

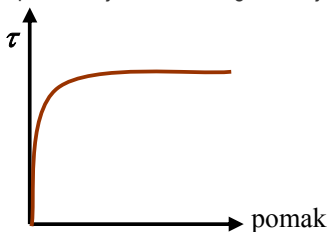
## 9 Aktivni tlak i pasivni otpor, stanje mirovanja. Uvod u nosivost temelja i pritisak tla na poduporne konstrukcije.

### 9.1 Razvoj slijeganja pod temeljem. Pojam nosivosti temelja.

Temelj je dio građevine koji leži na tlu, te opterećenje građevine prenosi na tlo, a rezultirajuće deformacije tla unosi u građevinu. Temelj treba oblikovati tako da slijeganje temelja bude dovoljno maleno – vodeći računa kako o tehnološkom funkcioniranju sadržaja građevine, tako i o deformacijama tj. naprezanjima u nosivoj konstrukciji, te ostalim elementima građevine – ne zaboravljajući na različite uvjete u kojima se građevina može naći: nastajanje/građenje, vjetar, snijeg,... potres...

Porast opterećenja na neki temelj na danom tlu općenito izaziva (1) rast slijeganja i (2) rast gradijenta slijeganja (tj. slijeganje s rastom opterećenja raste sve više i više).

**Slika 9-2.** Razvoj posmičnih naprezanja i pomaka tijekom izravnog smicanja.



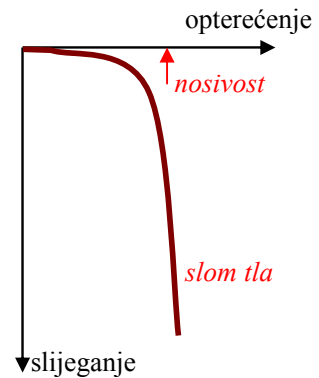
Već pri malenim opterećenjima, oko rubova krutih temelja – uslijed koncentracije naprezanja – razvijaju se velike, plastične deformacije. (v. [Deformabilnost i čvrstoća tla](#)) Sa rastom opterećenja, raste i područje u kojima se razvijaju plastične deformacije.

Granično opterećenje – pri kome dolazi do nekontrolirano velikih deformacija u tlu, ili sloma tla – zovemo **nosivost**. Zato temelj oblikujemo tako da opterećenje koje ćemo na temelj nanijeti bude dovoljno manje od nosivosti → govorimo o **opterećenju dopustivom obzirom na slom tla pod temeljem**. Tako postizemo još nešto: da jednostavni postupci za procjenu slijeganja temelja daju dovoljno pouzdane rezultate.

Time je uobičajena provjera dimenzija temelja svedena na dva koraka:

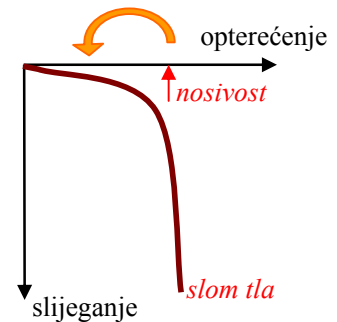
- provjera dopustivih opterećenja obzirom na slom tla pod temeljem i
- provjera slijeganja,

te nam je potrebno poznavanje kako zahtjeva na građevinu i nosivu konstrukciju, tako i uvjeta u tlu: stišljivosti, čvrstoće i drugih osobina.



**Slika 9-1.** Razvoj slijeganja s porastom opterećenja određenog oblika za neki temelj na nekom tlu.

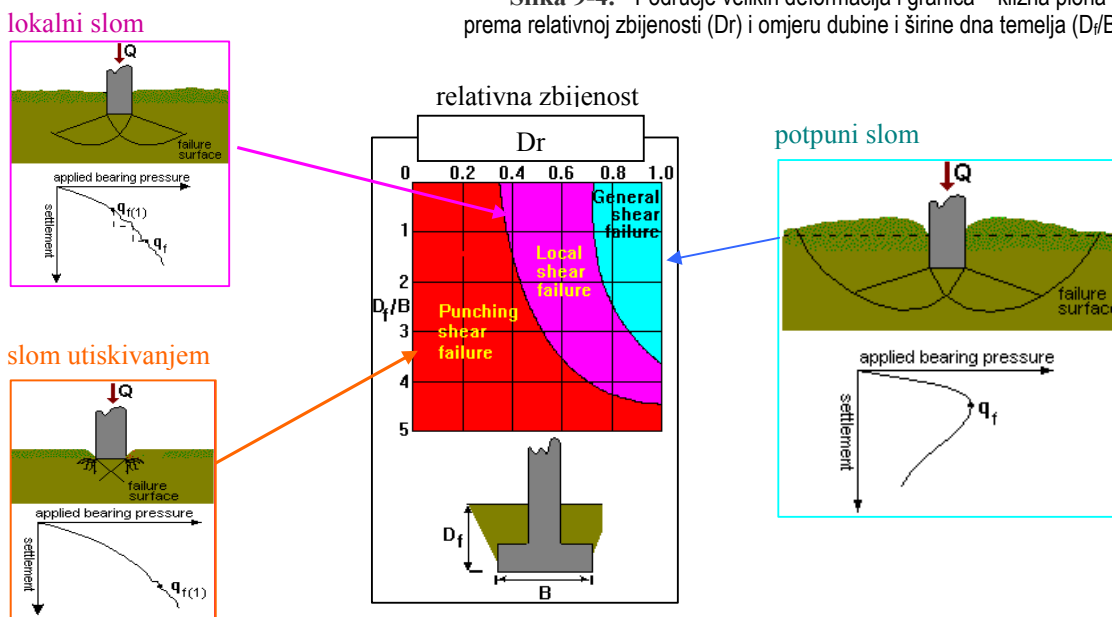
**Slika 9-3.** Nosivost i dopustivo opterećenje obzirom na slom tla.



