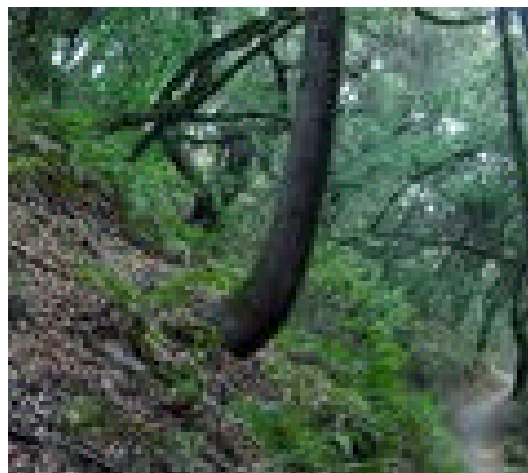


## 7. STABILNOST KOSINA

### 7.1. OPIS PROBLEMA

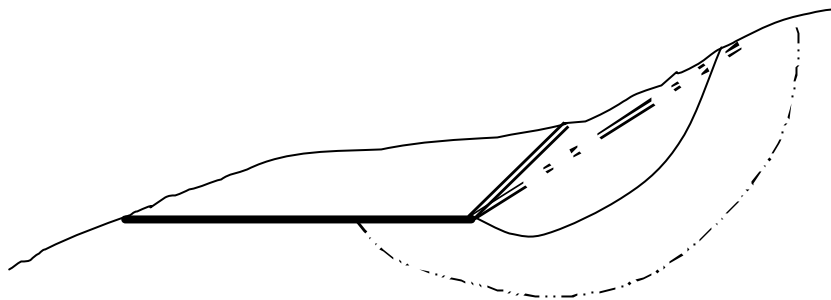
U geotekničkoj praksi često se pojavljuje problem procjene stabilnosti pokosa, prirodnog ili umjetnog. Ovaj složeni problem uključuje poznavanje grade tla, režima podzemne vode, cvrstoće tla i načina izvedbe radova. Na slici 7.1. prikazani su najčešći slučajevi koji zahtijevaju analizu stabilnosti tla pri geotekničkom zahvatu.



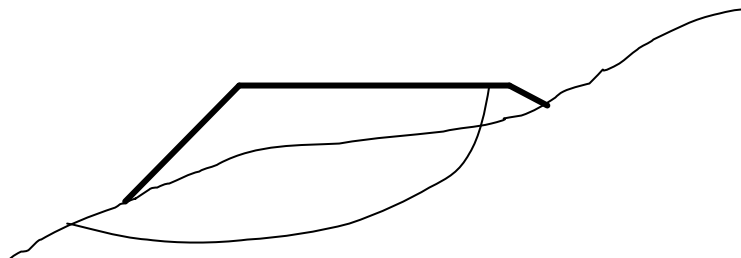
quick-clay – “BRZA GLINA”



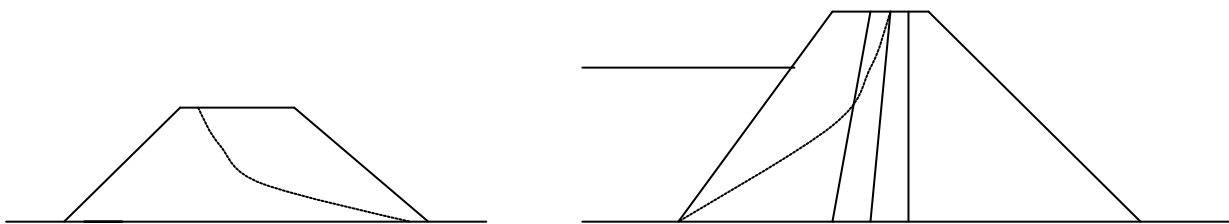
kako strmo smijemo zasjeci tlo u usjeku ceste a da ne izazovemo klizanje padine ?



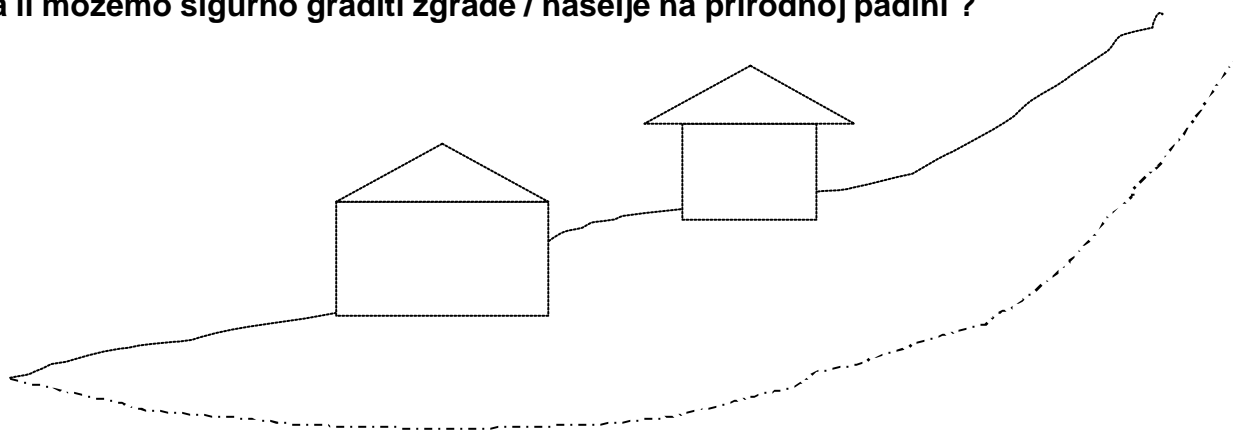
da li ce nasip ceste izazvati nestabilnost padine koju ce opteretiti?



