašto veličina dopuštenog opterećenja ne zavisi od pravca horizontalne komponente u slučaju kose sile.

### ***NOSIVOST PREMA PRIJEDLOGU EVROCODA 7 (EC7)***

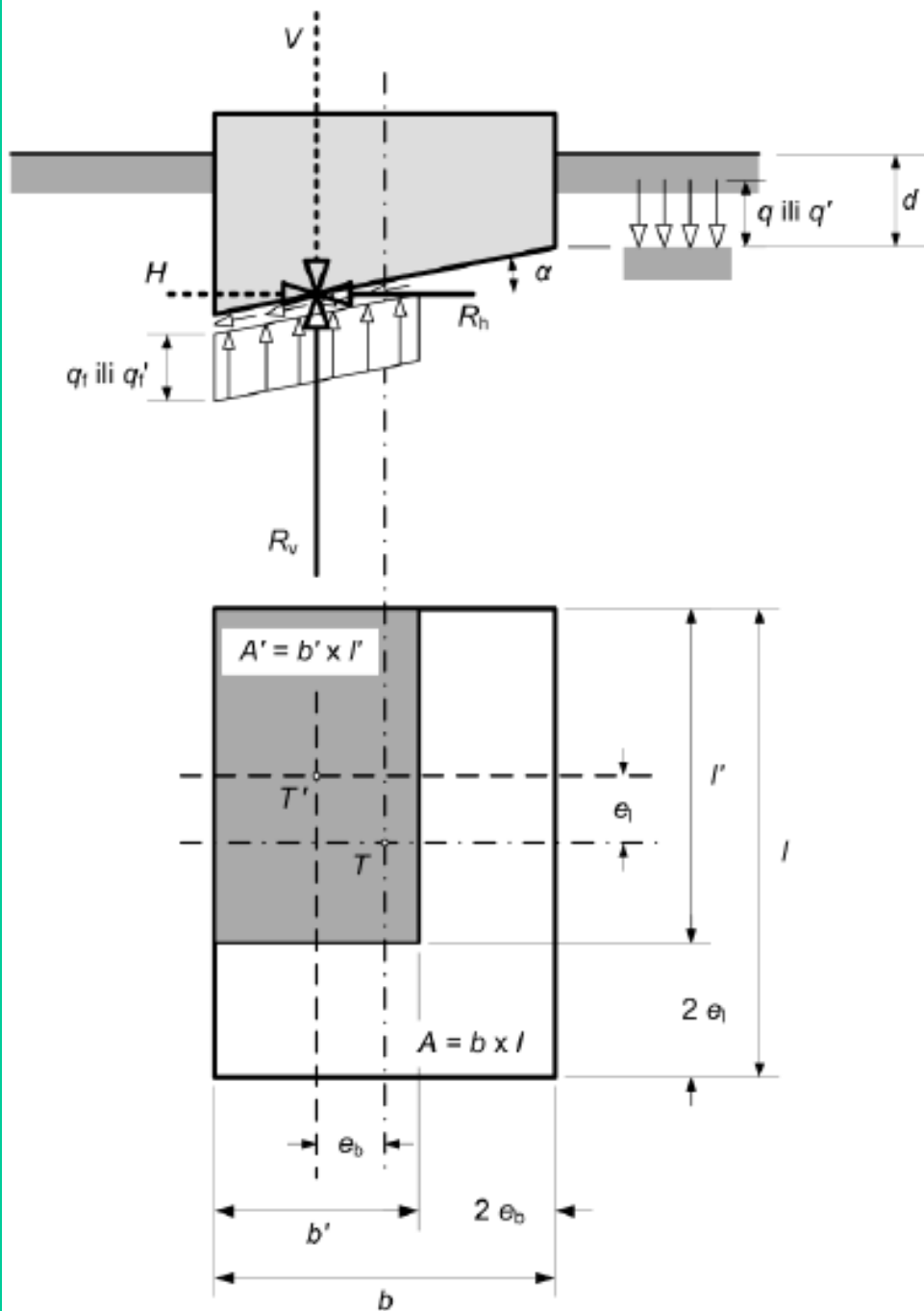
Granična nosivost temeljnog tla, kada je smičuća čvrstoća data nedreniranom kohezijom u nedreniranim uslovima, izračunava se po formuli:

$$R/A' = (2 + \pi) \frac{c}{u} \frac{s}{c} \frac{i}{c} + q$$

gdje su korektivni faktori:

$$\frac{s}{c} = 1 + 0.2 (B'/L')$$

$$i_c = 0.5 \left( 1 + \sqrt{1 - H / A' c_u} \right)$$



### Drenirano stanje

$$R_v/A' = q_f' = c' N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + (1/2) \gamma_b b' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma$$

### Nedrenirano stanje

$$R_v/A' = q_f = (\pi + 2) c_u b_c s_c i_c + q$$

$R_v$ - vertikalna sila otpora tla

$c', \varphi'$ - efektivni (drenirani) parametri

čvrstoće;  $c_u$ - nedrenirana čvrstoda

$\gamma_b$ - uronjena jedinična težina tla ( $\gamma_b = \gamma - \gamma_w$ )

ili jedinična težina tla  $\gamma$ - ako je nivo vode

ispod plastificiranog dijela tla;

$b', l'$ - efektivna širina i dužina temelja (za

ekscentrično opteređenje,  $b' = b - 2e_b$ ,

$l' = l - 2e_l$ )  $e_b, e_l$ - ekscentricitet opterećenja

u smjeru  $b$  i  $l$

$\alpha$ -nagib temeljene plohe

$q, q'$ - vertikalno ukupno ili efektivno

naprezanje u tlu pored temelja na nivou

plićeg dna temeljne plohe (na dubini  $d$ ).