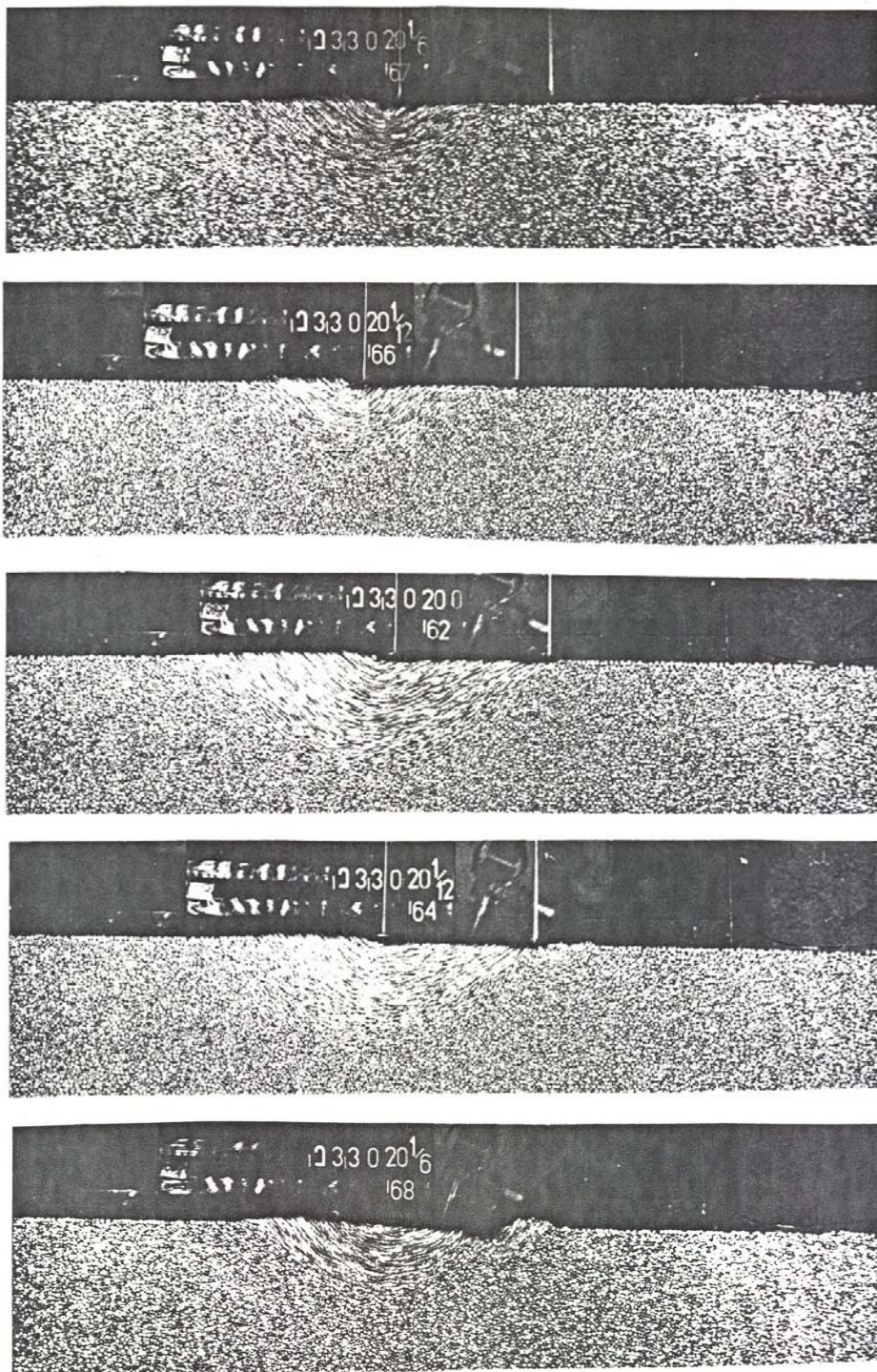
Uobičajeno je opterećenje koje odgovara slomu tla, nosivosti, odrediti prema jednostavnim izrazima izvedenim iz ravnoteže područja obuhvaćenog velikim, plastičnim deformacijama.

