

8 Stabilnost kosina

8.1 Pojava klizišta i potreba za provjerom stabilnosti kosina.

Kod obilnih kiša ili pri topljenju snijega, ali i u drugim prilikama, svjedoci smo pojava klizišta (*landslide*). Pukotine u cestama i pukotine u kućama na padinama često su posljedica deformiranja i pomaka u tlu u kosini. Mehanika tla omogućava razumijevanje ovakvih pojava, te se koristi pri provjeri stabilnosti kosine na kojoj će se graditi, ili koja može utjecati na neku građevinu ili događanja.

Ovdje se prikazuje samo nekoliko osnovnih postupaka ocjene stabilnosti kosine, te daje pregled razloga za nastajanje klizišta, kao i osnovnih načina sanacije i zaštite od klizišta.

Svi ovi postupci temeljeni su na nizu pretpostavki koje omogućavaju jednostavnost. Iako je primjenjivost ovih pojednostavljenja dokazana, valja imati na umu njima uvedena ograničenja.

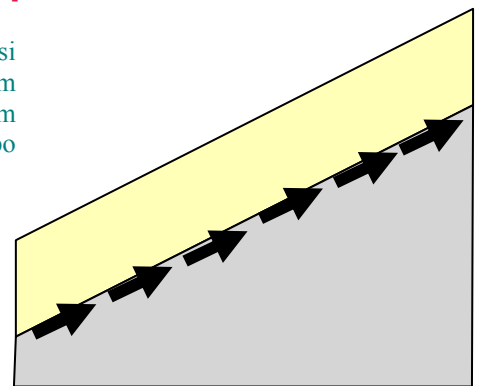
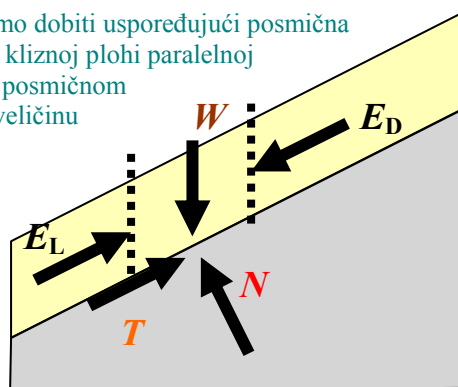
8.2 Beskonačna kosina... ravna klizna ploha paralelna kosini.

Možda najjednostavniji i najinformativniji model analize kosine odnosi se na beskonačnu kosinu. Model dobro odgovara vrlo dugim ravnim kosinama u nekoherentnom tlu ili kosinama sa površinskim slojem koherentnog tla stalne debljine. Klizanje se u tim slučajevima događa po plohi bliskoj ravnini paralelnoj površini kosine.

Mjeru stabilnosti možemo dobiti uspoređujući posmična naprezanja u potencijalnoj kliznoj plohi paralelnoj pokosu sa odgovarajućom posmičnom čvrstoćom. Kako pronaći veličinu posmičnih naprezanja?

Promatrajmo ravnotežu sila na tijelo omeđeno potencijalnom kliznom plohom. Ograničimo se samo na jedan dio tog tijela omeđen dvjema

vertikalnim ravninama. Ako je kosina beskonačno duga, situacija na svakoj vertikali jednaka je, pa su sile E_L i E_D iste veličine i smjera, i suprotnog usmjerenja, pa je jednostavno odrediti T i N , tangencijalnu i normalnu komponentu u potencijalnoj kliznoj plohi, iz W , rezultante težine lamele.



Naprezanja u potencijalnoj kliznoj plohi – posmična i normalna – dobijemo iz T i N .

Faktor sigurnosti izrazi se kao omjer posmičnog naprezanja koji se može ostvariti i onoga koji se stvarno događa u promatranoj potencijalnoj kliznoj plohi, primjenjujući Mohr-Coulombov zakon:

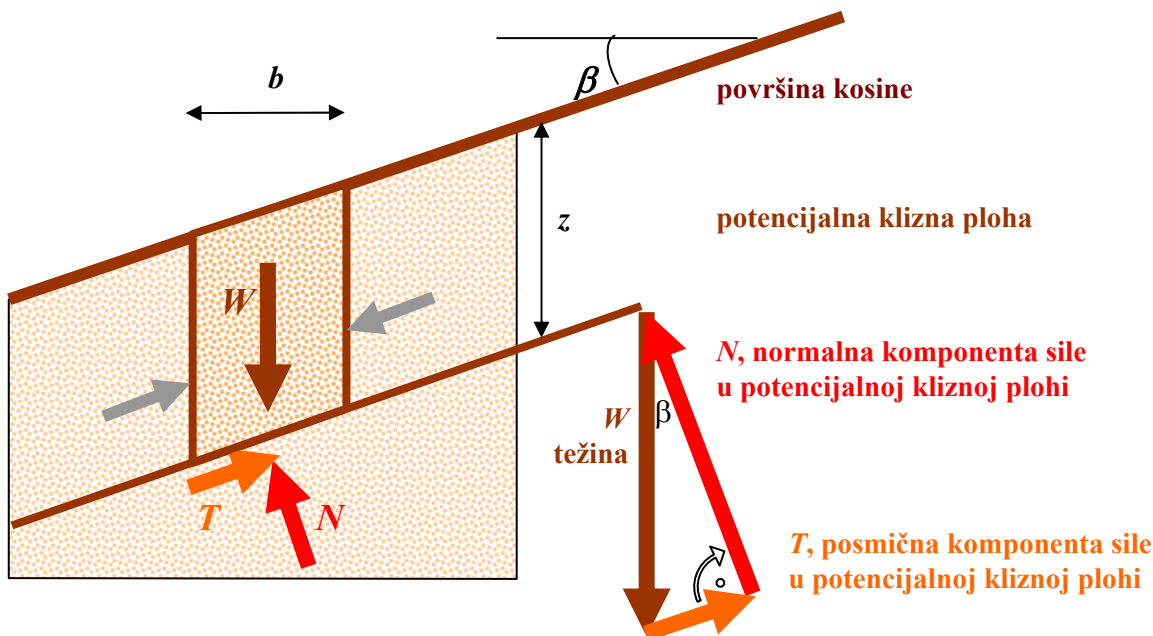
$$F_s = \tau_f / \tau = (\sigma \tan \phi + c) / \tau$$

Najvećoj opasnosti od klizanja odgovara najmanji faktor sigurnosti, dakle tražimo potencijalnu kliznu plohu kojoj odgovara najmanji faktor sigurnosti.

Prvo je prikazan slučaj bez podzemne vode i utjecaja pornog tlaka, potom potopljena kosina, a onda situacija u kojoj – uslijed naglog spuštanja razine vode – dolazi do strujanja paralelno pokosu. Ovo je samo jedan jednostavni model, ali dosta dobro upućuje na važnost pojedinih parametara i ulogu strujnog tlaka.

8.2.1 Beskonačna kosina... bez utjecaja podzemne vode.

Promatramo kosinu nagiba površine β u homogenom tlu. Potencijalna klizna ploha neka je ravnina paralelna površini kosine na dubini z . Dvema vertikalnim ravninama omeđena je lamela širine b .



Dakle, težina lamele jednaka je

$$W = \gamma b z$$

Normalna komponenta sile u potencijalnoj kliznoj plohi je

$$N = W \cos \beta = \gamma b z \cos \beta$$

Tangencijalna komponenta sile u potencijalnoj kliznoj plohi je

$$T = W \sin \beta = \gamma b z \sin \beta$$

Širina dijela klizne plohe koji odgovara promatranoj lameli jednaka je

$$b / \cos \beta$$

pa normalna i tangencijalna tj. posmična naprezanja u kliznoj plohi dobijemo kao

$$\sigma = N / (b \cos \beta) = \gamma z \cos^2 \beta$$

$$\tau = T / (b \cos \beta) = \gamma z \cos \beta \cdot \sin \beta$$

Faktorom sigurnosti uspoređuje se stvarni posmično naprezanje, τ , s graničnom vrijednosti, posmičnom čvrstoćom, τ_r , sve u promatranoj potencijalnoj kliznoj plohi. Faktor sigurnosti izrazi se kao

$$\begin{aligned} F_s &= \tau_r / \tau \\ &= (c + \sigma \operatorname{tg} \phi) / \tau \\ &= c / (\gamma z \cos \beta \sin \beta) + \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \beta / \sin \beta \end{aligned}$$