$N_c, N_q, N_\gamma$ - faktori nosivosti  $b_x, s_x, i_x$  faktori

nagiba i oblika temelja, odnosno nagiba

opterećenja

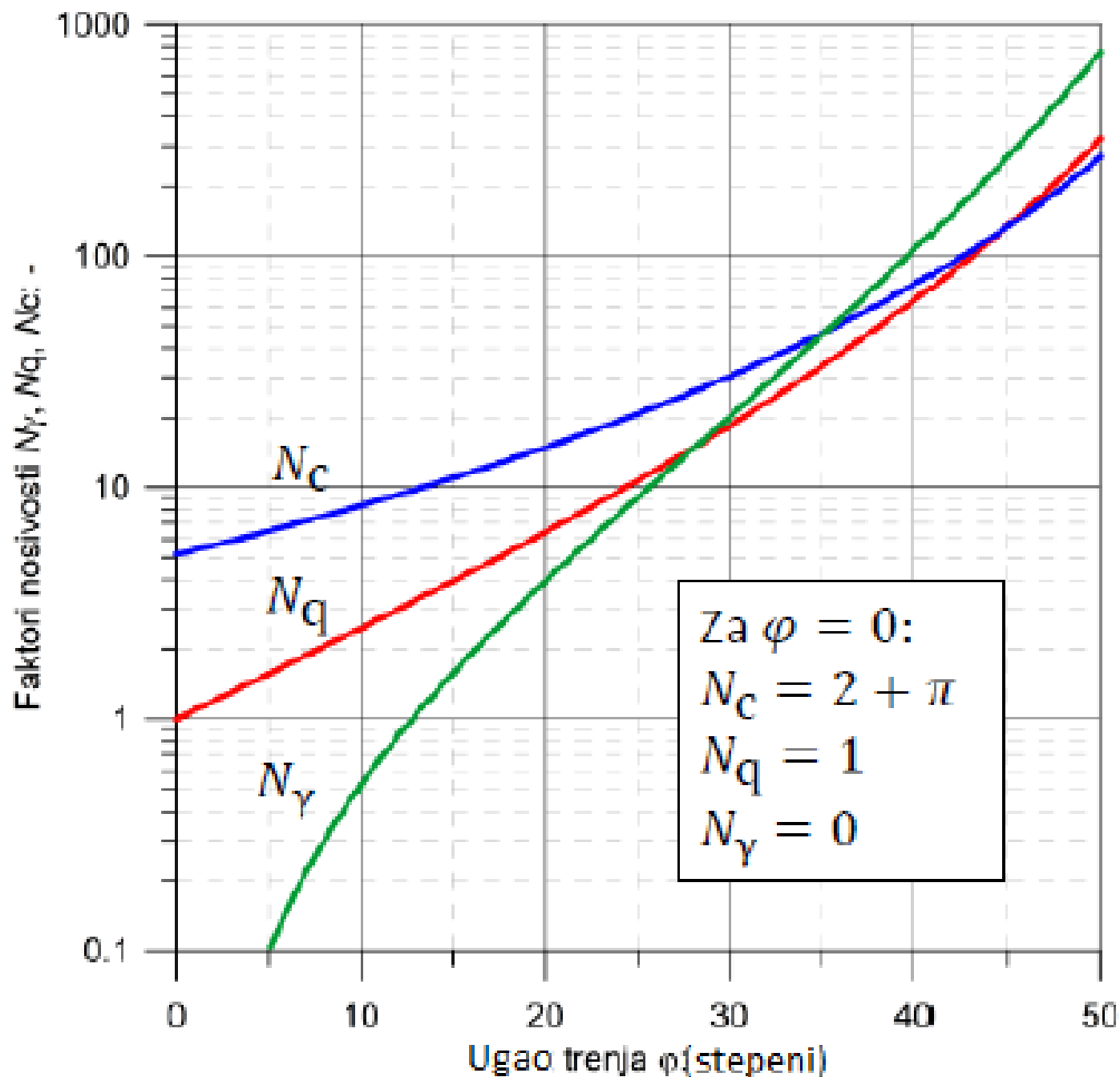
$V, H$  vertikalna i horizontalna komponenta

opterećenja

član	izraz	
	nedrenirano	drenirano
$N_q$	1	$\tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) e^{\pi \tan \varphi'}$
$b_q$	1	$(1 - \alpha \tan \varphi')^2$ ; $\alpha$ izraženo u radijanima
$s_q$	1	$1 + \frac{b'}{l'} \sin \varphi'$
$i_q$	1	$[1 - H/(V + A'c' \cot \varphi')]^m$ , $A' = b'l'$ $m = m_b = \left[ 2 + \frac{b'}{l'} \right] / \left[ 1 + \frac{b'}{l'} \right]$ kad H djeluje u smjeru b $m = m_l = \left[ 2 + \frac{l'}{b'} \right] / \left[ 1 + \frac{l'}{b'} \right]$ kad H djeluje u smjeru l; kad H djeluje pod kutom $\theta$ u odnosu na l, tada je $m = m_\theta = m_l \cos^2 \theta + m_b \sin^2 \theta$
$N_c$	$2 + \pi$	$(N_q - 1) \cot \varphi'$
$b_c$	$1 - 2\alpha/(\pi + 2)$ ; $\alpha$ izraženo u radijanima	$b_q - (1 - b_q)/(N_c \tan \varphi')$
$s_c$	$1 + 0.2 \frac{b'}{l'}$	$(s_q N_q - 1)/(N_q - 1)$
$i_c$	$\frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{H}{A'cU}} \right)$ ; $A' = b'l'$	$i_q - (1 - i_q)/(N_c \tan \varphi')$
$N_\gamma$	0	$2(N_q - 1) \tan \varphi'$
$b_\gamma$	-	$b_q$
$s_\gamma$	-	$1 - 0.3 \frac{b'}{l'}$
$i_\gamma$	-	$[1 - H/(V + A'c' \cot \varphi')]^{m+1}$ ; m kao za $i_q$ , $A' = b'l'$

Faktori  
nosivosti  
prema  
ENV 1997-  
1:2008

(centralno i  
vertikalno  
opterećena  
temeljna  
traka)



## Dodatni izrazi za nosivost izvan Evrokoda 7

- U literaturi se mogu naći mnogi drugi izrazi za posebne slučajeve. Zanimljiv je slijedeći koji se odnosi na nosivost ukopanog plitkog temelja u sitnozrno tlo u nedreniranim uslovima, koji može biti kritičan, posebno ako se radi o slabom tlu (normalno do malo prekonsolidovano).