U srednje stišljivim ili rahlim tlima, bitno slijeganje može biti ostvareno uslijed “lokalnog loma”, tj područje velikih, plastičnih deformacija, razvija se samo u području ispod dna temelja, a krivulja opterećenje-slijeganje bitno je strmija, kao na skici ispod. U vrlo slabim stišljivim ili rahlim tlima, velike deformacije mogu biti ograničene na područje tik uz temelj. Krivulja opterećenje-slijeganje bude kao na slijedećoj skici. Kojem tlu/ obliku temelja odgovara koji slučaj, prikazuje desna skica: najdesnije područje za opći slom, srednje za lokalni slom, lijevo za utiskivanje temelja. (Uokvirene skice uzete su sa <http://fbe.uwe.ac.uk/public/geocal/geoweb.htm>)

Slika 9-4. Područje velikih deformacija i granica – klizna ploha – prema relativnoj zbijenosti ( $D_r$ ) i omjeru dubine i širine dna temelja ( $D_f/B$ )



Slika 9-5. Modelska ispitivanja na dvodimenzionalnom modelu: područje velikih deformacija pri slomu tla (model Taylor-Schneebeili: aluminijski valjčici jednakih duljina složeni između dviju ploča koje se prije opterećivanja odmaknu; ispitivanja provedena na sveučilištu Polytechnika Gdańska, Gdańsk, Poljska).



## 9.2 Stanje mirovanja.

**Stanje mirovanja** (v. Naprezanja u tlu) je stanje u kome je horizontalna deformacija spriječena. Općenito u stanju mirovanja  $\sigma'_h = \sigma'_v K_0$  gdje  $K_0$  zovemo **koeficijent mirovanja**. Koeficijent mirovanja se mijenja sa razvojem opterećenja ili rasterećenja.

**Za normalno konsolidirana tla** primjenjuje se najčešće **Jaki-eva empirijska relacija**

$$K_0 = 1 - \sin \phi'$$

Pri rasterećenju, tj. za prekonsolidirana tla,  $K_0$  raste. U literaturi se mogu naći korelacije  $K_0$  sa stupnjem prekonsolidacije. Vrijednosti horizontalnog naprezanja mogu se izmjeriti in situ, ili se mogu preračunati iz u laboratoriju izmjerene vrijednosti  $K_0$ .

Govorimo li o pritiscima tla na podupornu konstrukciju, pritisci tla bliski su onima u stanju mirovanja ako tijekom izvedbe poduporne konstrukcije ne dolazi do deformacije u horizontalnom smjeru niti do zbijanja tla.

## 9.3 Granična stanja. Aktivni tlak i pasivni otpor.

Ugradimo li u homogenu normalno konsolidirano tlo horizontalne površine – bez poremećivanja – krutu zagatnu stijenu glatkih ploha, pritisci tla na zagatnu stijenu odgovarat će stanju mirovanja i bit će jednaki

$\sigma_{h0} = \sigma_v K_0$  za svaku dubinu. Odgovarajuća Mohrova kružnica za neku izabranu dubinu u slijedećoj je skici ucrтана crtkano i crno: najveće normalno naprezanje je  $\sigma_v$ , a najmanje je  $\sigma_{h0}$ .

Zakrećemo li tu krutu stijenu, time izazivamo horizontalno rastezanje u dijelu tla (lijeva strana na slijedećoj skici), te smanjivanje horizontalnih naprezanja i pritisaka tla na stijenu, pri čemu vertikalna naprezanja ostaju jednaka. Odgovarajuće Mohrove kružnice imaju, dakle, najveća naprezanja stalne vrijednosti  $\sigma_v$ , a najmanja su vrijednosti  $\sigma_h$ , koja u Mohrovom dijagramu putuje prema lijevo kako je prikazano crtkanom crvenom linijom. U donjoj skici ucrтана je i anvelopa sloma određena parametrima čvrstoće  $c$  i  $\phi$  koja ograničava moguća stanja naprezanja. Dakle, najmanja vrijednost  $\sigma_{h \min} = \sigma_A$  odgovara Mohrovoj kružnici koja tangira anvelopu sloma i u donjoj je skici prikazana crveno. Odgovarajuće stanje naprezanja zovemo **aktivno Rankine-ovo stanje**.

Za Mohrovu kružnicu u aktivnom Rankine-ovom stanju, pol je točka  $P_A$  koja odgovara paru naprezanja  $\sigma_A, \theta$ . Diralištima Mohrove kružnice i anvelope sloma, točkama  $D_A$  i  $T_A$  odgovaraju parovi naprezanja za koje vrijedi  $|\tau| = \tau_r = \sigma \operatorname{tg} \phi + c$ , a odgovarajuće su ravnine paralelne pravcima  $D_A P_A$  i  $T_A P_A$ . To znači da u blizini skicirane krute zagatne stijene do velikih deformacija tj. do sloma tla dolazi u ravnina paralelnih pravcima  $D_A P_A$  i  $T_A P_A$ . Tako je i određena i granica područja u kome dolazi do velikih deformacija.