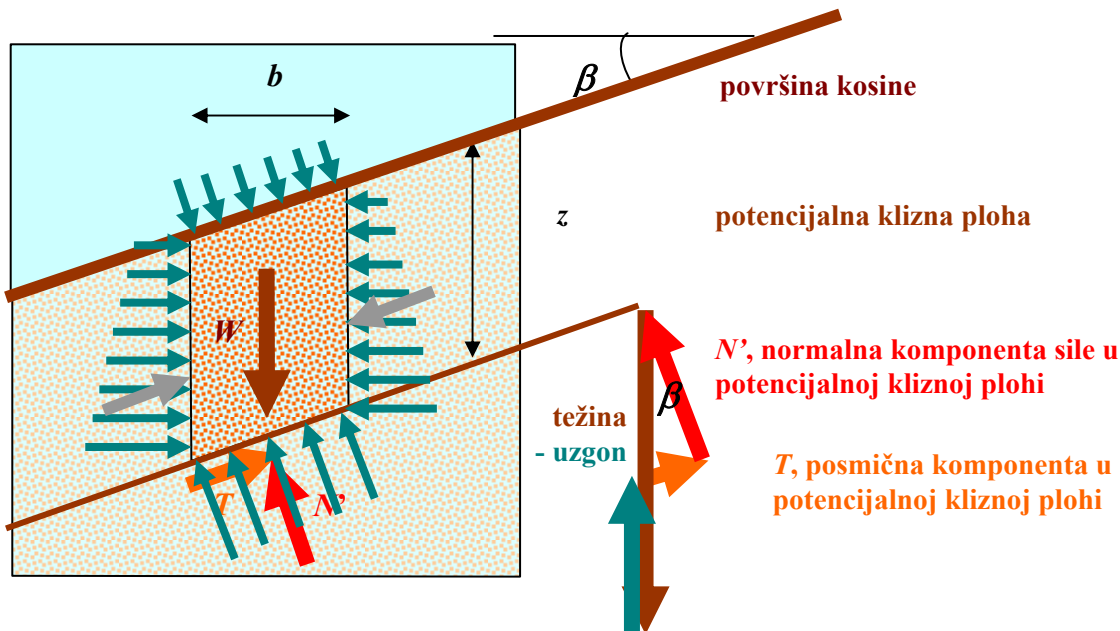
$$F_s = c / (\gamma z \cos \beta \sin \beta) + \operatorname{tg} \phi / \operatorname{tg} \beta$$

Prvi pribrojnik pokazuje utjecaj kohezije, c . Ako za neku kosinu poznajemo jediničnu težinu tla, γ , i nagib, β , promatrajmo utjecaj dubine potencijalne klizne plohe, z , na veličinu faktora sigurnosti. Kako dubina z raste, tako faktor sigurnosti postaje sve manji. To znači da će u nekom homogenom sloju najmanji faktor sigurnosti biti za najveće z , za najdublju potencijalnu kliznu plohu.

Što se tiče drugog pribrojnika i utjecaja kuta unutarnjeg trenja, vidi se da nema utjecaja dubine klizne plohe. Bavimo li se nekoherentnim tлом, sa $c = 0$, faktor sigurnosti jednak je 1 za $\phi = \beta$.

8.2.2 Beskonačna kosina... potopljena.

Promatrajmo sada situaciju u kojoj je kosina posve potopljena. Tlo je zasićeno vodom i nema nikakvog strujanja. Djelovanje vode se uobičajeno uzme u obzir na jedan od dva načina: ili kao porni tlak po granici promatranog područja (ovdje je to promatrana lamela) ili kao uzgon i strujni tlak – a strujnog tlaka u ovoj situaciji nema. Skicirani su smjer i veličina pornog tlaka, u , na lijevom dijelu skice, pri čemu u ovisi o dubini do razine vode: $u = h_p \gamma_w$.



Ako nema strujanja, djelovanje vode uglavnom se jednostavnije uzme u obzir samo kao uzgon, pa, da bismo dobili efektivna naprezanja u tlu, računamo sa uronjenom jediničnom težinom, $\gamma' = \gamma - \gamma_w$ i djelovanje i težine i vode na cijelu lamelu dobivamo kao

$$W' = (\gamma - \gamma_w) b z$$

Odavde normalna komponenta sile u promatranoj potencijalnoj kliznoj plohi na dubini z – i to efektivni dio, rezultanta efektivnih naprezanja – jednaka je

$$N' = W' \cos \beta = \gamma' b z \cos \beta$$

a tangencijalna komponenta sile u potencijalnoj kliznoj plohi jednaka je

$$T = W' \sin \beta = \gamma' b z \sin \beta$$

Odavde dobijemo efektivne normalna i posmična naprezanja u potencijalnoj kliznoj plohi

$$\sigma' = N'/b \cos \beta = \gamma' z \cos^2 \beta$$

$$\tau = T/b \cos \beta = \gamma' z \cos \beta \cdot \sin \beta$$

Posmična naprezanja usporedimo sa posmičnom čvrstoćom u istoj točki i smjeru

$$\begin{aligned} Fs &= \tau_f / \tau \\ &= (c + \sigma' \operatorname{tg} \phi) / \tau \\ &= c / (\gamma' z \cos \beta \sin \beta) + \operatorname{tg} \phi \cos \beta / \sin \beta \end{aligned}$$

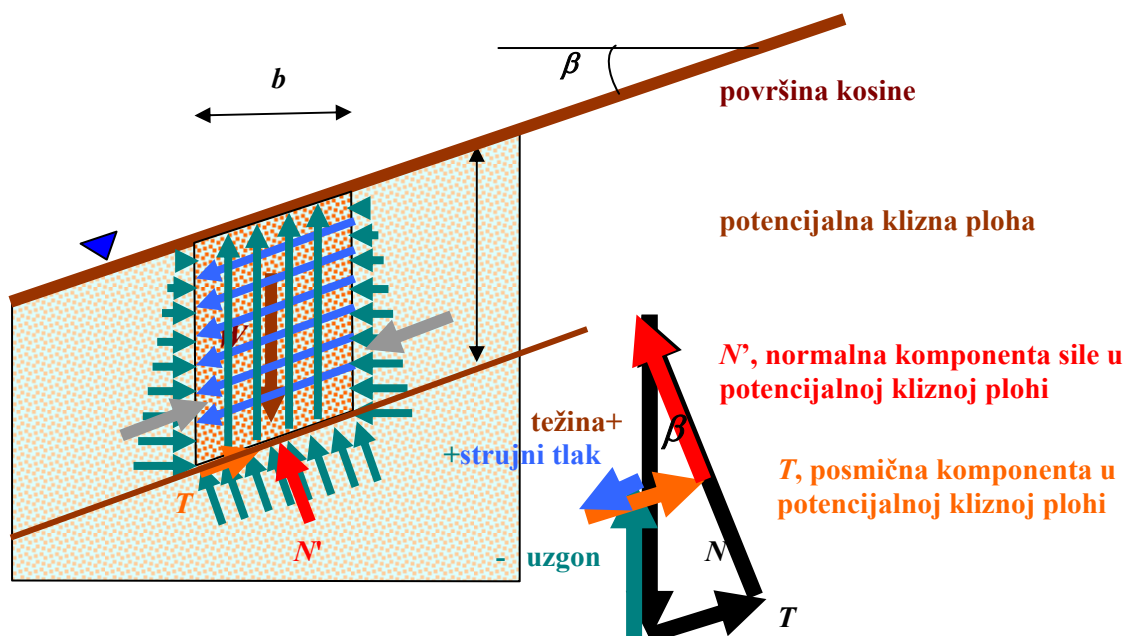
$$Fs = c / (\gamma' z \cos \beta \sin \beta) + \operatorname{tg} \phi / \operatorname{tg} \beta$$

Usporedimo li faktor sigurnosti sa prethodnom situacijom, sa posve dubokom podzemnom vodom, vidimo da u (desnom) pribrojniku koji se odnosi na utjecaj kuta unutarnjeg trenja nema razlike. Što se tiče utjecaja kohezije, vidi se da faktor sigurnosti potapanjem naraste. Ili obratno: spusti li se podzemna voda u kosini od koherentnog tla, može se očekivati i smanjenje faktora sigurnosti i smanjenje stabilnosti kosine.

Pri spuštanju razine vode uobičajeno postoji i međustanje u kojemu je tlo još zasićeno i voda se zadržava u tlu, te je razina podzemne vode otprilike na površini kosine.

8.2.3 Beskonačna kosina... sa strujanjem paralelno kosini.

Ako je kosina potopljena, a onda dođe do naglog spuštavanja razine vode, voda se zadrži u tlu sa razinom podzemne vode otprilike na površini kosine, te se u tlu javlja strujanje paralelno površini kosine. Djelovanje vode opet se može uračunati na jedan od dva načina: ili kao porni tlak po granici područja ili kao uzgon i strujni tlak po cijelom području (što računamo po volumenu područja).