- Povećanje nosivosti zbog dubine ukopavanja temelja ispod površine sitnozrnog tla u nedreniranim uslovima

$$R/A' = q_f = (\pi + 2)c_u b c_{sc} i_c d_c + q$$

U gornjem izrazu novi je faktor dubine  $d_c$  (u odnosu na ranije definisane faktore oblika i nagiba) koji prema Meyerhofu (1963) se predlaže približni izraz:

$$d_c = \begin{cases} 1 + 0.2 \left( \frac{d}{b'} \right) & \text{za } d/b' \leq 2.5 \\ 1.5 & \text{za } d/b' > 2.5 \end{cases}$$

gdje je  $d$  dubina temeljne plohe mjereno od površine tla.

## •Komentari za korištenje izraza za nosivost tla

- Pri određivanju proračunske otpornosti tla ispod plitkih temelja u smislu Evrokoda 7, za parametre tla treba koristiti proračunske vrijednosti; U PP3 (pr.), to znači da se karakteristične vrijednosti parametara čvrstoće redukuju odgovarajućim parcijalnim koeficijentima (1.25 za efektivnu koheziju i tangens efektivnog ugla trenja, odnosno 1.4 za nedreniranu čvrstodu). **Naročitu pažnju treba posvetiti određivanju karakterističnih vrijednosti parametara čvrstoće kao opreznoj procjeni relevantnih parametara u tlu.**
- Za granično stanje nosivosti treba biti zadovoljeno  $V_d \leq R_d$ .  $V_d$  uključuje vertikalno opterećenje na temelj, težinu temelja, težinu zasipa tla iznad temelja i druga opterećenja tlom i vodom, sve množeno s odgovarajućim parcijalnim koeficijentima. Pritisak vodom koji nije uzrokovan

opterećenjem temelja treba uključiti u djelovanje (na primjer uzgon na temelj treba uključiti u djelovanja kao povoljno, znači s parcijalnim koeficijentom 1.0 ili 0, zavisno radi li se o stalnom ili prolaznom nivou podzemne vode). Otpornost  $R_d$  iznosi  $R_d = q_{fa} A'$  gdje je  $q_{fa}$  proračunska vrijednost nosivosti (za PP3 nosivost tla izračunata za proračunske vrijednosti parametara čvrstode tla -  $c'_d = c'_k / 1.25$ ,  $\tan \varphi'_d = (\tan \varphi'_k) / 1.25$ ,  $c_{ud} = c_{uk} / 1.4$ ;  $A'$  je efektivna površina kontaktne plohe između temelja i tla,  $A' = b'l'$ ; indeksi „d” i „k” označavaju proračunsku, odnosno karakterističnu vrijednost parametra čvrstoće)



- Za sitnozrna slabo propusna tla (gline, prahovi) treba provjeriti nosivost i za nedrenirane i za drenirane uslove; za krupnozrna tla dovoljno je provjeriti nosivost samo za drenirane uslove.
- Za temelje drugačijeg oblika od trakastog ili pravougaonog može se nosivost provjeriti za ekvivalentni pravougaoni temelj iste površine temeljne plohe kao i one analiziranog temelja.
- U račun treba uključiti i najnepovoljniji mogući položaj nivoa podzemne vode.
- Nosivost krupnozrnog tla u dreniranim uslovima (osim vrlo rahlog pijeska, uskog temelja i visoke podzemne vode) vrlo je velika. U tom će slučaju odlučujući kriterijum dimenzionisanja temelja biti dozvoljeno slijeganje.

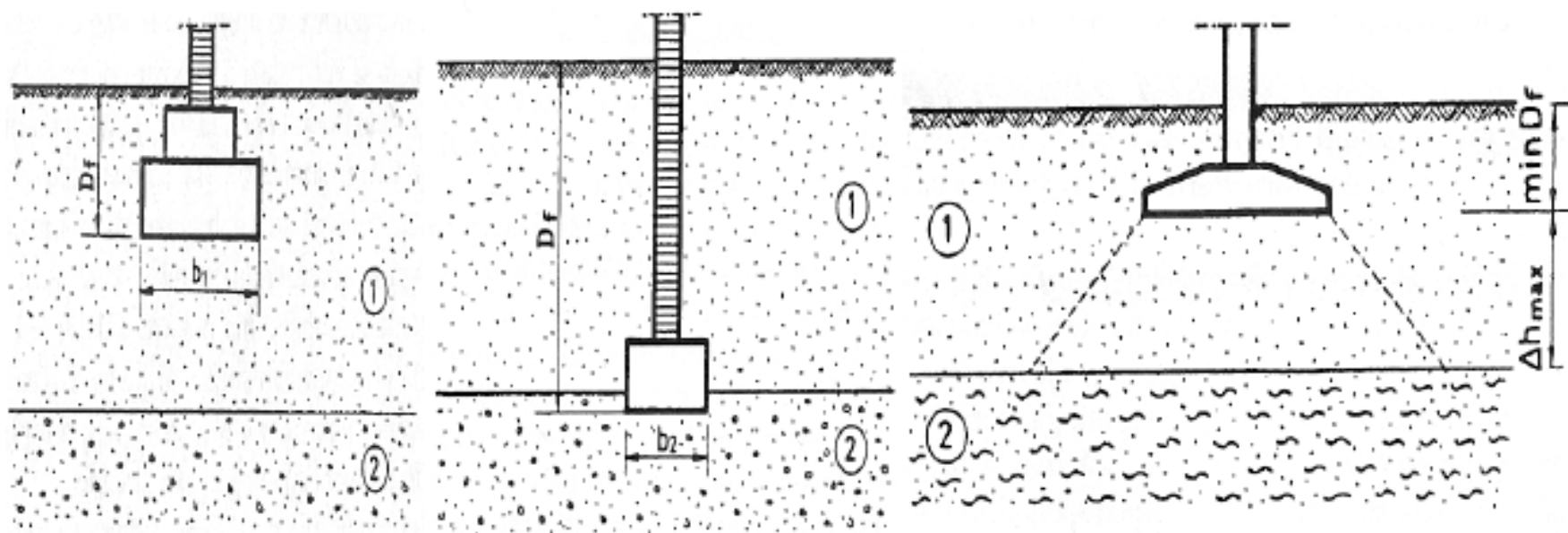
## Neki posebni problemi

### • *Nehomogeno tlo*

– Nehomogeno sitnozrno tlo u nedreniranim uslovima (čvrstoća tla promjenjiva s dubinom ispod nivoa temeljne plohe):

(a) ako nedrenirana čvrstoda varira manje od 50 % u rasponu dubina od 0 do  $2/3$  efektivne širine temelja ( $b'$ ), može se računati s prosječnom čvrstodom u tom rasponu dubina.