Veličina minimalne vrijednosti horizontalnog naprezanja za neku dubinu može se jednostavno izvesti iz trigonometrijskog razmatranja Mohrovog dijagrama:

$$\sigma_A = \sigma_v \operatorname{tg}^2 (\pi/4 - \phi/2) - 2c \operatorname{tg} (\pi/4 - \phi/2)$$

Poduporna konstrukcija ne mora biti vertikalne glatke poledine, niti tlo homogeno, ali se pritisci tla redovito dadu izraziti jednostavnim izrazom

$$\sigma_A = \sigma_v K_A - 2c \sqrt{K_A}$$

Pri tome pritisak tla zovemo **aktivnim tlakom** ako se radi o minimalnoj vrijednosti pritiska, tj. ako je omogućena za to potrebna deformacija. U normalno konsolidiranim tlima za razvoj aktivnog tlaka tj. aktivnog stanja potrebna je relativna horizontalna deformacija od nekoliko promila (što odgovara nekoliko milimetara pomaka za zid visine nekoliko metara). U prekonsolidiranim tlima potrebne su i znatno veće deformacije.

Koeficijent  $K_A$  zovemo **koeficijent aktivnog tlaka**. Radi li se o podupornoj konstrukciji vertikalne i glatke poledine, te homogenom zasipu horizontalne površine, dakle o **Rankine-ovom aktivnom stanju**, koeficijent aktivnog tlaka jednak je  $K_A = \operatorname{tg}^2 (\pi/4 - \phi/2)$

Radi li se o drugačijim uvjetima, kosoj i hrapavoj poledini te nagutoj površini zasipa, pritisak tla na zid u aktivnom stanju može se odrediti pretpostavljajući da je područje velikih deformacija, kao i na prethodnoj skici, omeđeno ravninom. Modelska ispitivanja pokazuju da su time učinjene greške veličine tek nekoliko postotaka.

U skiciranom jednostavnom primjeru, desno od krute zagatne stijene dolazi do horizontalnog zbijanja tla, te povećanja horizontalnih napreznja  $\sigma'_h$ , kako je skicirano zelenom crtkanom linijom. Dogodi li se dovoljno velika deformacija, može se, za dano vertikalno napreznje  $\sigma'_v$ , dosegnuti maksimalna vrijednost horizontalnih napreznja, koja odgovara Mohrovoj kružnici koja, skicirana zeleno, dodiruje anvelopu sloma. Ovo stanje napreznja zovemo **pasivnim Rankine-ovim stanjem**. Pol ove Mohrove kružnice,  $P_p$ , odgovara paru napreznja  $\sigma_v, \theta$ . Diralištima Mohrove kružnice i anvelope sloma, točkama  $D_p$  i  $T_p$  odgovaraju parovi napreznja za koje vrijedi

$$|\tau| = \tau_f = \sigma \operatorname{tg} \phi + c,$$

a odgovarajuće su ravnine paralelne pravcima  $D_p P_p$  i  $T_p P_p$ . To znači da u blizini skicirane krute zagatne stijene do velikih deformacija tj. do sloma tla dolazi u ravnina paralelnih pravcima  $D_p P_p$  i  $T_p P_p$ . Tako bi bila određena i granica područja u kome dolazi do velikih deformacija.

Pritisak tla na podupornu konstrukciju u uvjetima horizontalnog zbijanja do sloma zovemo **pasivnim otporom**, i možemo odrediti vertikalnim napreznjem i **koeficijentom pasivnog otpora**

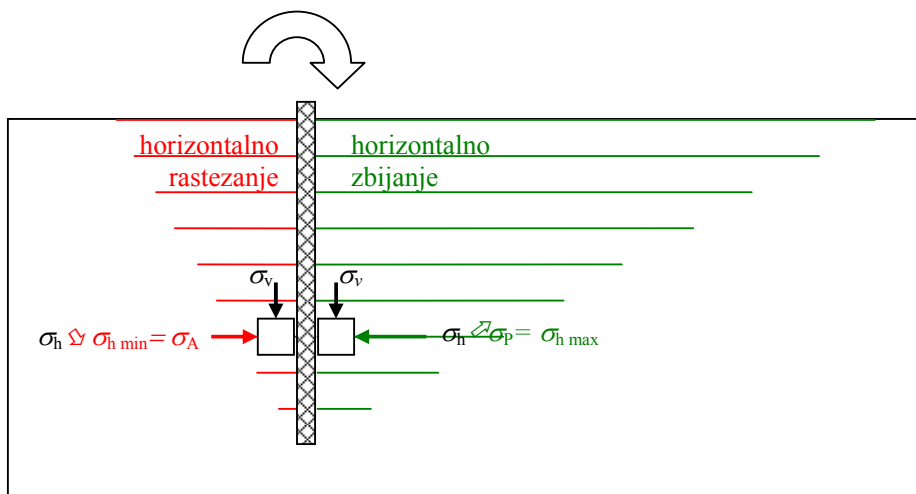
$$\sigma_p = \sigma_v K_p + 2c \sqrt{K_p}$$