Totalna težina lamele u ovoj je situaciji jednaka

$$W = (\gamma) b z$$

a uronjena težina (samo oduzimajući uzgon, ne i strujni tlak) jednaka je

$$W' = (\gamma - \gamma_w) b z$$

Efektivnu normalnu silu u potencijalnoj kliznoj plohi N' dobijemo iz poligona sila iz „malog trokuta” koji zatvaraju N' , W' i dio T neuravnotežen sa strujnim tlakom.

$$N' = W' \cos \beta = \gamma' b z \cos \beta$$

$$T = W' \sin \beta = \gamma' b z \sin \beta$$

Efektivna naprezanja u potencijalnoj kliznoj plohi su

$$\sigma' = N'/b \cos \beta = \gamma' z \cos^2 \beta$$

$$\tau = T/b \cos \beta = \gamma' z \cos \beta \cdot \sin \beta$$

pa je faktor sigurnosti jednak

$$F_s = \tau_f / \tau$$

$$= (c + \sigma' \tan \phi) / \tau$$

$$= c / (\gamma' z \cos \beta \sin \beta) + \gamma' / \gamma \tan \phi \cos \beta / \sin \beta$$

$$F_s = \frac{c}{\gamma' z \cos \beta \sin \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma \sin \beta}$$

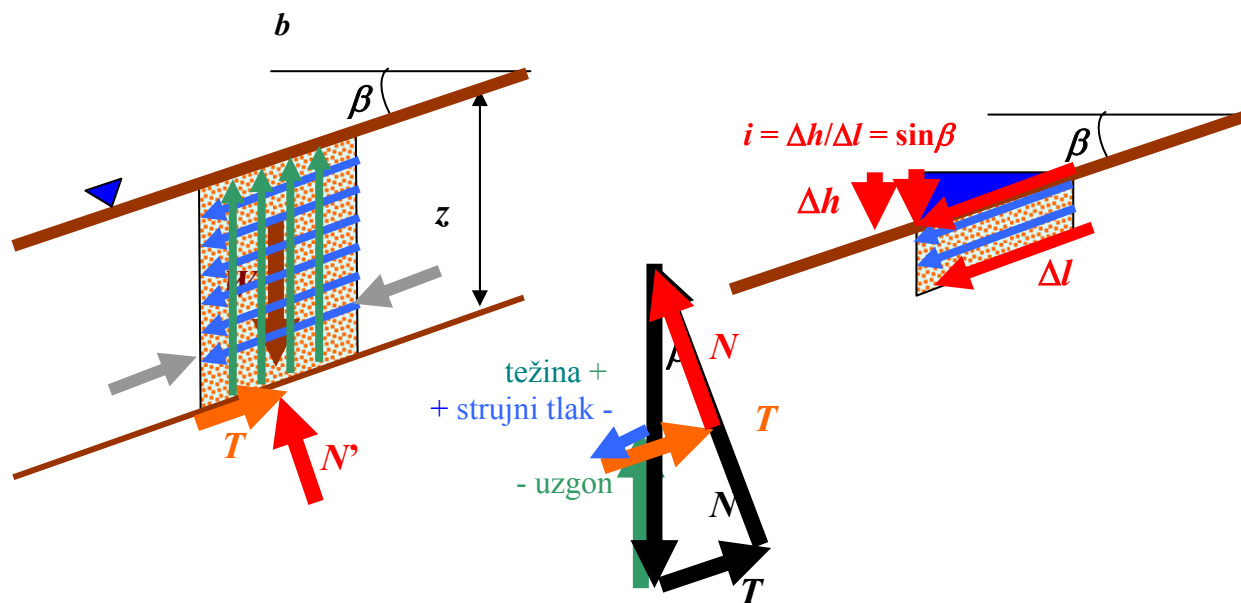
Provjerimo utjecaj naglog spuštavanja razine vode na stabilnost kosine usporedbom sa prethodnom situacijom. U prvom pribrojniku koji se odnosi na utjecaj kohezije, u nazivniku se umjesto γ' pojavi γ , te se time faktor sigurnosti smanji za oko dva puta. U drugom pribrojniku, koji se odnosi na utjecaj unutarnjeg trenja, pojavi se faktor γ'/γ koji također smanji faktor sigurnosti za oko dva puta. Pokazuje se da je od tri jednostavne promatrane situacije ova najopasnija.

Obzirom na važnost djelovanja vode, vrijedi u jednostavnom slučaju beskonačne kosine pozabaviti se računanjem djelovanja vode na dva jednostavna načina: preko pornog tlaka ili uzgona i strujnog tlaka.

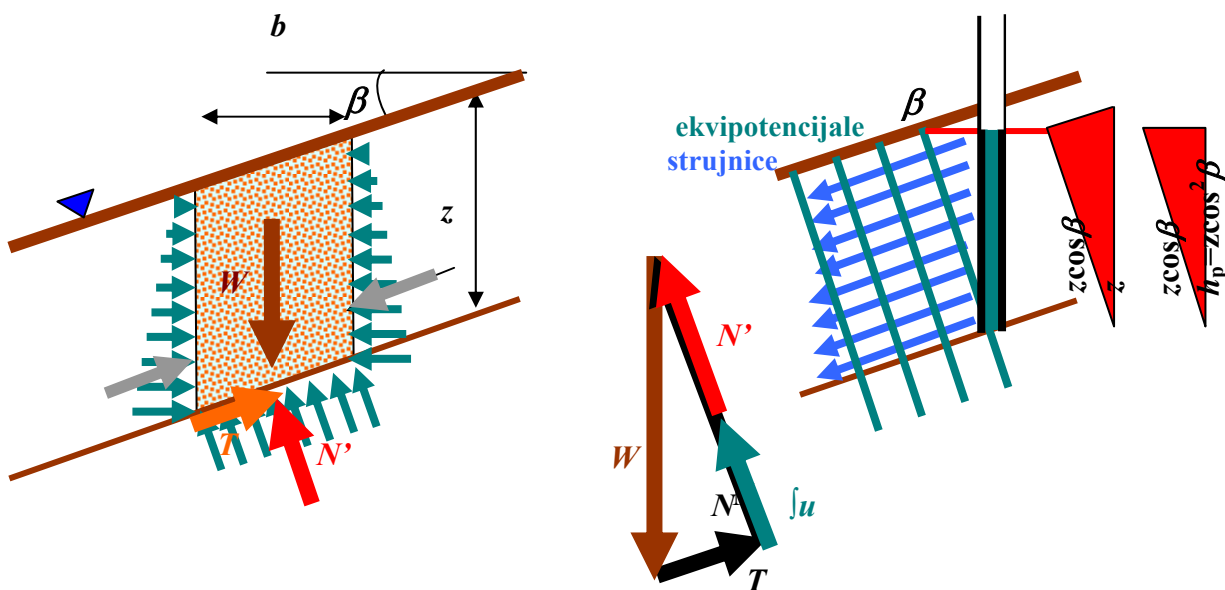
Prvo izrazimo djelovanje vode preko pornog tlaka. Ako je razina podzemne vode upravo na površini kosine, onda je i porni tlak na površini kosine upravo jednak nuli. Porni tlak raste sa dubinom, i to jednako po svakoj vertikali ako se radi o beskonačnoj kosini. Radi li se o izotropnom tlu, onda su strujnice i ekvipotencijale međusobno okomite. Površina kosine jedna je strujnica, ostale su joj paralelne, a ekvipotencijale su okomite na njih.

Spustimo li piezometar na dubinu z , odgovarajuća će ekvipotencijala biti ona okomica na površinu kosine koja prolazi dnom piezometra. Kako je skicirano sa desne strane, podizanje vode u piezometru događa se do horizontale kroz sjecište te ekvipotencijale i površine kosine. Iz trigonometrijskih odnosa u dva skicirana trokuta, dobivamo da je piezometarska visina na dubini z jednaka $h_p = z \cos^2 \beta$ čime je određen traženi porni tlak u promatranoj potencijalnoj kliznoj plohi. Rezultanta pornog tlaka dobije se integriranjem po cijelom dnu lamele, tj. množenjem sa širinom lamele, $b/\cos \alpha$.