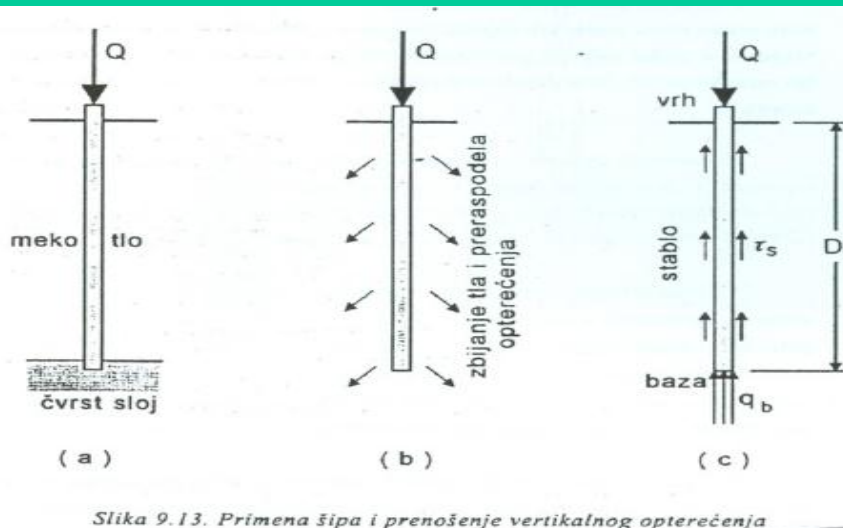
–U slučaju da se ispod čvršćeg sloja nalazi mekši čija čvrstoća ne zadovoljava prethodni uslov, moguće je vertikalno opterećenje temelja rasprostrti na gornju plohu mekog sloja na tlocrtnom obliku koji je sličan tlocrtnom obliku temelja, ali stranica uvećanih za dubinu gornje plohe mekog sloja mjerenu od temeljne plohe („širenje” vertikalnog naprezanja u čvršćem sloju u nagibu 2-vertikalno-prema-1-horizontalno).





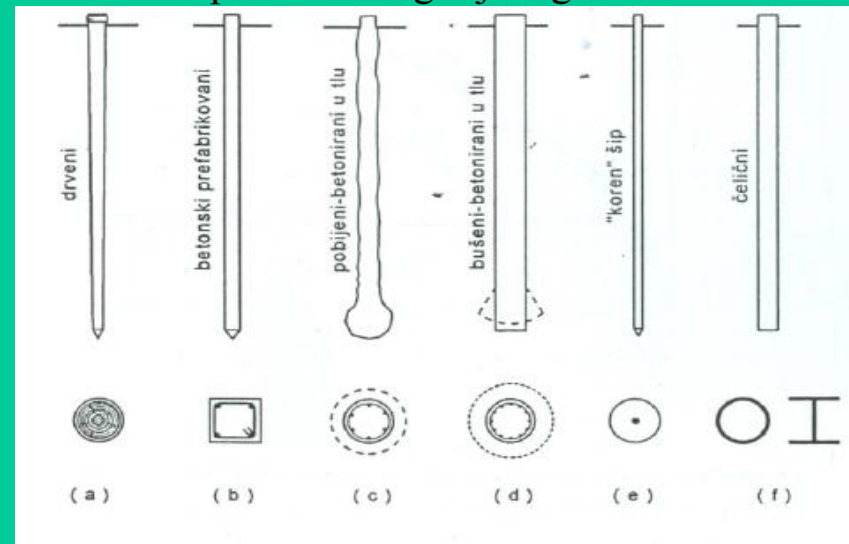
# Nosivost šipova

Konstruktivni oblici dubokog fundiranja su najčešće različite vrste šipova, ali se koriste i dijafragme, bunari ili



Dubokim temeljima se opterećenje prenosi na izvjesnu dubinu ispod korisnog dijela građevinske konstrukcije.

## Vrste šipova



Slika 9.14. Vrste šipova. Red veličine dimenzija dat je u tekstu.

Šip se u tlo može ugraditi na tri načina: pobijanjem udarima po gornjem kraju, statičkim utiskivanjem u tlo i ugrađivanjem u prethodno izrađenu bušotinu.

## Značaj načina ugrađivanja šipa

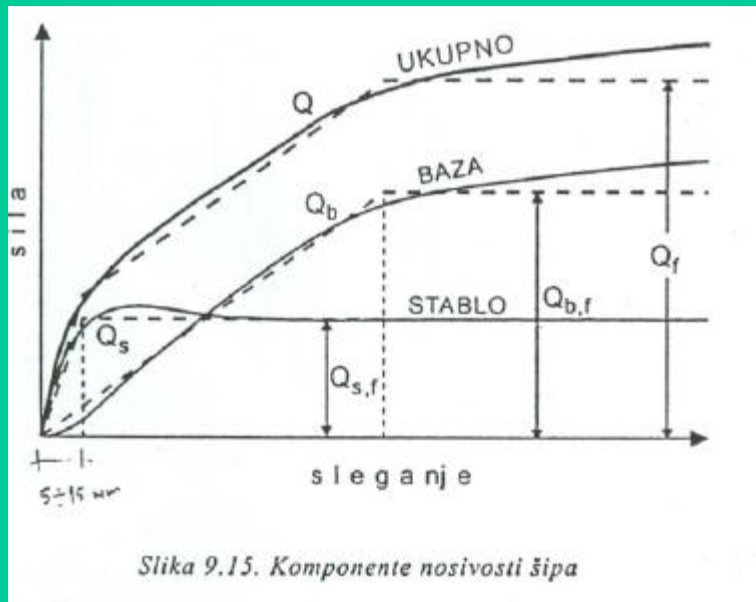
Raspodjela napona u tlu, veličina sleganja i granična nosivost šipa zavisi od načina ugrađivanja šipa.