Za pasivno Rankine-ovo stanje

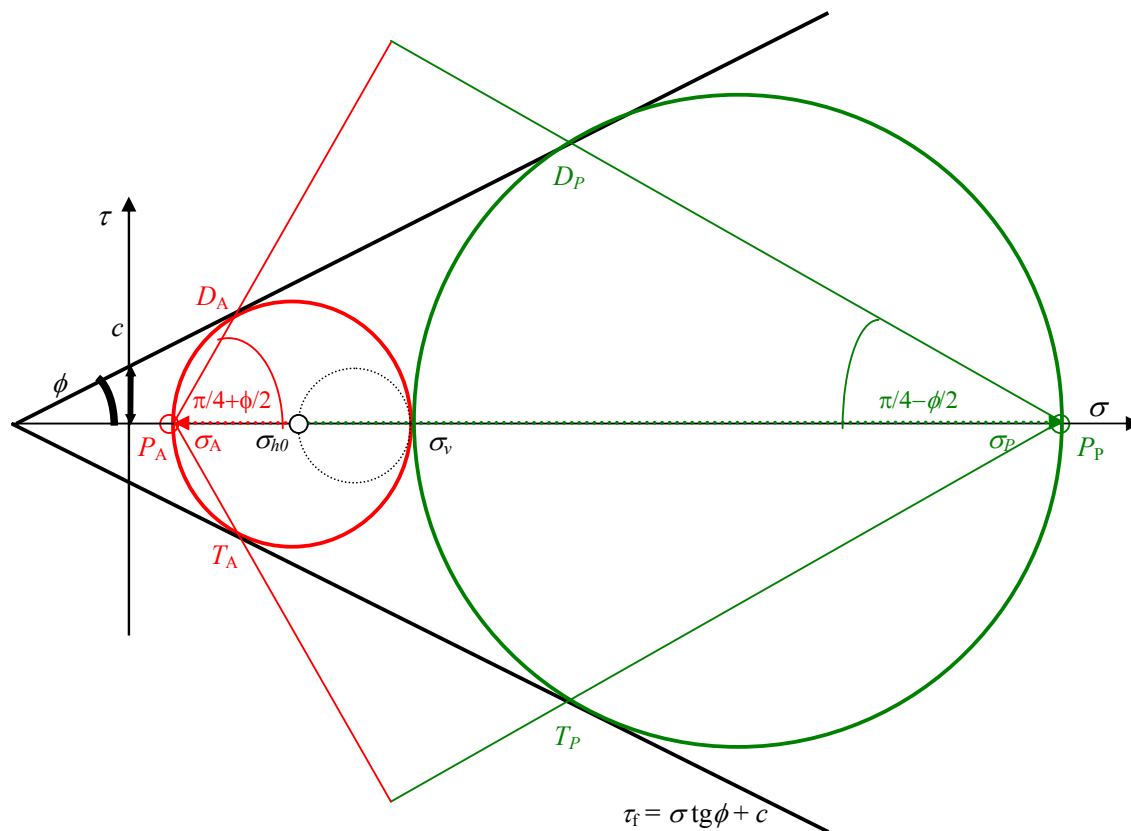
$$K_p = \operatorname{tg}^2 (\pi/4 + \phi/2)$$

Modelska ispitivanja pokazuju, međutim, da su plohe u kojima dolazi do sloma u ovim uvjetima zakrivljene, te se rijetko pretpostavlja Rankine-ovo stanje. Gotova rješenja često se zasnivaju na kliznoj plohi oblika logaritamske spirale.

U normalno konsolidiranim tlima za razvoj pasivnog otpora potrebna je relativna deformacija od nekoliko postotaka (dakle više centimetara horizontalnog pomaka zida ili vrha zida visine nekoliko metara). Za manje deformacije treba računati i sa manjim pritiscima tla. Što se tiče prekonsolidiranih tala, potrebna relativna deformacija može biti i tek nekoliko promila.



Slika 9-6. Područja velikih deformacija oko rotirane glatke vertikalne stijene ugrađene bez poremećivanja u horizontalno uslojeno tlo



Slika 9-7. Mohrov dijagram i - na dubini kojoj odgovara vertikalno naprezanje  $\sigma_v$  - Mohrove kružnice pri velikim deformacijama tj. u aktivnom stanju i u pasivnom stanju.