kako dokazati stabilnost pokosa nasipa / brane za izabrani nagib i sastav tla ?



da li možemo sigurno graditi zgrade / naselje na prirodnoj padini ?



slika 7.1. Neki slucajevi geotehnickih ahvata koji zahtijevaju analizu stabilnosti pokosa

Pri provedbi analize stabilnosti pokosa potrebno je odgovoriti na slijedeca pitanja:

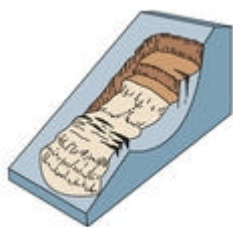
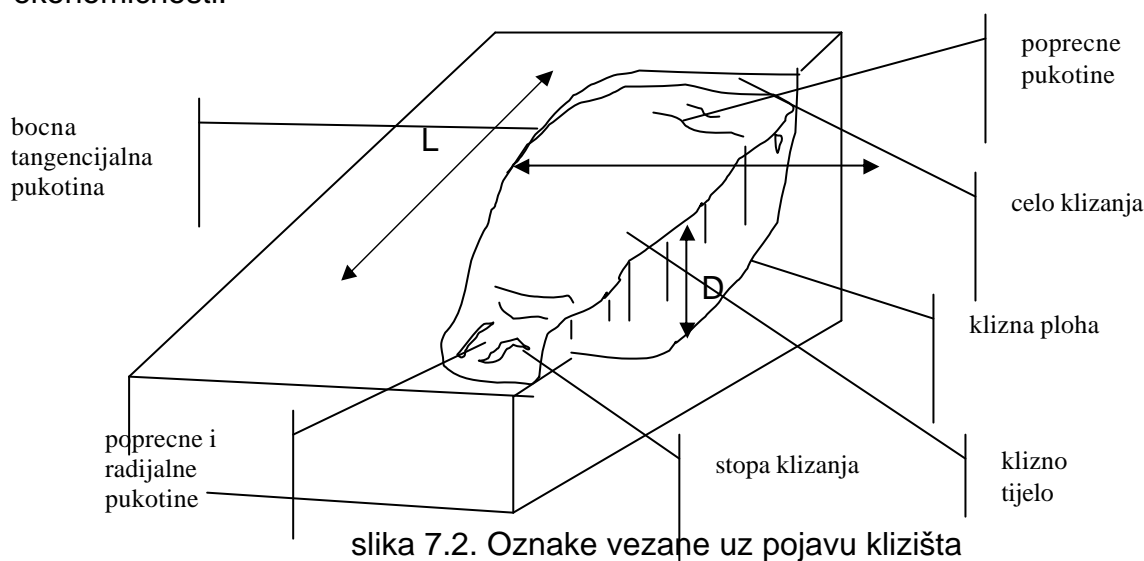
- kako modelirati analizu stabilnosti pokosa?
- kakav je utjecaj vode ?
- koji je postupak proracuna ?
- koji parametri tla su kritichni ?

U ovom poglavlju razmotrit ce se navedeni elementi analize za posebne i opce slucajeve klizanja u ovisnosti o vrsti tla, uvjetima pojave vode i pretpostavkama u modelu klizanja.

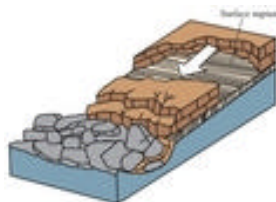
## 7.2. VRSTE KLIZANJA

Klizanje može nastati kao rezultat prirodnih promjena u ambijentu kosine (promjena režima strujanja podzemne vode, erozija, djelovanje potresa) ili kao rezultat ljudskih aktivnosti (uklanjanje raslinja i pozitivnog djelovanja korijenja, izvedba zasjeka i usjeka u cestogradnji, dodavanje opterećenja na kosinu izgradnjom objekata-nasipa ceste, zgrada, odlagališta otpada).

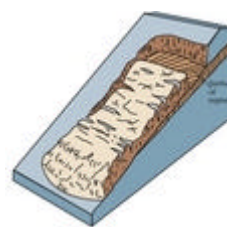
Interes geomehanike je da procijeni i analizira opasnost od klizanja, odnosno da racionalno i djelotvorno sanira nastalo klizanje. Zato je potrebno prepoznati klizanje, ustanoviti gradnju tla, procijeniti uzroke klizanja te poduzeti potrebne mjere da se sigurno izvede građevinski zahvat ili stabilizira nestabilno područje, vodeći računa o ekonomičnosti.