U krupnozrnom rastresitom i srednje zbijenom tlu obično dolazi do zbijanja i povećanja smičuće čvrstoće pri ugrađivanju šipa utiskivanjem ili pobijanjem. Međutim, u veoma zbijenom tlu može doći i do razrahljivanja, jer se prekoračuje vršna smičuća čvrstoća, savladavaju se efekti dilatancije i nakon povećanja zapremine, smicanje se događa pri konstantnoj zapremini tako da smičuća čvrstoća može opasti do veličine uslovljene sa

$$\varphi'_{cv}$$

## Mehanizam prenošenja opterećenja

Vertikalna sila  $Q$  nanijeta na vrh šipa prenosi se na tlo preko baze šipa komponentom  $Q_b$  i preko komponente stabla  $Q_s$ .



Ove dvije komponente pri radnom opterećenju nisu mobilisane u istim proporcijama graničnih nosivosti.

# Granična nosivost

Ukupna granična nosivost jednaka je zbiru nosivosti baze  $Q_{b,f}$  i nosivosti stabla  $Q_{s,f}$ , odnosno:

$$Q_f = Q_{b,f} + Q_{s,f}$$

Granična nosivost **baze šipa** je:

$$Q_{b,f} = A_b q_{b,f}$$

gdje je:  $A_b$  površina baze šipa,  $q_{b,f}$  granična nosivost tla u području baze šipa.

Granična nosivost **omotača šipa** je:

$$Q_{s,f} = \sum (\Delta L)_s a_s \tau_{s,f}$$

gdje je:  $\Delta L$  dužina dijela šipa,  $a_s$  površina omotača stabla po jedinici dužine šipa,  $\tau_{s,f}$  smičuća čvrstoća, granični napon smicanja na kontaktu omotača i tla.

## Teorijske metode

Opšti izraz za graničnu nosivost baze šipa ima oblik:

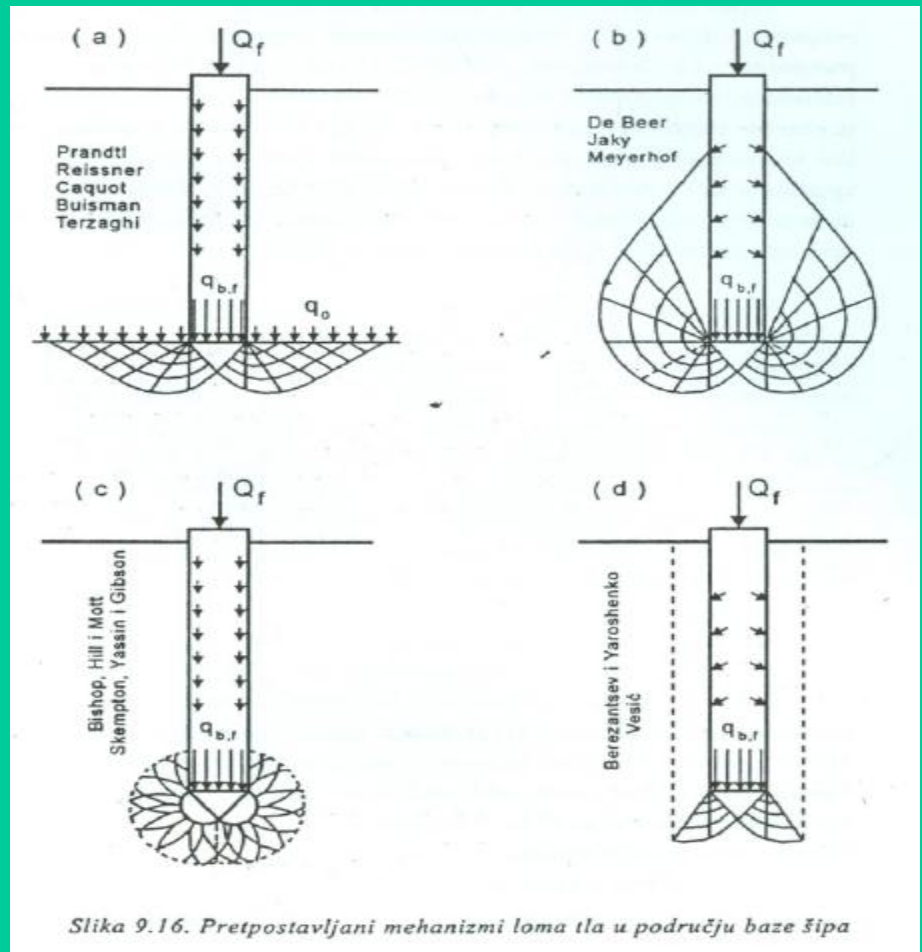
$$q_{b,f} = c_c N_c^* + q_0 N_q^*$$

gdje je:  $N_c^*$  faktor nosivosti sa faktorima oblika i dubine tj.  $N_{c,c,c}$   $N_{s,c,c}$   $N_{d,c}$

$N_q^*$  faktor nosivosti sa faktorima oblika i dubine tj.  $N_{q,q,q}$

$q_0$  vertikalni napon u nivou baze šipa usljed sopstvene težine tla  $\gamma D_f$ .

Oblik mehanizma loma tla u području baze šipa je manje poznat nego što je to slučaj kod plitkog temelja, takoda se zavisno od pretpostavljenog mehanizma loma mogu dobiti i veoma različite vrijednosti za faktore nosivosti.