Dakle,



rezultanta pornog tlaka = $h_p \gamma_w l = \gamma_w z \cos^2 \beta b / \cos \alpha = b z \cos \alpha$



Drugi način uračunavanja djelovanja vode je preko volumskih sila uzgona i strujnog tlaka. Nagib kosine ujedno je i nagib strujnica, pa $i = \Delta h / \Delta l = \sin \beta$ tako da rezultante uzgona i strujnog tlaka su

rezultanta uzgona = $\gamma_w V = \gamma_w b z$
 rezultanta strujnog tlaka = $i \gamma_w V = \gamma_w b z \sin \beta$

8.3 Postupci granične ravnoteže

Prikazani postupak provjere stabilnosti beskonačne kosine jedan je od onih koji se zasnivaju na usporedbi stvarnog posmičnog naprezanja u potencijalnoj kliznoj plohi i granične vrijednosti – posmičnog naprezanja koji odgovara velikim deformacijama. Do vrijednosti naprezanja, posmičnog i normalnog – u potencijalnoj kliznoj plohi – dolazimo uravnotežujući sile koje djeluju na tijelo omeđeno potencijalnom kliznom plohom. Takve postupke zovemo postupcima granične ravnoteže. Zasnivaju se na slijedećim pretpostavkama:

- ❖ Pretpostavlja se postojanje potencijalne klizne plohe.
- ❖ Kliznom plohom omeđeno tlo može se smatrati krutim tijelom, dakle dovoljno je promatrati rezultante sila na to tijelo.
- ❖ Faktor sigurnosti izrazi se kao omjer posmične čvrstoće i posmičnih naprezanja u potencijalnoj kliznoj plohi

$$F_s = \tau_f / \tau = (\sigma \operatorname{tg} \phi + c) / \tau$$
- ❖ Pretpostavlja se da je faktor sigurnosti konstantan po cijeloj potencijalnoj kliznoj plohi.

Provjera stabilnosti sastoji se od slijedećih koraka:

- ❖ definira se geometrija, opterećenja, parametri posmične čvrstoće ... za svaku situaciju
- ❖ definiraju se plohe po kojima bi možda moglo doći do klizanja – ovisno o geometriji, opterećenjima i čvrstoći → *potencijalne klizne plohe*,
- ❖ za svaku potencijalnu kliznu plohu za njome omeđeno kruto tijelo traže se sve sile i odgovarajući faktor sigurnosti,
- ❖ traži se minimalna vrijednost faktora sigurnosti, po svim potencijalnim kliznim ploham;
- ❖ ukoliko se u sustavnom prikazu izračunatih faktora sigurnosti pronađu pravilnosti koje upućuju na neke druge potencijalne klizne plohe, postupak se dopunjuje;
- ❖ postupak se ponavlja za svaku situaciju – svaku kombinaciju opterećenja, režim podzemnih voda i slično.

U svakom slučaju biraju se potencijalne – moguće – klizne plohe i za svaku se traži faktor sigurnosti – među kojima tražimo minimalnu vrijednost. Ustvari pokušavamo pronaći sustav potencijalnih kliznih ploha kojim ćemo obuhvatiti, pomoću kojeg ćemo detektirati i onu najmanju vrijednost faktora sigurnosti, odnosno kritičnu kliznu plohu. Tu, minimalnu vrijednost pripišemo cijeloj kosini – za promatranu situaciju (kombinaciju opterećenja, režima voda, parametara čvrstoće...).

U nastavku se prikazuju još dva postupka ove vrste.

Drugačiji pristup, kakav omogućava metoda konačnih elemenata, zasniva se na analizi stanja naprezanja u sustavu točaka u kosini. Također, ne treba zaboraviti na *progresivni slom*, to jest na činjenicu da u stvarnosti dolazi do razvoja pomaka tj. deformacija i naprezanja gdje je posmična čvrstoća samo granična vrijednost posmičnih naprezanja koja odgovara velikim deformacijama ili klizanju.

Vrijedi primijetiti da većina postupaka provjere stabilnosti zanemaruje trodimenzionalnost stvarnog problema, te da «treću dimenziju» valja uzeti u obzir na drugi način.

8.4 Kružna klizna ploha u homogenom tlu... grafički postupak.

U mnogim slučajevima do klizanja dolazi po ploham koje su slične kružnim, tj. cilindričnim. Obzirom na jednostavno ispunjavanje uvjeta ravnoteže, razvijen je jednostavni grafički postupak za kružne klizne plohe u homogenom tlu. Jedan jednostavni postupak razvijen je za tlo bez unutarnjeg trenja, $\phi = 0$, što odgovara klizanju u nedreniranim uvjetima, drugi za tlo bez kohezije, $c = 0$, a treći koristi ova dva kao korake u iterativnom postupku.

8.4.1 Kružna klizna ploha u tlu sa $c = \text{const.}$, $\phi = 0 \dots$ grafički postupak.

Pretpostavlja se da je $\phi = 0$ i $c = \text{const.}$ po cijelom području. Biraju se potencijalne klizne plohe. Za pojedinu potencijalnu kliznu plohu traži se rezultanta svih opterećenja, P .

Faktor sigurnosti se definira kao

$$F_s = \tau_f / \tau = (\sigma \text{tg} \phi + c) / \tau \text{ što u ovom slučaju postaje}$$

$$F_s = \tau_f / \tau = (\sigma \text{tg} 0 + c) / \tau = c / \tau \text{ dakle je}$$

$$\tau = c / F_s. \text{ Budući da } c = \text{const} \text{ da } F_s = \text{const} \text{ duž klizne plohe,}$$

onda je i

$$\tau = c / F_s = \text{const} \text{ duž klizne plohe.}$$

Rezultanta posmičnih naprezanja u kliznoj plohi, dakle,

veličine je $T_c = c / F_s = c / F_s \cdot [AB]$,

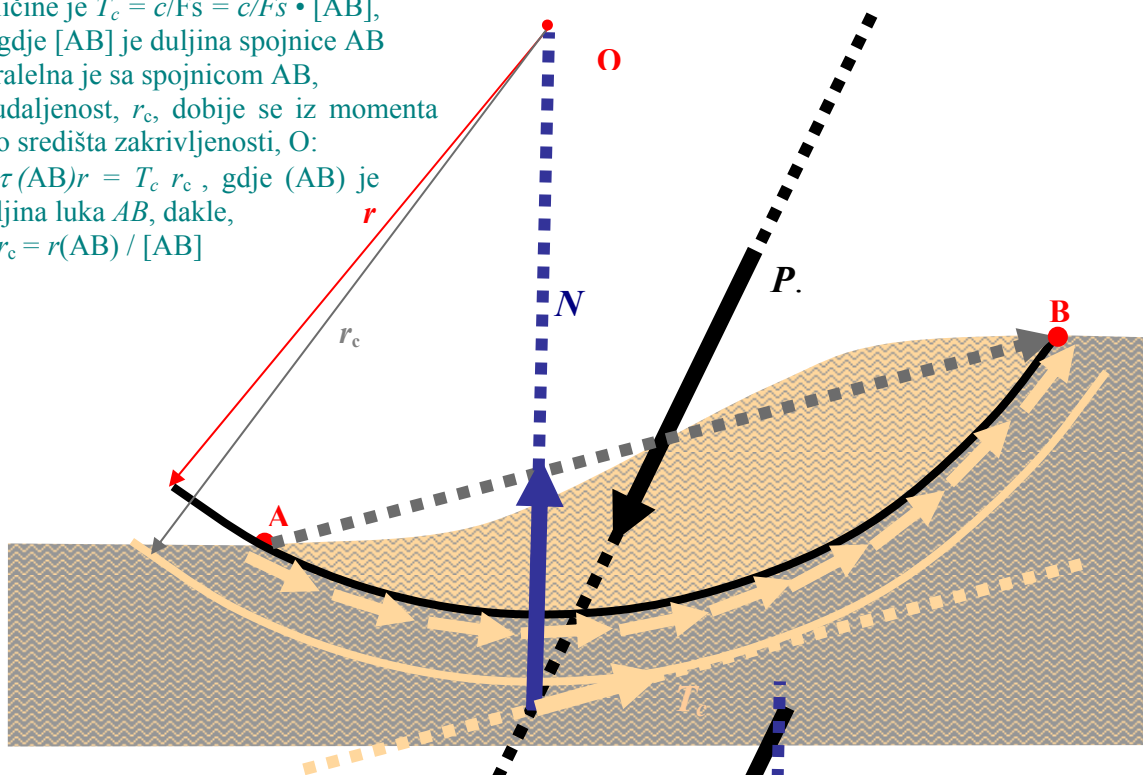
gdje $[AB]$ je duljina spojnice AB

paralelna je sa spojnicom AB,

a udaljenost, r_c , dobije se iz momenta oko središta zakrivljenosti, O:

$\tau(AB)r = T_c r_c$, gdje (AB) je duljina luka AB, dakle,

$$r_c = r(AB) / [AB]$$



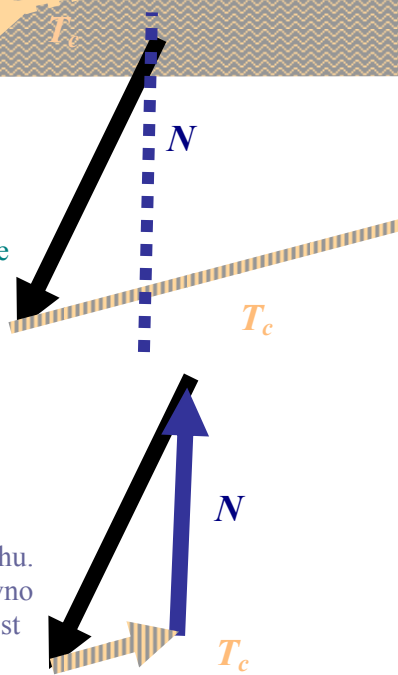
Rezultanta normalnih naprezanja u

kliznoj plohi, N , kao i normalno naprezanje u svakoj točki klizne plohe, usmjerena je kroz središte zakrivljenosti, O. Budući da uravnotežuje sile P i T_c , prolazi i njihovim sjecištem. Time je određen smjer sile N .