Aktivno stanje i pasivno stanje su **granična stanja naprezanja**. U tim stanjima dosiže se čvrstoća tj. ostvaruju velike deformacije – u svakoj točki u jednom paru ravnina, tj. u dva smjera, za odgovarajuće normalno naprezanje  $\sigma$  i posmično naprezanje  $\tau$  vrijedi  $\tau = \sigma \operatorname{tg} \phi + c$

## 9.4 Pritisak tla na podupornu konstrukciju, uvod.

Najčešći oblici podupornih konstrukcija osiguravaju da se razvoj deformacija i naprezanja u pridržanom tlu može uspješno jednostavno prikazati opisanim stanjima deformacija i naprezanja. Zato se najčešće za oblikovanje podupornih konstrukcija upotrebljavaju izrazi koji odgovaraju aktivnom tlaku i pasivnom otporu. Ipak, treba znati da su aktivni tlak i pasivni otpor granična stanja naprezanja, koje odgovaraju velikim deformacijama, te na njih vrijedi računati samo onda kad su takove deformacije moguće odnosno doista se ostvare.

Ponekad se – u literaturi ili razgovoru - isti termini koriste i u situacijama u kojima se ne ostvaruje granično stanje naprezanja, kao stvarni pritisci tla na podupornu konstrukciju. Time se povećava mogućnost zaboravljanja na razinu horizontalne deformacije neophodnu da bi se granično stanje razvilo, a pritisak tla spustio do aktivnog tlaka ili podigao do pasivnog otpora.

Moguće pojednostavljenje, preporučeno za britansku praksu, važno barem kao ilustracija važnosti veličine horizontalnih deformacija tla odnosno stvarnih pomaka poduporne konstrukcije, prikazano je slijedećim skicama. Na horizontalnoj osi dijagrama prikazana je relativna horizontalna deformacija tla, a na vertikalnoj osi je mjera horizontalnih naprezanja u tlu. Skicirani su i pritisci tla na podupornu konstrukciju.

U normalno konsolidiranom tlu, za smanjivanje horizontalnih naprezanja u tlu do minimalne vrijednosti, aktivnog tlaka, potrebne su posve male deformacije, horizontalno rastezanje od samo nekoliko promila, što odgovara posve

malenom zakretanju potpornog zida. Za porast opterećenja do pasivnog otpora potrebna je bitno veća deformacija, veličine nekoliko postotaka. Zato treba procijeniti moguće deformacije tla, odnosno pomake poduporne konstrukcije i odabrati odgovarajuće pritiske.

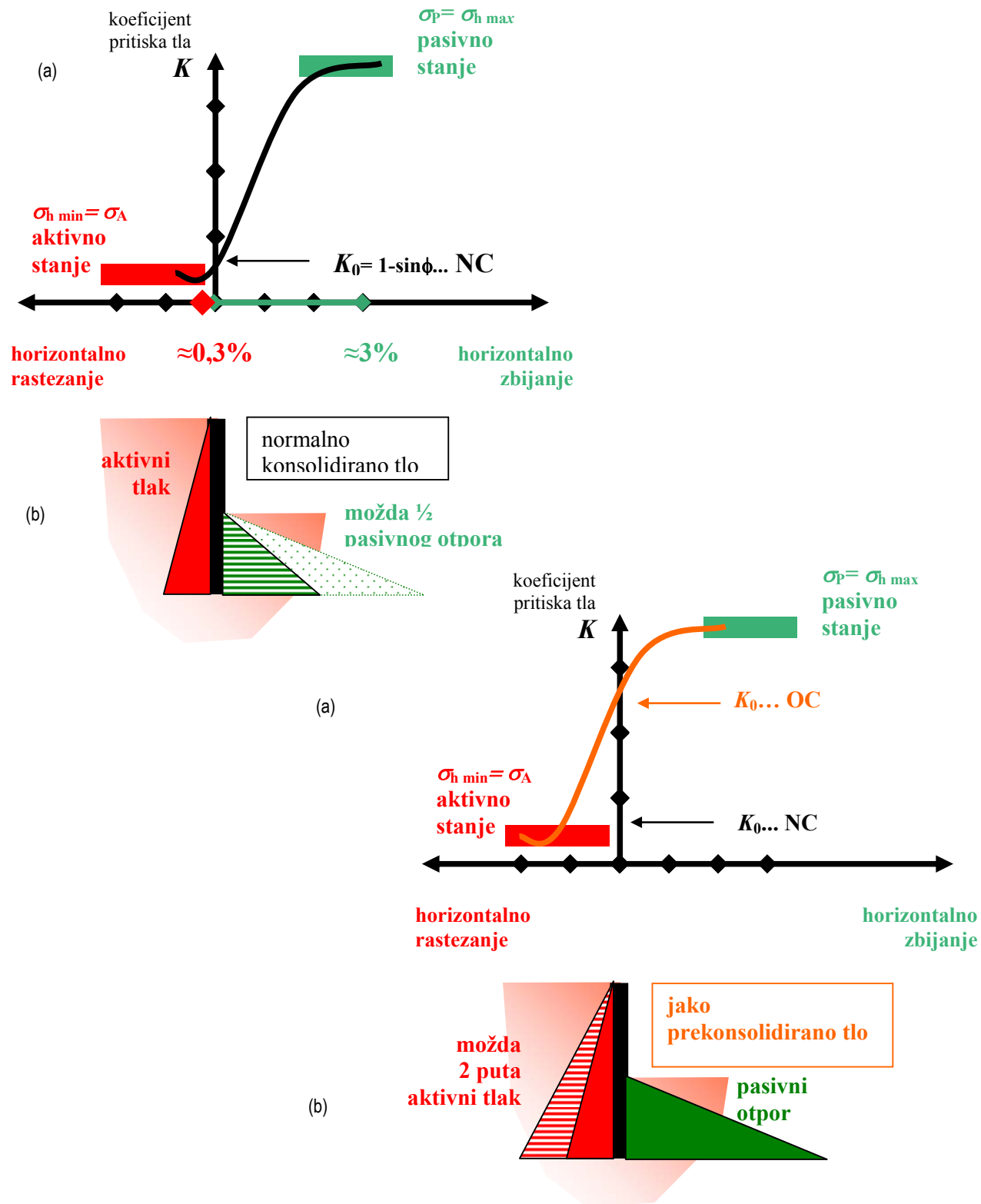
U slučaju da je pomak poduporne konstrukcije posve spriječen, ne smije se računati na smanjivanje pritiska tla i tada „aktivni tlak” nije jednak aktivnom tlaku nego možda tlaku mirovanja.