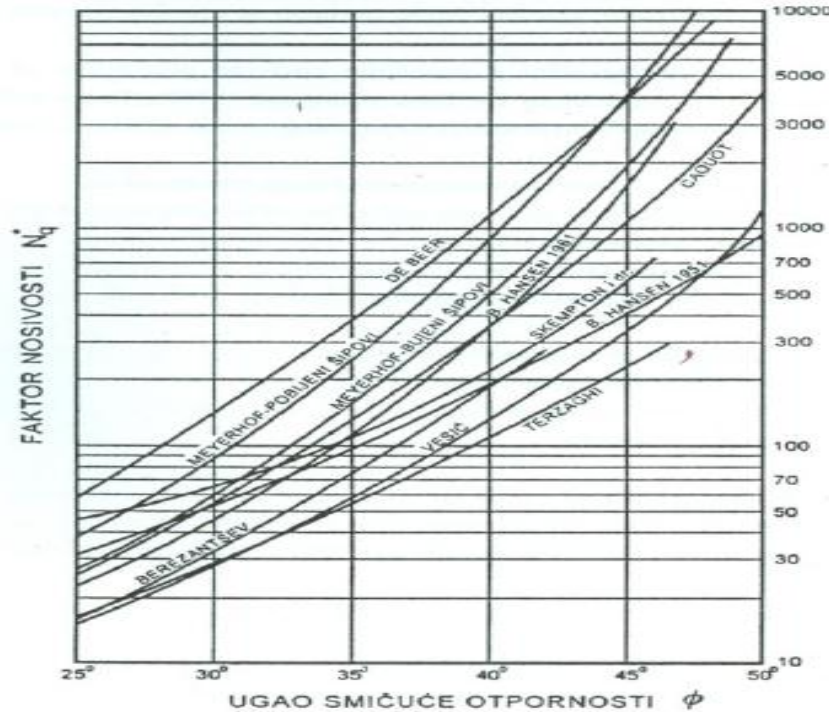


Slika 9.16. Pretpostavljeni mehanizmi loma tla u području baze šipa

Za totalne napone, u karakterističnom sličaju šipa u zasićenoj glini, za koju je u nedreniranim uslovima smičuća čvrstoća tla  $\tau = c$  i  $\varphi = 0$ , nosivost baze šipa je:

$$q_{bf} = c N_c + \gamma D N_q = 9c + q_0$$

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



Slika 9.17. Faktori nosivosti baze šipa kružnog ili kvadratnog preseka

Za graničnu nosivost baze šipa, kada je  $c = 0$  i ugao smičuće otpornosti je  $\phi'$ , dobija se da je:

$$q_{bf} = \gamma D_f N_q^* = q' N_q^*$$

gdje  $N_q^*$  faktor nosivosti zavisi od  $\phi'$  prema nekoj od prihvatljivih teorija.

$q$

Tabela 9.4 Faktori nosivosti  $N_q^*$

$\phi'$	$28^0$	$30^0$	$32^0$	$34^0$	$36^0$	$38^0$	$40^0$
$N_q^*$ L/B=25	12	17	25	40	58	89	137
L/B=50	9	14	22	37	56	88	136

Granični smičući napon na omotaču šipa se može u opštni slučaj, izraziti u obliku.

$$\tau_{s,f} = c_a + \sigma_h \operatorname{tg} \delta$$

gdje je

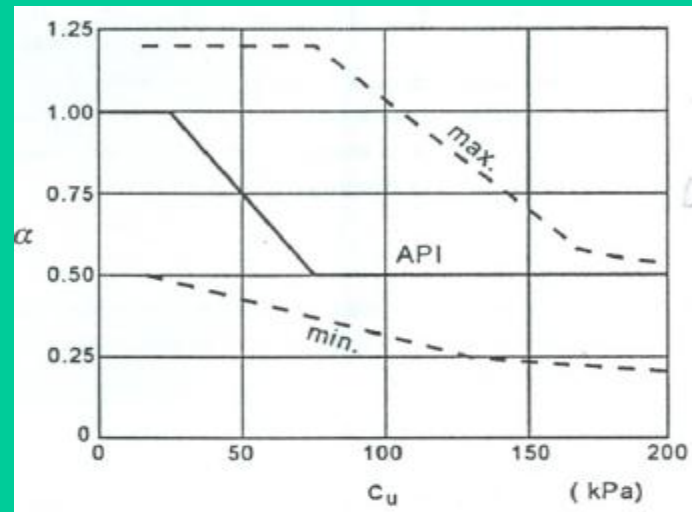
- $c_a$  adhezija tj. kohezija između tla materijala šipa,
- $\sigma_h$  horizontalni napon na kontaktu omotača stabla šipa i tla
- $\delta$  ugao trenja između tla i omotača šipa zavisi od vrste materijala od koga je izrađen šip; za betonske i drvene

šipove obično se usvaja da je  $\delta = \varphi$ , a za čelične  $\delta = \varphi/2$ .

Granična veličina smičuće otpornosti po omotaču šipa u vodom zasićenoj glini može se izraziti preko nedrenirane kohezije  $c_u$ , uz pretpostavku da je trenje izraženo uglovima  $\varphi_u = \delta_u = 0$ :

$$\tau_{s,f} = c_a = \alpha c_u \quad \text{Tomlinson(1957)}$$

gdje je  $\alpha$  adhezioni faktor, koeficijent redukcije nedrenirane smičuće čvrstoće na kontaktu tla i površine omotača šipa.



Slika 9.18. Smičući otpor omotača šipa u glini

## Primjena statičkog penetracionog opita (CPT)

Statički penetrometar se, prije svega koristi za ispitivanje pijeskova.

Granična nosivost baze šipa je proporcionalna otporu vrha penetrometra:  $q_{b,f} = \alpha \frac{q}{b} c$

Koeficijent  $\alpha$  je korektivni koeficijent koji zavisi od načina ugrađivanja šipa.

Smičući otpor  $\tau_b$  po omotaču stabla šipa se može procijeniti iz izmjerenih bočnih otpora u opitu statičkim penetrometrom. Često se za procjenu smičućeg otpora po omotaču šipa koriste i razne empirijske korelacije

sa otporom vrha penetrometra:  $\tau_{s,f} = q_c / 200$  ako je  $q_c \geq 20 \text{ MPa}$  odnosno  $\tau_{s,f} = q_c / 150$

ako je  $q_c \leq 10 \text{ MPa}$  pri čemu je gornja granica 100-120 kPa.

## Primjena standardnog penetracionog opita (SPT)

Rezultati standardnog penetracionog opita se mogu upotrijebiti za prognozu granične nosivosti baze šipa, u načelu, na tri načina.

Prvi način podrazumjeva da se na osnovu empirijskih korelacija procijene parametri smičuće čvrstoće, koji se zatim uvrste u ranije date teorijske izraze koji te parametre sadrže.

Drugi način bi podrazumjevaao primjenu korelacije između broja udara u standardnom penetracionom opitu sa otporom vrha statičkog penetrometra, te primjenu prethodno opisanog postupka korišćenjem CPT opita.