Iz poligona sila može se očitati veličina sile T_c , te odrediti veličinu faktora sigurnosti

$$F_s = \tau_f / \tau = T_f / T_c = c \cdot [AB] / T_c$$

Ovo je faktor sigurnosti za biranu tj. analiziranu kliznu plohu. Da bi se odredio faktor sigurnosti za kosinu, treba sustavno birati razne klizne plohe i tražiti minimalnu vrijednost faktora sigurnosti.



8.4.2 Kružna klizna ploha u homogenom tlu sa $\phi = \text{const.}$, $c = 0$... grafički postupak.

Pretpostavlja se da je $c = 0$ i $\phi = \text{const.}$ po cijelom području. Biraju se potencijalne klizne plohe. Za pojedinu potencijalnu kliznu plohu traži se rezultanta svih opterećenja, P .

Faktor sigurnosti se definira kao

$$F_s = \tau_f / \tau = (\sigma \text{tg}\phi + c) / \tau \text{ što u ovom slučaju postaje}$$

$$F_s = \tau_f / \tau = (\sigma \text{tg}\phi + 0) / \tau = \sigma \text{tg}\phi / \tau \text{ dakle je}$$

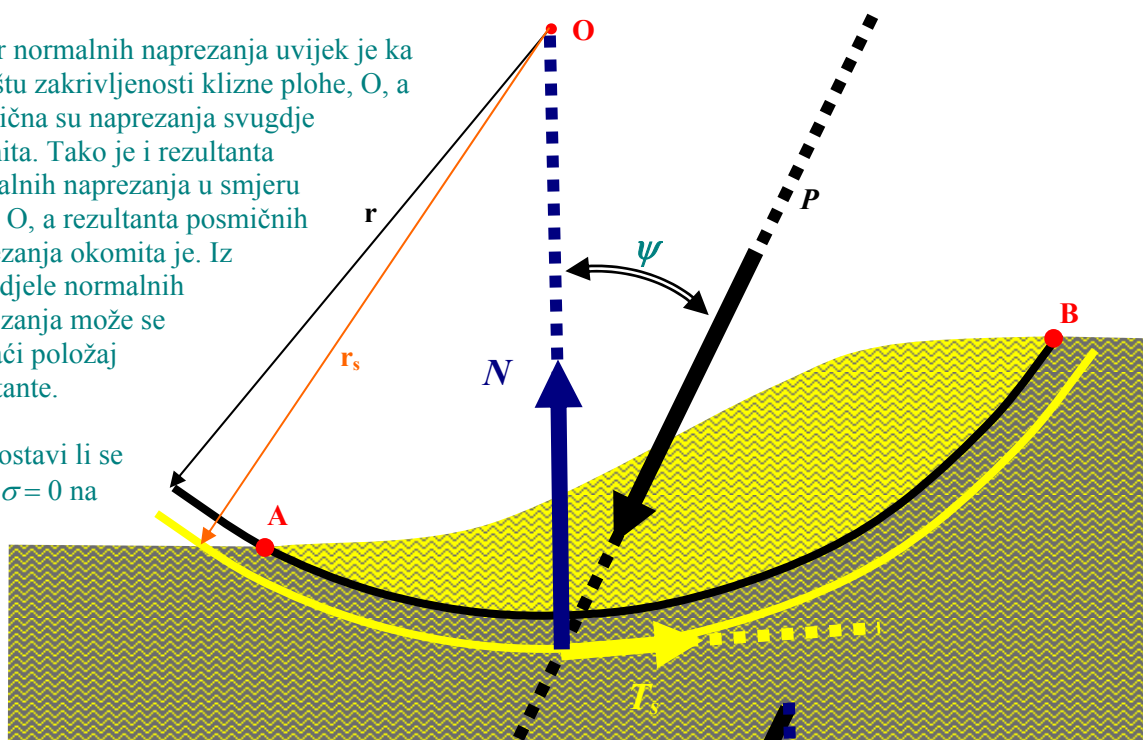
$$\tau = \sigma \text{tg}\phi / F_s. \text{ Budući da } \phi = \text{const} \text{ da } F_s = \text{const} \text{ duž klizne plohe, onda je i}$$

$$\tau / \sigma = \text{tg}\psi = \text{tg}\phi / F_s = \text{const.}$$

duž klizne plohe.

Smjer normalnih napreznja uvijek je ka središtu zakrivljenosti klizne plohe, O , a posmična su napreznja svugdje okomita. Tako je i rezultanta normalnih napreznja u smjeru točke O , a rezultanta posmičnih napreznja okomita je. Iz raspodjele normalnih napreznja može se pronaći položaj rezultante.

Pretpostavi li se da je $\sigma = 0$ na



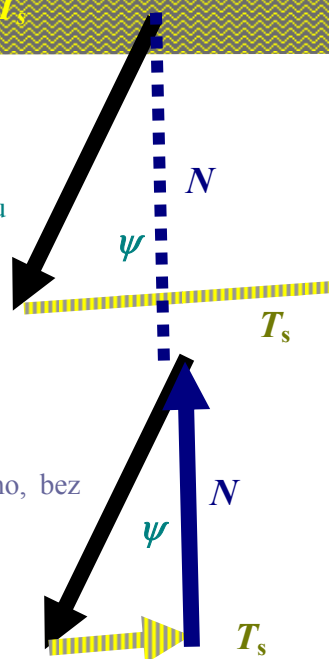
rubovima klizne plohe i sinusoidalne raspodjele između, što je prilično realno, udaljenost rezultante posmičnih napreznja jednaka je $r_s = r \cdot \kappa_s$ gdje κ_s je dat dijagramom u ovisnosti o kutu $\alpha = (AOB)$.

Na luku radijusa r_s rastavimo silu P u dvije komponente, N , u smjeru središta, i T , okomito.

Faktor sigurnosti jednak je

$$F_s = \text{tg}\phi / \text{tg}\psi$$

Vrijednost $\text{tg}\psi$ najbolje je očitati na gornjoj slici, izravno, bez prenošenja.



**8.4.3 Kružna klizna ploha u homogenom tlu sa $\phi = \text{const.}$, $c = \text{const.}$...
grafički postupak.**

Pretpostavlja se da je $c = \text{const}$ i $\phi = \text{const.}$ po cijelom području. Biraju se potencijalne klizne plohe. Za pojedinu potencijalnu kliznu plohu traži se rezultanta svih opterećenja, P .

Pretpostavlja se da su jednako mobilizirani kohezija i unutarnje trenje:

$$\tau = (\sigma \text{tg}\phi + c) / F_s = \sigma \text{tg}\phi / F_{s_s} + c / F_{s_c}$$

$$F_{s_s} = F_{s_c} = F_s$$

U prvom koraku pretpostavlja se vrijednost faktora sigurnosti za koheziju, F_{s_c} , iz čega slijedi