Rotacijsko klizanje

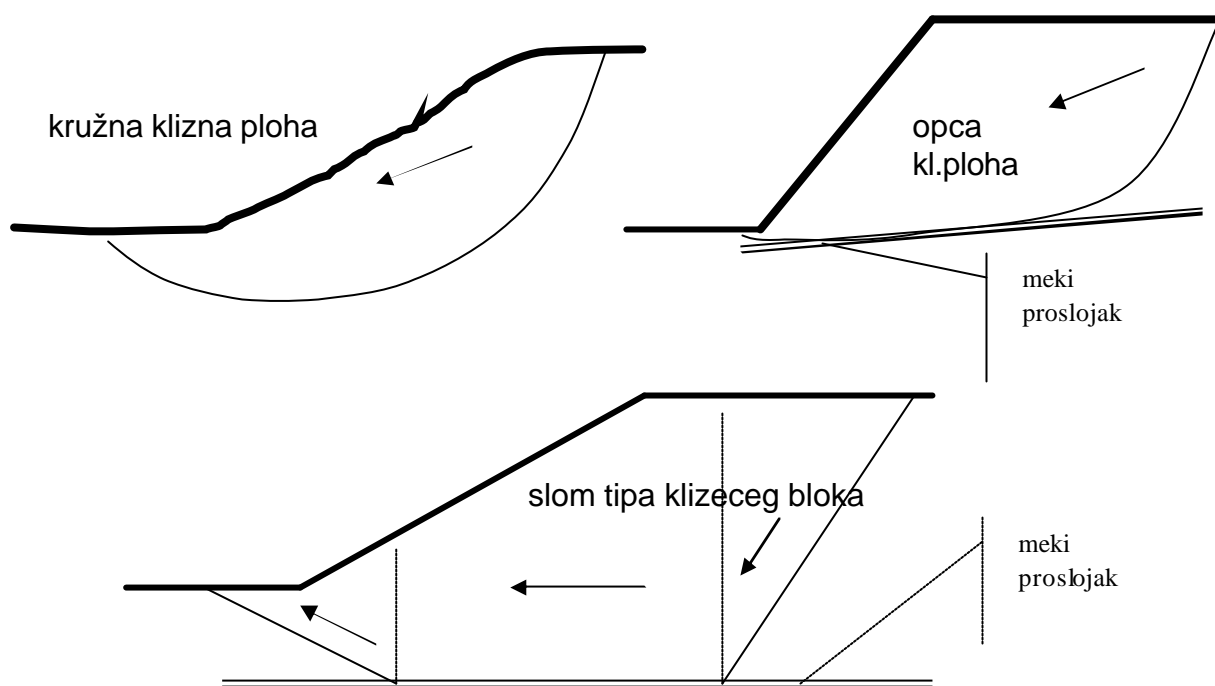


klizanje blokova



translacijsko klizanje

Kada masa tla na pokosu ne može osigurati ravnotežu djelujućih sila nastaje klizanje a zona zahvacena klizanjem zove se klizište. Na slici 7.2. definirani su važni elementi klizišta. Očito je da se radi o pomanjkanju posmične čvrstoće na kliznoj plohi da bi se zadržala ravnoteža kliznog tijela. Prema karakteru pokreta i obliku klizne plohe razlikujemo slijedeće pojave klizanja: odron (obično vertikalni odlamanje mase), rotacijsko klizanje (kružna klizna ploha), složeno klizanje, translacijsko klizanje (npr. pokreti paralelno s kosinom), tecenje, kompleksna klizanja (uzastopna rotacijska, retrogresivno klizanje).



slika 7.3. Modeli klizanja kao posljedica grade tla

Najvažniji element u analizi stabilnosti pokosa je grada i svojstva tla te režim pojave podzemne vode. Bez preciznih saznanja i tim elementima ne može s euspješno obaviti analiza stabilnsoti pokosa. Zbog toga je potrebno detaljno istražiti sastav i gradu tla terenskim i laboratorijskim istražnim radovima. Ponekad je moguće racunati uz određene pretpostavke o pojavi i režimu podzemne vode (a ponekad i potrebno), međutim svako udaljavanje od stvarnih podataka imat će za posljedicu ili nedovoljnu sigurnost protiv klizanja ili preveliku sigurnost od klizanja (skuplji zahvat).

### 7.3. OSNOVNE POSTAVKE PRORACUNA STABILNOSTI KOSINA

Klizanje se analizira uz slijedeće pretpostavke:

- klizno tijelo je kruti blok (nedeformabilno)
- na kliznoj plohi postignuta je posmicna cvrstoca tla
- faktor sigurnosti jednak je u svakoj točki klizne plohe

Pokretanje kliznog tijela izazvano je djelovanjem sile gravitacije, pornog tlaka, potresa, bilo kao pojedinacnih ili kombiniranih djelovanja.

Definira se faktor sigurnosti protiv klizanja kao:

$$F = \frac{\text{posmicna cvrstoca tla}}{\text{posmicni napon potreban za ravnotežu}} \quad (7.1.)$$

Na kliznoj plohi mobilizirano je posmicno naprezanje pod djelovanjem vanjskih sila u obliku i iznosu