Treći način bi bio direktno empirijski, pri čemu se obično koristi oblik:

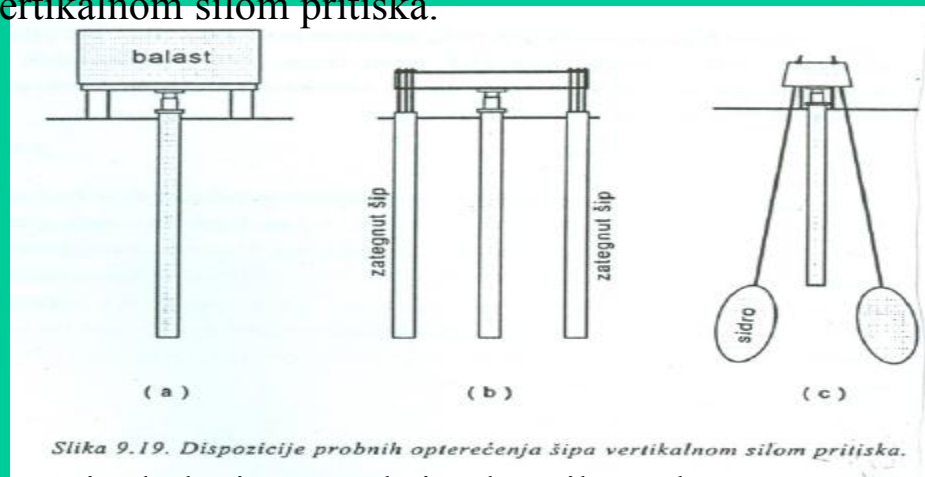
$$q_{b,f} = K N$$

gdje je:  $K$  koeficijent koji zavisi od vrste tla i načina ugrađivanja šipa ( $\text{MN}/\text{m}^2$ ),

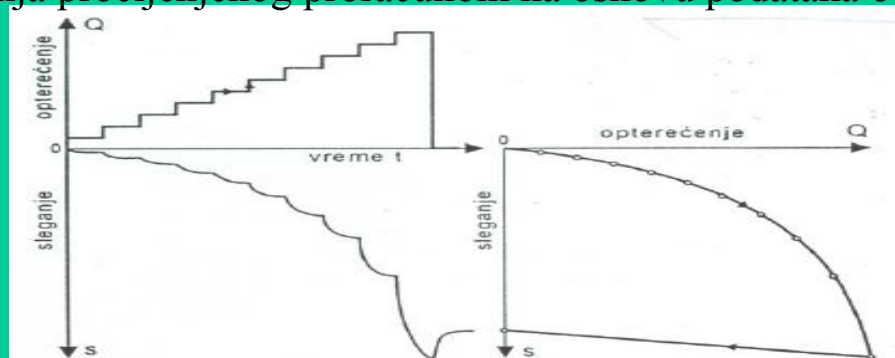
$N$  broj udara u standardnom penetracionom opitu (SPT).

# Probno opterećenje šipa

Razlika između proračunom prognoziranih veličina i stvarnih nosivosti može iznositi i preko 50%. Najčešće se rade probna opterećenja pojedinačnog šipa vertikalnom silom pritiska.



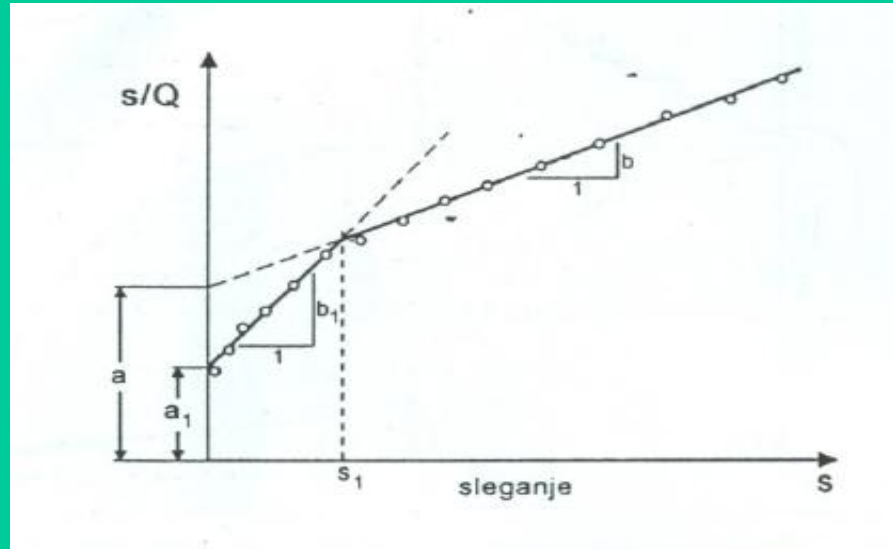
Obično se preporučuje da balast bude za 10-20% teži od planirane maksimalne sile probnog opterećenja. Oslanjanje balasta treba izvesti što dalje od probnog šipa, kako bi se minimizirao uticaj balasta na šip. Osim primjene balasta, reakcije se mogu obezbijediti sidrenjem krutog čeličnog nosača za susjedne šipove koji će reaktivnim opterećenjem biti opterećeni čupanjem ili sidrenjem privremene naglavnice šipa u slojeve čvršćeg tla ili stijene na pristupačnoj dubini. Poželjno je provesti probno opterećenje šipa do loma tla (ili šipa) jer se tako dobija granična nosivost. Radi smanjenja troškova, šip se može opterećivati do veličine koja je za 1.5 do 2.0 puta veća od njegovog opterećenja procijenjenog proračunom na osnovu podataka o tlu, što može biti i manje od sile koja izaziva lom tla.



Slika 9.20. Probno opterećivanje šipa – dijagrami.



# METODA HIPERBOLIČKE EKSTRAPOLACIJE



Slika 9.21. Hiperbolička funkcija za određivanje granične nosivosti šipa

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

$$Q = s / (a + b s)$$

gdje su  $a$  i  $b$  parametri prave transformisane hiperbole koji se mogu odrediti iz mjenjenih veličina sleganja nakon ispisivanja gornjeg izraza u obliku

$$s/Q = a + b s$$

Kada sleganje  $s$  teži beskonačnosti, asimptotska vrijednost izraza daje jednu moguću definiciju granične

nosivosti šipa kao:

$$Q_f = 1/b$$

Konvencionalnim optima probnog opterećenja dobija se samo ukupno granično opterećenje, pri čemu je to zbir komponenti nosivosti baze šipa i omotača. Generalno je ustanovljeno da su relativno mala sleganja šipa dovoljna da se u punoj mjeri mobilišu smičući naponi i granična nosivost omotača šipa. Za dostizanje granične nosivosti baze šipa potrebna su znatno veća pomjeranja u odnosu na pomjeranja potrebna za dostizanje granične nosivosti omotača šipa.