$$T_c = c \cdot [AB] / F_{s_c}$$

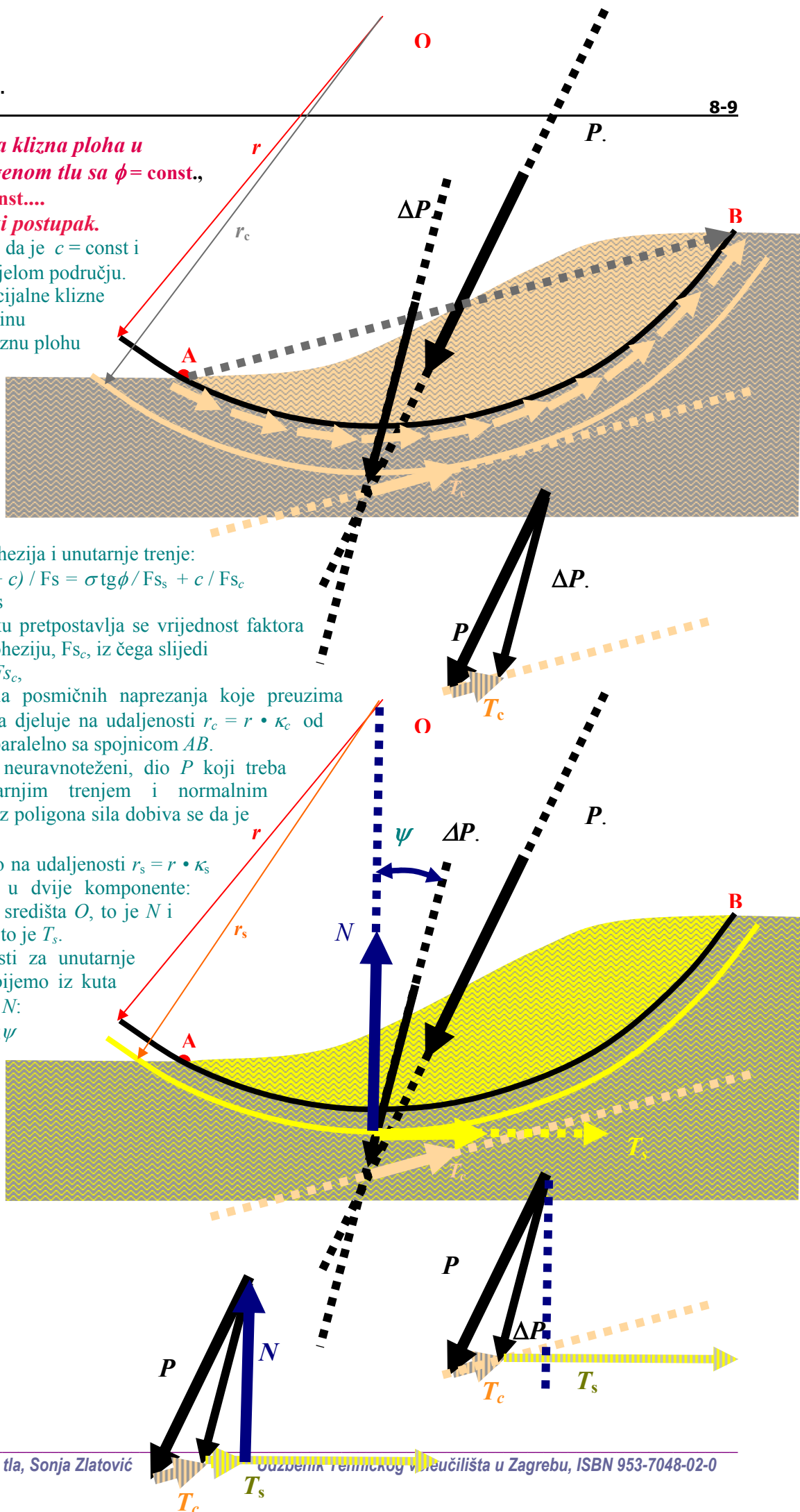
rezultanta dijela posmičnih napreznja koje preuzima kohezija, a koja djeluje na udaljenosti $r_c = r \cdot \kappa_c$ od središta O i to paralelno sa spojnicom AB .

Traži se onaj, neuravnoteženi, dio P koji treba preuzeti unutarnjim trenjem i normalnim napreznjima. Iz poligona sila dobiva se da je to ΔP .

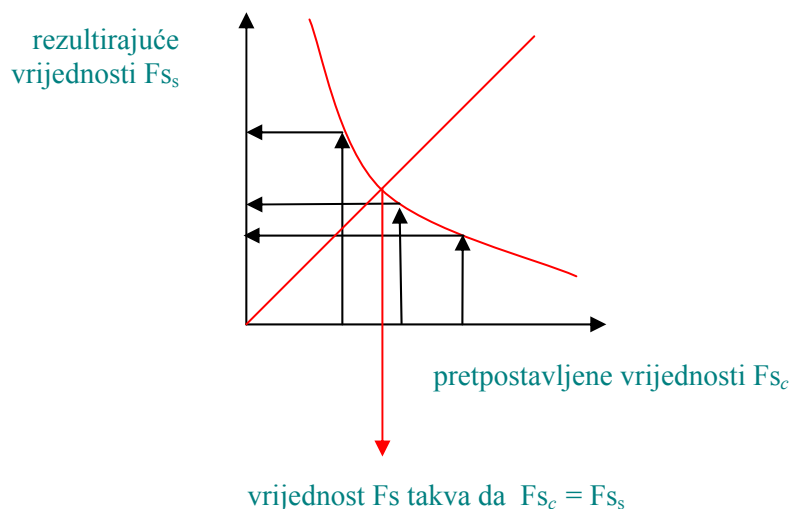
ΔP rastavljamo na udaljenosti $r_s = r \cdot \kappa_s$ od središta O u dvije komponente: jednu u smjeru središta O , to je N i jednu okomitu, to je T_s .

Faktor sigurnosti za unutarnje trenje, F_{s_s} , dobijemo iz kuta ψ između ΔP i N :

$$F_{s_s} = \text{tg}\phi / \text{tg}\psi$$



Ako su pretpostavljeni F_{s_c} i odgovarajući F_{s_s} jednaki, onda smo u prvom koraku pogodili vrijednost F_s . Nisu li jednaki, uobičajeno je napraviti još dva koraka: još dva puta pretpostaviti novu, vjerojatniju vrijednost F_{s_c} i odrediti odgovarajući F_{s_s} . Tražena vrijednost F_s bit će ona za koju $F_{s_c} = F_{s_s} = F_s$



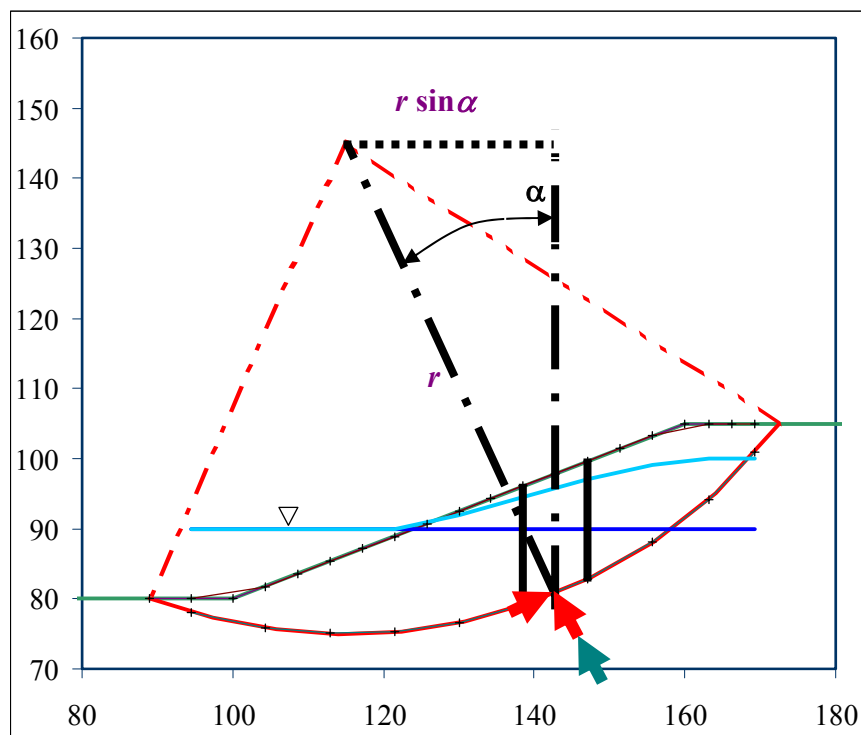
8.5 Kružna klizna ploha... pojednostavljeni Bishopov postupak.

U slučaju da tlo u kosini nije homogeno, a da se potencijalne klizne plohe mogu smatrati kružnima, uobičajeno je tijelo omeđeno kliznom plohom podijeliti vertikalnim ravninama u lamele, takve da su za svaku parametri čvrstoće konstantni po cijelom odsječku klizne plohe. Dobro je da su lamele dovoljno uske da se mogu aproksimirati pravokutnicima i da se proračun sila može za svaku lamelu raditi u njejoj osi.

Među mnogim sličnim postupcima, Bishopov postupak omogućava uračunavanje djelovanja vode na jednostavni i pregledni način. Ovdje se prikazuje pojednostavljeni Bishopov postupak koji zanemaruje vertikalnu komponentu sila između lamela i izvediv je «ručno», ali i u računalnim programima kao što je MSExcel, a ugrađen je i u geotehničke računalne programe kao što je SlopeW¹.

¹ SlopeW proizveden u Geoslope, v. <http://www.geo-slope.com/>, ima i besplatnu studentsku verziju koju je vrlo uputno isprobati jer je relativno jednostavna i instruktivna. U nastavku daju se i upute za uporabu prilagođene studentima.