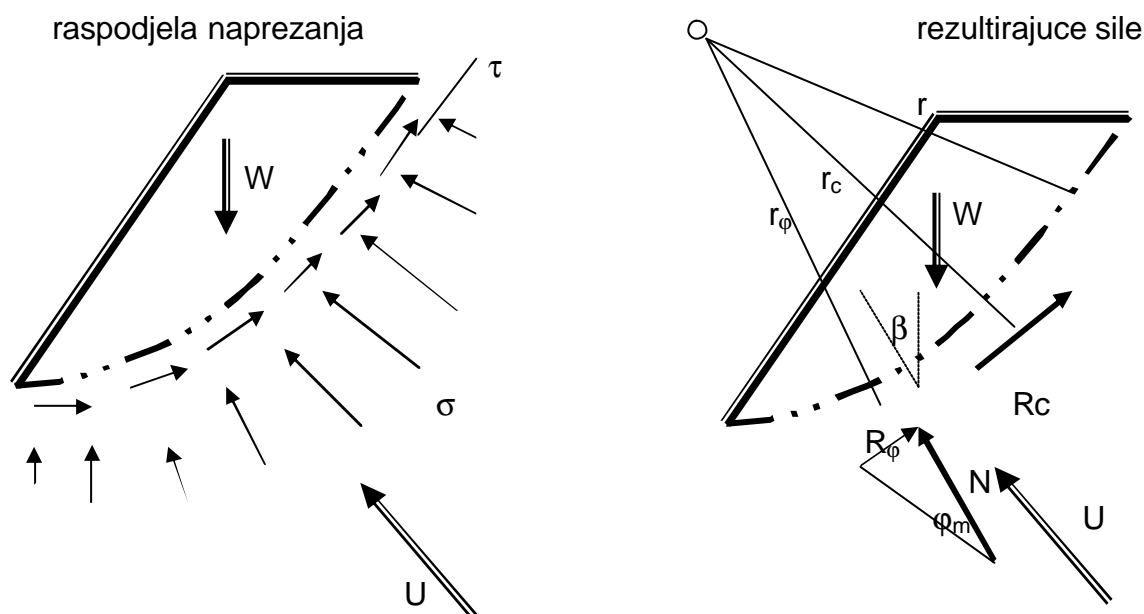
$$t_m = \frac{c'}{F} + s' \frac{\tan j'}{F} \quad (7.2.)$$

To znaci da o velicini faktora sigurnosti ( $F$ ) ovisi da li je posmicno naprezanja na kliznoj plohi manje od posmicne cvrstoce tla ( $F$  je tada veci od 1) ili je jednako posmicnoj cvrstoci pa nastaje klizanje ( $F=1$ ). Odnosno, za posmicnu cvrstocu vecu od posmicnih naprezanja na kliznoj plohi kosina je stabilna sa  $F>1$ , to jest za ravnotežu je mobiliziran dio posmicne cvrstoce tla.

Slom se dešava po kliznoj plohi na kojoj je došlo do iscrpljenja posmicne cvrstoce (djelujuce sile izazivaju posmicna naprezanja jednaka posmicnoj cvrstoci tla). Tako se od osnovnog tla kliznom plohom odvađa klizno tijelo (kruti disk) čija ravnoteža ovisi o ravnoteži sila koje na njega djeluju. Na klizno tijelo djeluju slijedece sile:

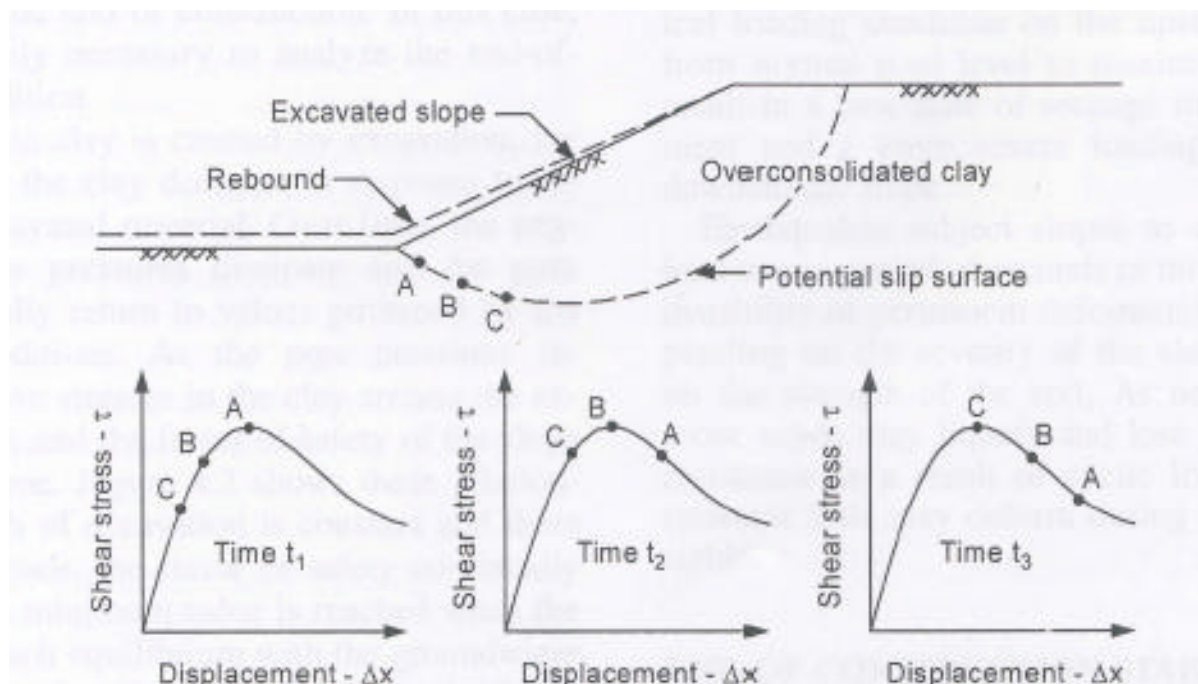
- **Aktivne sile** (težina kliznog tijela, sile od vode, potres, vanjsko opterećenje objektom) i
- **Reaktivne sile** (sile otpora) - posmicna i normalna sila na kliznoj plohi
  - Rezultanta kohezije  $R_c$ : ova sila potpuno je određena po velicini i smjeru djelovanja za poznatu koheziju  $c$  i oblik klizne plohe,
  - Rezultanta trenja  $R_\phi$ : mora biti normalna na  $N$  i  $R_\phi = N \tan \phi / F$ . Pravac djelovanja  $R_\phi$  nije poznat, a njena udaljenost  $r_\phi$  od centra rotacije je ovisna o raspodjeli vertikalnih napona na kliznoj plohi.
  - Rezultanta normalnih naprezanja na kliznoj plohi  $N$ : njena velicina i smjer djelovanja nisu poznati, premda bi  $N$  trebao biti okomit na kružnu kliznu plohu (uvode se pretpostavke o raspodjeli normalnih napona na kliznoj plohi, - najčešće sinusoidalna raspodjela)