U prekonsolidiranom tlu, deformiranje tla potrebno za rasterećenje horizontalnih naprezanja može biti bitno veće, a manje je deformiranje tla potrebno za porast horizontalnih naprezanja do pasivnog otpora. Dakle, „aktivni tlak” možda je jednak dvostrukoj vrijednosti aktivnog tlaka.

Opterećenje na površini terena povećava i naprezanja u tlu. Zbijanje zasipa iza potpornog zida također povećava pritiske tla. O tome više u poglavljima o podupornim konstrukcijama.

Jasno, ne treba zaboraviti niti na djelovanje vode. Pomi tlak se uglavnom ne mijenja sa deformacijom tla, te se sve ovdje navedeno odnosi uglavnom na efektivna naprezanja. Zato se u izvedbi potpornih zidova posebna pažnja daje izvedbi drenaže. O djelovanju vode više u poglavljima o podupornim konstrukcijama.

Slika 9-8. Razvoj horizontalnih napreznja u tlu tj. pritisaka na stijenu s horizontalnom deformacijom u tlu (a) i moguća aproksimativna skica pritisaka na konzolnu stijenu (b) - za normalno konsolidirano tlo



Slika 9-9. Razvoj horizontalnih napreznja u tlu tj. pritisaka na stijenu s horizontalnom deformacijom u tlu (a) i moguća aproksimativna skica pritisaka na konzolnu stijenu (b) - za jako prekonsolidirano tlo



## 9.5 Nosivost plitkih temelja.

Slika 9-10. Područje velikih deformacija u tlu ispod temelja pri slomu.

Nosivost plitkih temelja, tj. srednja vrijednost opterećenja na dnu temelja u slučaju da dolazi do sloma tla pod temeljem, određuje se jednostavnim izrazima izvedenim od 20-tih do 60-tih godina 20-tog stoljeća.

Pretpostavlja se razvoj aktivnog tlaka pod temeljem, razvoj pasivnog otpora u okolnom području, te kontinuirani prijelaz između.

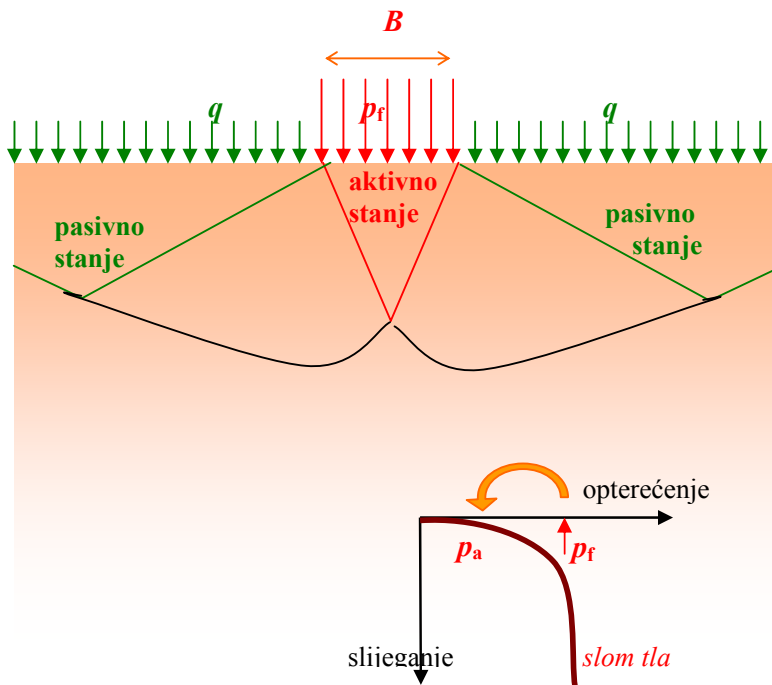
Izrazi su izvedeni originalno za jednoliko vertikalno opterećenu temeljnu traku širine  $B$ , na površini homogenog tla jedinične težine  $\gamma$ , kohezije  $c$  i kuta unutarnjeg trenja  $\phi$ , opterećenog jednolikim opterećenjem  $q$ . Srednje opterećenje na dnu temelja, u slučaju sloma, izražava se kao