Skica pokazuje kosinu (geometrija je zadana koordinatama u metrima), razinu vode izvan kosine i vodno lice, površinu podzemne vode unutar kosine. Ucertana je i jedna potencijalna klizna ploha za koju će biti prikazan proračun pojednostavljenim Bishopovim postupkom. Posebno su naglašene granice jedne lamele, os te lamele (to je vertikala na sredini između granica), te onaj radijus koji prolazi sjecištem osi i



promatrane potencijalne klizne plohe. Kut između tako određenog radijusa i osi označen je α . Sile koje djeluju na pojedinu lamelu su

- ❖ težina sa ostalim opterećenjima koja djeluje u osi,
- ❖ sile od lijeve i od desne lamele
- ❖ sile u dnu klizne plohe: rastavimo ih na tangencijalnu, T , i normalnu, N , komponentu da bismo primijenili Mohr-Coulombov zakon čvrstoće. N djeluje u smjeru središta zakrivljenosti, na pravcu spomenutog radijusa, a T okomito na taj pravac. Zanimaju li nas efektivna naprezanja, tražimo i rezultantu pornih tlakova za koju opet smatramo da djeluje u smjeru istog radijusa.

Djelovanje vode može se uračunati ili kao porni tlak po granici promatranog područja, ili kao uzgon i strujni tlak po cijelom području. U ovom je postupku uobičajeno djelovanje vode uračunati različito za dva dijela lamele. U skici je ravnina koja predstavlja razinu vode izvan kosine nastavljena i kroz kosinu.

Ispod te ravnine, koja se u ovom tekstu zove razinom mirne vode, nema u tlu strujanja, pa je djelovanje vode jednostavno uračunati kao uzgon (dakle, bez strujnog tlaka) i to tako da se umjesto jedinične težine, γ , uračunava uronjena jedinična težina, γ' .

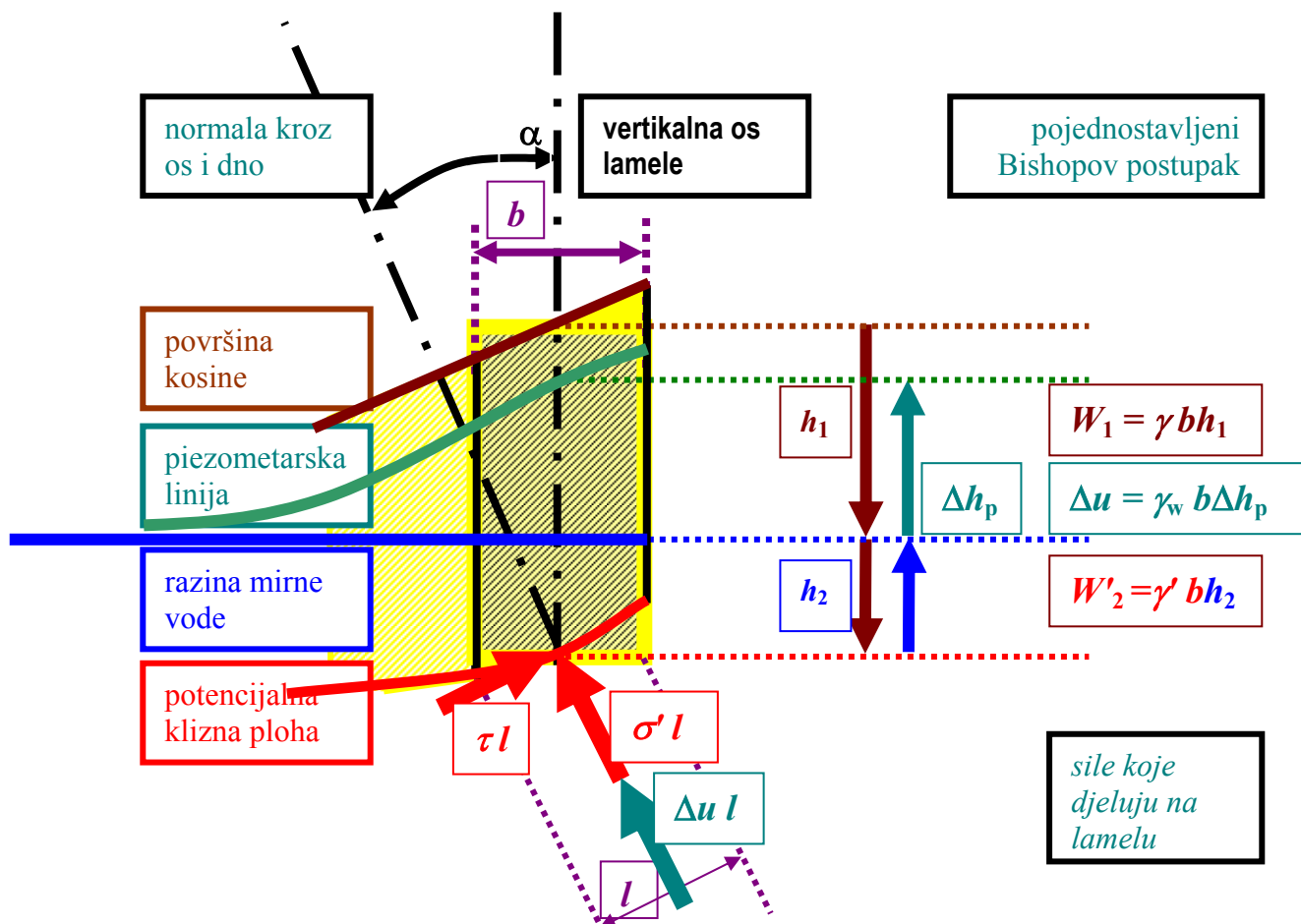
Iznad razine mirne vode treba uračunati i efekte strujanja. Budući da se smjer strujanja mijenja, mijenja se i smjer strujnog tlaka, pa tako i efektivna jedinična težina, γ'' . Zato je jednostavnije raditi sa pornim tlakom – ustvari neuračunatim dijelom pornog tlaka. Porni tlak u kliznoj plohi jednak je

$u = h_p \gamma_w$, gdje h_p , piezometarska visina, treba biti mjerena od klizne plohe, odnosno piezometarska ploha trebala bi biti određena za svaku potencijalnu kliznu plohu. Piezometarska ploha nalazi se nešto ispod površine podzemne vode, i ponekad se s njom identificira.

Budući da je dio djelovanja vode uračunat, na dio lamele ispod razine mirne vode, treba uračunati samo preostali dio pornog tlaka,

$$\Delta u = \Delta h_p \gamma_w \text{ gdje } \Delta h_p \text{ treba mjeriti od razine mirne vode, ne od klizne plohe.}$$

Pregled sila koje djeluju na pojedinu lamelu – osim sila od susjednih lamela, prikazan je na slijedećoj skici. Širina lamele označena je b , kut između osi i okomice, tj. nagib odsječka klizne plohe u osi označen je α . Širina odsječka klizne plohe jednaka je $l = b/\cos\alpha$



W_1 je dio težine koji računamo sa jediničnom težinom - i dodajemo moguća ostala opterećenja na površini kosine ili slično, to je težina lamele iznad razine mirne vode. Ako se jedinična težina, γ , razlikuje po visini lamele, treba to uzeti u obzir, a u najjednostavnijem slučaju konstantnog γ , $W_1 = \gamma b h_1$ gdje h_1 je visina lamele – mjereno u osi lamele, od razine mirne vode, do površine kosine.

W'_2 je dio težine, skupa sa udjelovanjem vode, koji računamo sa uronjenom jediničnom težinom, to je težina lamele skupa sa uzgonom ispod razine mirne vode. Ako se uronjena jedinična težina, γ' , razlikuje po visini lamele, treba to uzeti u obzir, a u najjednostavnijem slučaju konstantnog γ' , $W'_2 = \gamma' b h_2$, gdje h_2 je visina lamele – mjereno u osi lamele – od klizne plohe do razine mirne vode.

$\Delta u = \gamma_w h_p$ je neuračunati dio pornog tlaka u dnu lamele, a $\Delta u l$ je rezultanta u dnu lamele. Rezultanta normalnih efektivnih naprezanja je $N = \sigma' l$, a rezultanta posmičnih naprezanja je $T = \tau l$.