Dakle, uz tri jednadžbe ravnoteže za klizno tijelo postoje cetiri nepoznanice :  $N$ ,  $\beta$  (kut otklona  $N$  od vertikale),  $F$  i  $r_\phi$  (vidi sliku 7.4.). Pretpostavkom o raspodjeli normalnih naprezanja na kliznoj plohi omogućuje se rješenje problema.



slika 7.4. Sile koje definiraju ravnotežu kliznog tijela

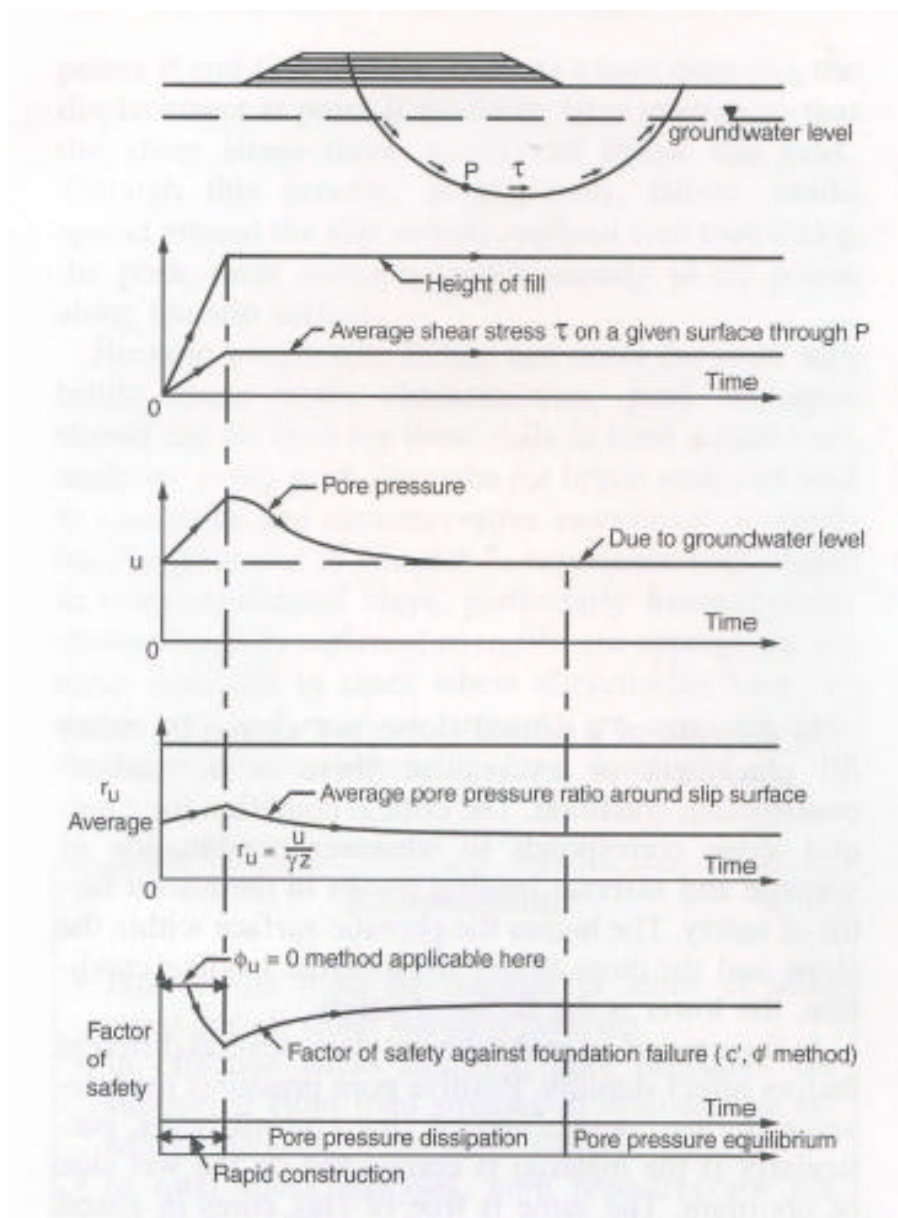
Problem ravnoteže kliznog tijela može se promatrati ili kao ravnoteža krutog diska ili kao ravnoteža niza lamela na koje se klizno tijelo podijeli, pa se promatraju sile na svaku od njih. Svaka lamela mora biti u ravnoteži.