Pretpostavljajući da je pri sleganju  $s_1$  došlo do pune mobilizacije nosivosti omotača šipa, odnosno nelinearno

elastično – savršeno plastično ponašanje kontakta tla i omotača, i da je početni dio zavisnosti sile koja djeluje na bazu šipa linearna funkcija sleganja, dobija se sljedeći izraz za graničnu nosivost omotača:

$$Q_{s,f} = s_1^2 b_1 / (a_1 + b_1 s_1)^2$$

gdje je sleganje pri plastifikaciji omotača

$$s_1 = (a_1 - a) / (b_1 - b)$$

$$Q_{b,f} = Q_f - Q_{s,f}$$

# Dopušteno opterećenje šipa

Dopušteno opterećenje šipa je:

$$Q_a = Q / F_s \quad \text{gdje je faktor sigurnosti } F_s = 1.8 \text{ do } 4.0, \text{ sa karakterističnom vrijednošću od oko } 2.5.$$
$$Q_a = (Q_{s,f}^f + Q_{b,f}^s) / F_s \qquad Q_a = Q_{b,f} / F_{S,b} + Q_{s,f} / F_{S,s}$$

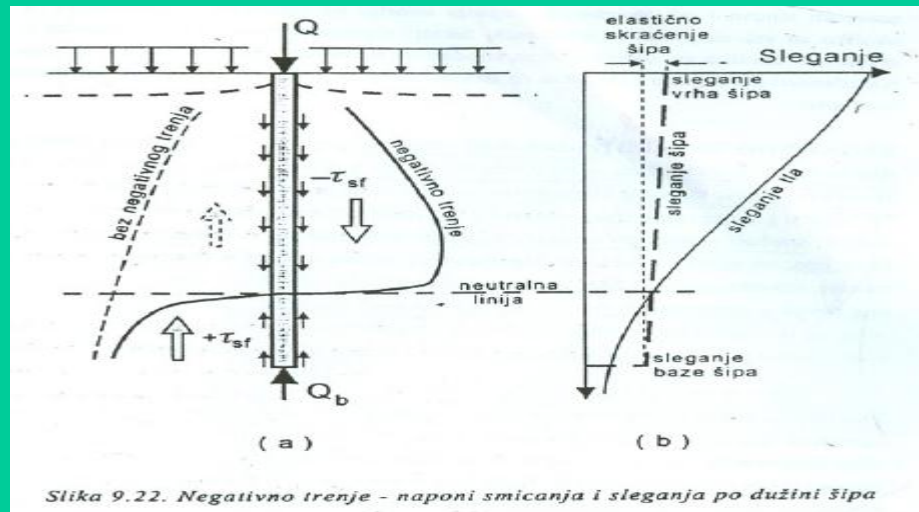
Faktor sigurosti za bazu je  $F_{S,b} = 3 \text{ do } 4$ , a za omotač

$F_{S,s} = 1.0 \text{ do } 1.5$

## Negativno trenje

Poseban oblik vertikalnog opterećenja šipa može nastati ukoliko se tlo u području šipa sleže u odnosu na šip u procesu konsolidacije.

Dovoljna su i sasvim mala sleganja tla da izazovu dopunsko vertikalno opterećenje šipa.



Slika 9.22. Negativno trenje - naponi smicanja i sleganja po dužini šipa

Negativno trenje i pozitivni optor na kontaktu omotača i tla ne mogu se istovremeno pojaviti na istom dijelu šipa.

## Grupa šipova

Šipovi se najčešće koriste u grupama od po nekoliko šipova ispod pojedinačne stope, do velikog broja ispod cijelog objekta.

Za šipove u grupi se obično usvaja da je nosivost grupe jednaka zbiru nosivosti pojedinačnih šipova u grupi.

Međutim, grupa šipova u krupnozrnom tlu ima obično veću nosivost od zbira nosivosti pojedinačnih šipova, tako da se u takvom slučaju govori o efikasnosti grupe šipova koja je veća od jedinice.

Ako je osovinsko rastojanje šipova veće od oko 7 prečnika, svaki šip se ponaša kao pojedinačan šip. Veličina sleganja grupe šipova je uvijek veća od sleganja pojedinačnog šipa pri istom prosječnom opterećenju šipova u grupi.

## *REZIME*

U ovom poglavlju prikazane su teorijske, poluempirijske i empirijske metode za određivanje graničnog i dopuštenog opterećenja plitkih temelja i šipova. Dopušteno opterećenje temeljnog tla je tipično oko 1/2 do 1/3 graničnog opterećenja.

Granično opterećenje vertikalno ili koso opterećenih plitkih temelja se zasniva na primjeni metode plastične ravnoteže koja se koriguje empirijski određenim koeficijentima. Metode su, manje ili više, standardizovane normativima.

Za temelje na krupnozrn timerodavni su parametri smičuće čvrstoće za efektivne napone jer se pretpostavljaju drenirani uslovi. Za temelje na sitnozrn timerodavni su parametri smičuće čvrstoće opisani nedreniranom kohezijom. U slučaju plitkih temelja, veličine dopuštenih sleganja, uz uslove sigurnosti protiv proloma temeljn timerodavni za prihvatljivost rješenja temeljenja.

U slučaju da se zadovoljavajuće rješenje fundiranja uz ispunjavanje uslova o graničnoj nosivosti i dopuštenim sleganjima ne može postići plitkim temeljenjem ili poboljšanjem temeljn timerodavni, primjenjuje se duboko fundiranje, najčešće na šipovima. Granična nosivost vertikalno opterećenog šipa se, osim po metodama plastične ravnoteže, određuje primjenom rezultata penetracionih opita i probnih opterećenja. Pouzdanost teorijskih metoda za određivanje granične nosivosti šipa, koje koriste laboratorijski mjerene parametre, je znatno manja nego u slučaju plitkih temelja.