Za svaku lamelu, slijedeći Mohr-Coulombov zakon, vrijedi slijedeća jednačba:

❖ u svakoj lameli, u kliznoj plohi, $T = c'l/Fs + N' \operatorname{tg}\phi/Fs$

Za svaku lamelu iz ravnoteže vertikalnih komponenti svih sila slijedi jednačba

❖ “Σy” svih sila na svaku lamelu $\Rightarrow W_1 + W'_2 = (N' + \Delta u l) \cos\alpha + T \sin\alpha$

Iz ravnoteže momenata svih sila na sve lamele slijedi jedna jednačba:

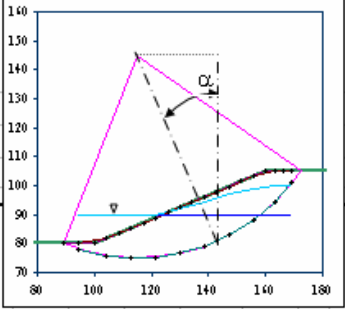
❖ “ΣM” sila na sve lamele oko središta zakrivljenosti $\Rightarrow \sum_i T_i r - \sum_i (W_1 + W'_2) r \sin\alpha = 0$

Vrijednost faktora sigurnosti ne da se izraziti izravno, nego je uobičajeno tražiti ga iterativno, uz pomoć koeficijenta m_{ai} određenih geometrijom svake lamele i pretpostavljenom vrijednosti F_s .

$$F_s = \frac{\sum_i [c_i b_i + (W_{1i} + W'_{2i} - \Delta u_i b_i) \operatorname{tg} \phi_i] / m_{ai}}{\sum_i (W_{1i} + W'_{2i}) \sin \alpha_i}$$

$$m_{ai} = \cos \alpha_i - \sin \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i / F_s$$

Uobičajeno se pretpostavi neka početna vrijednost F_s , te se izračunaju, za svaku lamelu, vrijednosti m_{ai} . Iz toga se računa vrijednost F_s , pa onda m_{ai} , sve dok ne dođe do ponavljanja. Uobičajeno su dovoljna tri koraka. U nastavku pokazuje se primjer čija je geometrija već prikazana. Primjer je izrađen u MS Excelu, ali prikazan je samo onaj dio lista koji donosi rezultate, tako da je prikazana tablica kakvu bismo koristili u «ručnom» proračunu.



$$F_s = \frac{\sum((c^*b + (Q + W_1' + W_2 - \Delta u^*b) \operatorname{tg} \phi) / m_{ai})}{\sum((W_1' + W_2) \sin \alpha)} = \frac{\sum 22''}{\sum 20''}$$

promatrana	radijus	x _c	y _c	središte	γ
klizna	(m)	(m)	(m)	zakrivljenosti	(kN/m ³)
ploha	70,0	115,0	145,0		20

	b	h ₁	h ₂	sin α	cos α	c	c [*] b	Δu	W ₁ + W ₂ - Δu [*] b	W ₁ ' + W ₂ - Δu [*] b	α	(W ₁ ' + W ₂ - Δu [*] b) tan φ	c [*] b + (W ₁ ' + W ₂ - Δu [*] b) tan φ	(W ₁ ' + W ₂) sin α	m _{ai} = cos α + sin α tan φ / F _s	(c [*] b + (W ₁ ' + W ₂ - Δu [*] b) tan φ) / F _s	m _{ai} = cos α + sin α tan φ / F _s	(c [*] b + (W ₁ ' + W ₂ - Δu [*] b) tan φ) / F _s	m _{ai} = cos α + sin α tan φ / F _s	(c [*] b + (W ₁ ' + W ₂ - Δu [*] b) tan φ) / F _s	m _{ai} = cos α + sin α tan φ / F _s	(c [*] b + (W ₁ ' + W ₂ - Δu [*] b) tan φ) / F _s
	(m)	(m)	(m)			(kPa)	(kN/m)	(kPa)	(kN/m)	(kN/m)	(°)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	1	(kN/m)	1	(kN/m)	1	(kN/m)	1	(kN/m)
1	10,98	0,00	1,93	-0,293	0,956	10	110	0,00	212	212	30	123	232	-62	0,872	267	0,859	270	0,858	271	0,858	271
2	8,57	0,00	5,96	-0,153	0,988	10	86	0,00	511	511	30	295	381	-78	0,944	403	0,938	406	0,937	406	0,937	406
3	8,57	0,00	10,32	-0,031	1,000	10	86	0,00	885	885	30	511	597	-27	0,991	602	0,989	603	0,989	603	0,989	603
4	8,57	0,00	13,63	0,092	0,996	10	86	0,00	1169	1169	30	675	760	107	1,022	744	1,026	741	1,027	741	1,027	741
5	8,57	2,50	13,37	0,214	0,977	10	86	2,00	1575	1558	30	899	985	387	1,039	948	1,048	940	1,049	939	1,049	939
6	8,57	6,07	10,91	0,337	0,942	10	86	4,50	1976	1938	30	1119	1204	665	1,039	1159	1,053	1144	1,055	1142	1,055	1142
7	8,57	9,64	7,18	0,459	0,888	10	86	7,00	2269	2209	30	1275	1361	1042	1,021	1333	1,040	1308	1,043	1305	1,043	1305
8	8,57	13,21	1,94	0,582	0,813	10	86	9,00	2432	2355	30	1359	1445	1414	0,981	1473	1,006	1436	1,009	1432	1,009	1432
9	6,22	10,85	0,00	0,687	0,726	10	62	5,85	1350	1313	30	758	821	928	0,925	887	0,954	860	0,958	857	0,958	857
10	6,22	4,13	0,00	0,776	0,630	10	62	0,00	514	514	30	297	359	399	0,855	420	0,888	405	0,892	403	0,892	403
														4726		8237		8114		8099		8098
														2,00		1,743		1,717		1,714		1,713

Prva pretpostavljena vrijednost $F_s = 2$, iz čega se računaju m_{ai} i tako dalje.

8.6 Provjera stabilnosti kosine

Provjera stabilnosti za neku kosinu sastoji se od sljedećih koraka

- analiza mogućih svojstava tla i stijene,
- analiza mogućih situacija i djelovanja, posebno obraćajući pažnju na mogućnost porasta pornog tlaka, te strujanja vode kroz tlo;
- izbor sustava ploha po kojima bi moglo doći do klizanja
 - potencijalne klizne plohe;
 - kod kružnih kliznih ploha: sustav centara i radijusa zakrivljenosti
- provjera opterećenja i djelovanja na potencijalnom kliznom plohom omeđeno tijelo, kao na kruto tijelo, te unutarnjih sila tj. naprezanja u promatranoj potencijalnoj kliznoj plohi
 - provjera faktora sigurnosti za pojedinu potencijalnu kliznu plohu
- provjera faktora sigurnosti reprezentativnog za cijelu kosinu
 - da li je provjerenim sustavom potencijalnih kliznih pronađena kritična ploha..

8.7 Situacije koje mogu izazvati poremećaj stabilnosti kosine.

Poremećaj stabilnosti kosine u pravilu može se dogoditi bilo povećavanjem posmičnih naprezanja u kosini, bilo smanjivanjem čvrstoće, što može biti uzrokovano nizom različitih promjena koje su uglavnom prikazane u sljedećih devet točaka.

- 1 povećanje nagiba kosine uslijed erozije i sl.;
- 2 povećanje opterećenja, posebno ako je nanošenje opterećenja brzo;
- 3 posebno povećanje opterećenja na vrhu kosine, rasterećenje dna kosine;
- 4 udarci ili potresi;
- 5 jake kiše... podizanje pornog tlaka i smanjivanje čvrstoće tla;
- 6 promjene u režimu podzemne vode... strujanje, posebno u smjeru kosine;
- 7 smrzavanje tla i topljenje;
- 8 trošenje... promjene čvrstoće tla;
- 9 uništenje biljnog pokrova... korijenje kosinu učvršćuje mehanički, suši je, a duboko korijenje mijenja nepovoljni smjer strujanja.

8.8 O sanaciji klizišta.

Sanacija klizišta najčešće se sastoji u otklanjanju uzroka klizanja. Prema tome osnovni postupci su

- promjena nagiba tj. oblika padine,
- dreniranje podzemne vode, čime se voda izvodi iz područja klizanja ili se skreće strujni tlak,
- poboljšanje tla, tj. povećanje posmične čvrstoće tla,
- pridržavanje podupornom konstrukcijom,
- novi postupci izvedbe armiranog tla kombinacija su posljednja dva elementa..

Klizišta predstavljaju zanimljivi dio geotehnike gdje veliku važnost ima suradnja s geologijom.

8.9 Preporučljiva literatura:

Udžbenik sa više instruktivnih prikaza dogođenih klizanja, kao i više postupaka procjene klizanja, našeg zagrebačkog profesora, međunarodno priznatog eksperta koji se bavio klizištima, bivšeg ministra. Više primjeraka nalazi se u Knjižnici u Kačićevoj ulici.

1. Nonveiller, E. 1990, *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, 823 str

Vrlo vrijedna knjiga koja prikazuje nastajanje i sanaciju klizišta, više slučajeva klizišta i sanacije klizišta. Profesor Nonveiller posebno se bavio klizištima i razvio međunarodno priznati postupak za provjeru stabilnosti plohe općeg oblika.

2. Nonveiller, E. 1987, *Kliženje i stabilizacija kosina*, Školska knjiga, Zagreb, 197-201 str.
3. Federal Emergency Management Agency, <http://www.fema.gov/hazards/landslides/>
4. ... ostala dostupna literatura