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

Izborom globalnog faktora sigurnosti  $F_s$ , određujemo dopustivo opterećenje obzirom na slom:

$$p_a = p_f / F_s$$

U slučaju da je prisutna podzemna voda, pa treba računati na uzgon, umjesto sa  $\gamma$ , računat ćemo sa  $\gamma'$ . U slučaju da je temelj ukopan u tlo,  $q$  će odgovarati minimalnoj težini tla skupa sa ostalim opterećenjima uz dno temelja, ali ćemo moći računati i na čvrstoću tla iznad dna temelja. U slučaju da je temelj ograničene duljine, ili da je opterećenje nagnuto, upotrijebit ćemo izraze izvedene eksperimentalno ili teorijski kao popravne koeficijente osnovnog izraza. U slučaju da opterećenje nije jednoliko, računat ćemo samo sa dijelom dna temelja koji kao da je centrično opterećen. Detaljne upute za procjenu opterećenja sloma date su u nastavku, kako predviđaju sadašnji propisi. Pri tome predviđena je uporaba parcijalnih faktora sigurnosti, tako da neposredno dobivamo  $p_a$ .



**Dopustivo opterećenje na dnu temelja**

ono je koje je dopustivo i obzirom na slom tla i obzirom na dopustiva slijeganja.

$$p_{dop} = \min\{p_{dop} \text{ obzirom na slom}; p_{dop} \text{ obzirom na slijeganja}\}$$

**Dopustivo opterećenje na dnu temelja obzirom na slom tla pod temeljem,  $p_{dop}$  obzirom na slom računa se:**

$$p_a = Q/A' = \frac{1}{2} \gamma' B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma + (c_m + q \operatorname{tg} \phi_m) N_c s_c i_c d_c + q$$

gdje

$V$  je ukupno vertikalno opterećenje na dnu temelja  
 $H$  je ukupno horizontalno opterećenje na dnu temelja

$M_B$  je ukupni moment na dnu temelja u smjeru širine dna temelja  
 $M_L$  je ukupni moment na dnu temelja u smjeru duljine dna temelja  
 $e_B = M_B/V$  je ekscentricitet u smjeru širine dna temelja,  $B$   
 $e_L = M_L/V$  je ekscentricitet u smjeru duljine dna temelja,  $L$

$B'$  je efektivna širina dna temelja,  $B' = \min\{B - 2e_B; L - 2e_L\}$   
 $L'$  je efektivna duljina dna temelja,  $L' = \max\{B - 2e_B; L - 2e_L\}$   
 $A' = B' L'$  je efektivna površina dna temelja

$s_\gamma = 1 - 0,4 B'/L'$  je koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj oblika temelja  
 $s_c = 1 + 0,2 B'/L'$  je koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj oblika temelja

$H/(A'c_m + V \operatorname{tg} \phi_m)$  je mjera nagiba opterećenja

$i_\gamma$  je koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj nagiba opterećenja, prema  $H/(A'c_m + V \operatorname{tg} \phi_m)$ , v. sliku

$i_c$  je koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj nagiba opterećenja, prema  $H/(A'c_m + V \operatorname{tg} \phi_m)$ , v. sliku

$q$  je minimalna vrijednost jednoliko rasprostrtog opterećenja oko dna temelja

$d_c = 1 + 0,35 D/B'$  je koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj čvrstoće tla iznad dna temelja: ako je tlo jednake ili veće čvrstoće iznad dna temelja kao i u području velikih deformacija – ako je manje čvrstoće, ili je temelj ukopan samo djelomično, onda se radi sa  $d_c = 1$

$\gamma'$  je jedinična težina tla u području potencijalno obuhvaćenom velikim deformacijama – smanjena za uzgon ako ispod razine podzemne vode

$c$  je kohezija tla u istom području

$\phi$  je kut unutarnjeg trenja u istom području

$F_c$  je faktor sigurnosti za koheziju, vrijednost se uobičajeno bira između 2,0 i 3,0

$F_\phi$  je faktor sigurnosti za kut unutarnjeg trenja, vrijednost se uobičajeno bira između 1,2 i 1,8

$c_m$  je mobilizirana kohezija,  $c_m = c/F_c$

$\phi_m$  je mobilizirani kut unutarnjeg trenja,  $\operatorname{tg} \phi_m = (\operatorname{tg} \phi)/F_\phi$

$N_c$  je faktor nosivosti, funkcija od  $\phi_m$ , v. sliku

$N_\gamma$  je faktor nosivosti, funkcija od  $\phi_m$ , v. sliku