Slika 7.4.1. Progresivna deformacija u vremenu dovodi do promjene otpornosti u tlu, te se stabilna kosina za malih deformacija pretvara u nestabilnu kosinu za pojave velikih deformacija.

Najveća posmična naprezanja u kosini su u njejoj nožici. Ako se nakon uklanjanja tla iskopom povećavaju deformacije u tom dijelu kosine, mijenjaju se naponska stanja od točke A do točke C, umanjujući cvrstocu kod prekonsolidiranih glina. To znači da će različita cvrstoca u isto vrijeme postojati na kliznoj plohi u njenim različitim dijelovima, ovisno o deformaciji koja je tu postignuta.

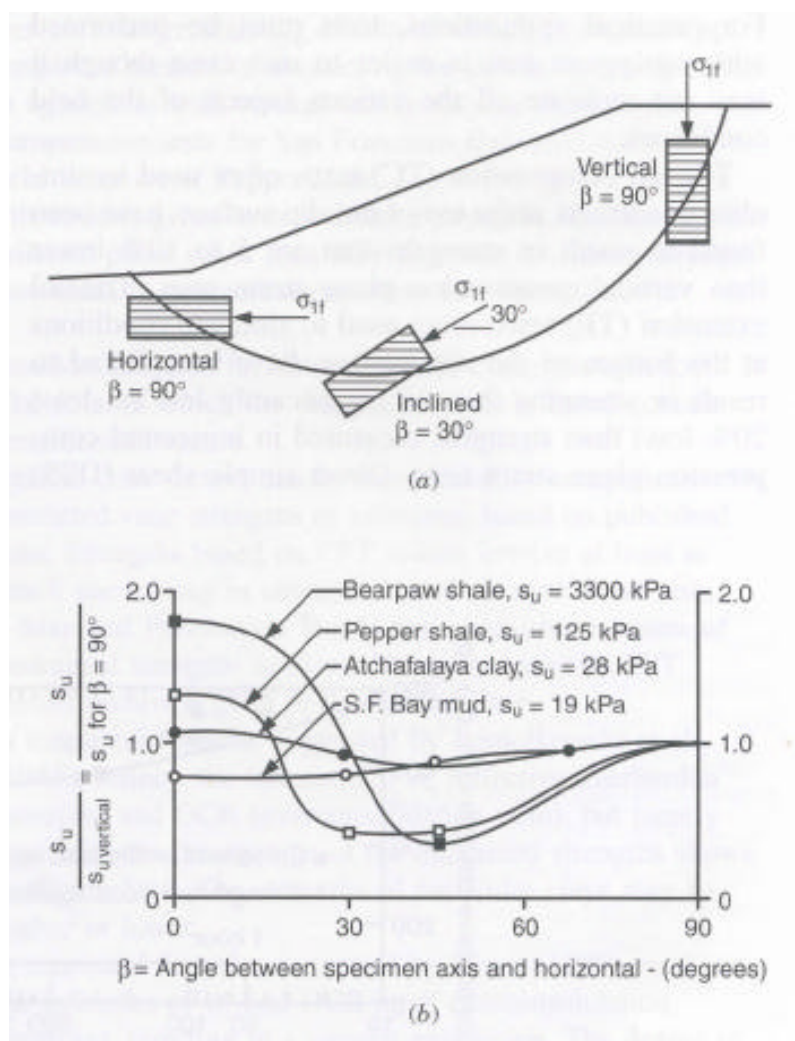




Faktor sigurnosti protiv klizanja mijenja se sa promjenom cvrstoce temeljnog tla, a ta se mijenja sa promjenom efektivnog normalnog naprezanja.

Kod brze gradnje porni tlakovi narastu u tlu jer se ne može tlo drenirati u kratkom roku, pa je zbog manje cvrstoce i  $F_s$  mali, ali se on povećava kada se uspostavi dreniranje.

Dakle, najmanja je sigurnost u trenutku izgradnje nasipa na mekom tlu, kada vrijedi nedrenirana cvrstoca tla. Poslije se tlo drenira i dobiva na cvrstoci (kod mekog tla).

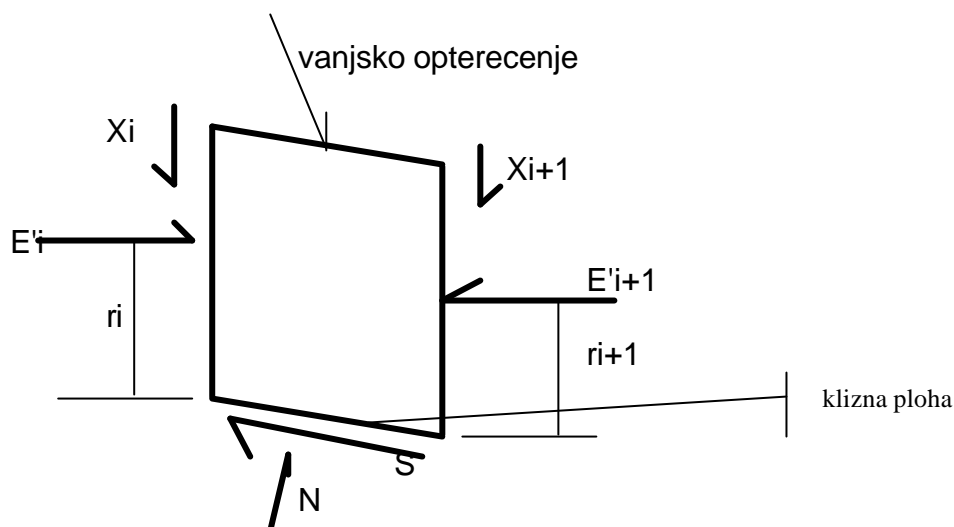


Anizotropija u tlu je normalna pojava. Anizotropija cvrstoce je tipicna za uslojena tla (škriljci, tlo sa tankim i cestim proslojcima...). ploha sloma mijenja smjer po duljini klizne plohe, pa ce i odnos plohe smicanja prema vertikalnim i horizontalnim naprezanjima biti drugacijeg nagiba. Za uslojeno tlo to znaci drasticnu promjenu otpornosti na posmik. Cak i kada tlo nije uslojeno, kada je potpuno homogeno i izotropno, u razlicitim dijelovima postoje razlicita stanja sloma : pri vrhu troosno tlacno smicanje, dole izravni ili jednostavni posmik, a u nožici troosno smicanje pod utjecajem porasta horizontalnog naprezanja – vlačno smicanje ( $q$  pada i  $p$  pada).



## 7.4. PRIKAZ METODA PRORACUNA STABILNOSTI KOSINA

Kod promatranja ravnoteže kliznog tijela preko ravnoteže lamela moraju se uzeti u obzir slijedeće sile: bocne sile među lamelama (posmicne i normalne -  $E$  i  $X$  ), vanjsko opterećenje i sile otpora tla na kliznoj plohi ( $N$  i  $S$ , slika 7.5.).



METODA	ISPUNJEN UVJET RAVNOT.				MEĐULAMELARNE SILE
	$\Sigma X$	$\Sigma Y$	$\Sigma MI$	$\Sigma Mk$	
<b>jednostavne metode</b>					
Hultin-Pettersson	-	-	x	-	ponišavaju se sile
Bishop, rutinska	-	x	x	-	samo hirizontalne sile
Janbu, jednostavna	x	x	-	-	samo horizontalne sile
Bell	x	x	x	-	ne uzima se
<b>kompleksne metode</b>					
Bishop	-	x	x	-	definira se hvatište
Nonveiller	-	x	x	-	samo vertikalno opterećenje
Lowe-Karfiaths	x	x	-	-	nagib je srednja vrijednost nagiba pokosa i kl.plohe
Corps of Engineers	x	x	-	-	nagib sila je: a) paralelan s kliznom plohom b) prosjecan nagib klizne plohe
Janbu	x	x	x	-	defnira se hvatište
Morgenstern-Price	x	x	x	x	$X/E = \lambda f(X)^a$
Spencer	x	x	x	x	konstantan nagib, $X/E = \text{const}$
GLE, General formulation	x	x	x	x	$X/E = \lambda f(X)^a$

MI = zadovoljena momentna jednadžba za svaku lamelu

Mk = zadovoljena momentna jednadžba za klizno tijelo

slika 7.5. Sile na lameli kliznog tijela te uvjeti ravnoteže koji se pojedinim metodama proracuna zadovoljavaju (prema Rapport 2:91, Skredkommisionen, Royal Swedish Academy of Eng.Sciences)

Metode proračuna svode se na postupak uravnoteženja sila koje djeluju na kruto klizno tijelo, a taj može biti grafički ili numerički. Danas se u praksi isključivo koristi numerički postupak.

Postupkom se traži KRITICNA KLIZNA PLOHA, a to je ona klizna ploha koja ima najmanji faktor sigurnosti na klizanje. Ta se unaprijed ne zna, pa se pretpostavi više kliznih ploha za koje se odrede pripadni faktori sigurnosti i na temelju njih se odredi kritična.

**Grafički postupak (kružna klizna ploha polumjera  $r$ ):** koristi se poligon sila  $W$ ,  $U$  i  $R_c$  (rezultanta posmičnih naprezanja: djeluje na udaljenosti  $r \times L_a/L$  od centra kl.plohe, paralelna sekanti –  $L_a$ =duljina luka,  $L$ =duljina sekante kr.luka, iznos  $R_c=cL$ ,  $c$ =kohezija;  $U$ =sila pornog tlaka na kl.plohu=rezultanta pojedinih sila koje djeluju na uvjetno podijeljenu kl.plohu na segmente, okomita na kl.plohu i prolazi centrom kl.plohe; iz težine  $W$  kl. tijela (totalna težina jer je efektivna jednaka totalna -tlak vode) i  $U$  naci silu  $Q$  koja je rezultantna napadna sila i koja mora biti u ravnoteži s  $R_c/F_c$  ( $F_c$  se pretpostavi) i  $N$ ; sjecište  $R_c$  i  $Q$  je mjesto djelovanja sile  $S$  (rezultanta  $N$  i  $R_\phi$ ); komponente  $N$  i  $R_\phi$  nalaze se uz pretpostavku velicine  $r_\phi$  - npr.  $r_\phi = r$ ; kut između smjera  $S$  i spojnice njenog sjecišta s kl.plohom i centrom je  $\phi_d$ ; računaj faktor sigurnosti  $F_\phi = \tan \phi / \tan \phi_d$ , ako je  $F_c = F_\phi$  onda je to  $F$ , a ako ne ponovi postupak s novim  $F_c$ , te u dijagramu  $F_\phi - F_c$  crtaj točke za parove pretpostavljenog  $F_c$  i za njega određenog  $F_\phi$ , spoji te točke krivuljom i gdje ona sijece pravac  $F_c = F_\phi$  ta vrijednost je konačni  $F$  za odabranu kliznu plohu. Iz nekoliko kliznih ploha nade se opisanim postupkom najmanji  $F$  pa je klizna ploha kojoj odgovara taj  $F$  kritična.). Pretpostavke o raspodjeli normalnih naprezanja na kliznoj plohi definiraju položaj i smjer sile  $S$  (i  $N$ ), pa su tako razvijeni razni dijagrami za  $r_\phi$ . Ovakav proračun može se provesti samo za homogenu kosinu (jedinostveni parametri cvrstoce). Stabilnost kosina od nehomogenog tla rješava se numeričkim postupkom pomoću lamela.

**Numerički postupci:** obuhvataju nehomogenosti u tlu, vrlo brzo se analiziraju slučajevi klizanja uz različite pretpostavke o položaju i obliku klizne plohe, rasporedu naprezanja, djelovanju vode.

Najčešće se koriste gotovi kompjutorski programi (proizvoljne klizne plohe, metoda konačnih elemenata), ili rjeđe tablični račun (klizno tijelo se podijeli u lamele jednake širine i za svaku od njih se analiziraju sile koje djeluju na njih te tablično provodi račun ukupne ravnoteže kliznog tijela).

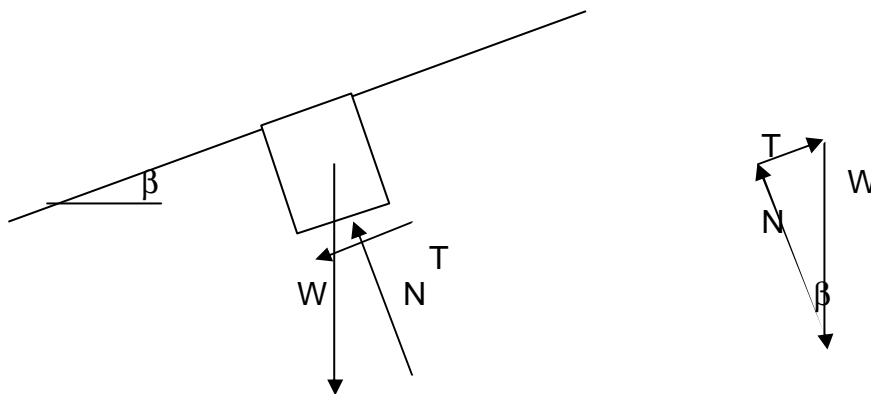
## 7.5. BESKONACNA KOSINA

Cesto se klizanje promatra kao beskonacna kosina, u kojoj se klizna ploha modelira paralelno s površinom terena i za koju se pretpostavlja da se svaki dio klizne plohe ponaša jednako, pa se analiza provodi na dijelu klizne plohe oblika paralelograma.

Sile na kliznoj plohi općenito su rezultat nagiba kosine i djelovanja vode (npr. strujanje vode) te cvrstoce tla.

Problem stabilnosti beskonacne kosine razmotrit će se za koherentno i nekoherentno tlo, te za slučaj kosine bez strujanja i sa strujanjem vode, čime će se pokazati utjecaji od interesa u geotehničkim analizama.

Beskonacna kosina kao model sloma vrijedi za uslojena tla na pokosu (uslojenost je paralelna pokosu) i za npr. pokrovne sustave odlagališta otpada.



slika 7.6. Ravnoteža segmenta na beskonacnoj kosini

Na slici 7.6. promatra se ravnoteža segmenta beskonacne kosine, pa je

sila paralelna s kosinom:  $T = W \sin \beta$

sila okomita na kosinu:  $N = W \cos \beta$

Otpor tla klizanju daje posmicna cvrstoca tla u iznosu  $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ ,  $N = \sigma A$ ,

Za **nekoherentno tlo** (npr. šljunak)  $c=0$ , pa je posmicna cvrstoca jednaka trenju a sila od nje je  $N \tan \varphi$ , te je faktor sigurnosti protiv klizanja

$$F_s = \frac{\text{raspoživ otpor}}{\text{djeljuća sila}} = \frac{W \cos \beta \tan \varphi}{W \sin \beta}$$

odnosno faktor sigurnosti protiv klizanja nekoherentnog tla u slučaju beskonacne kosine je:

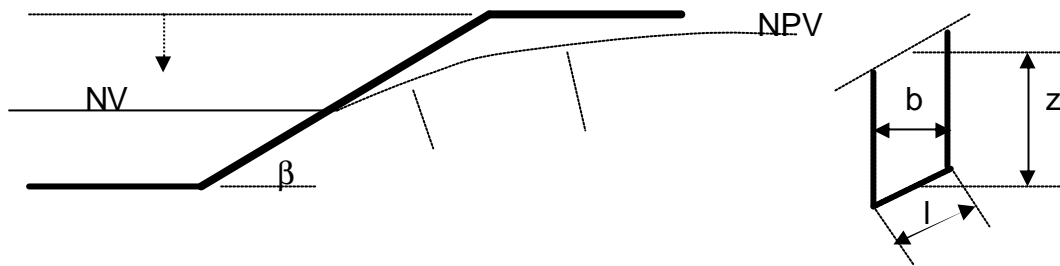
$$F_s = \frac{\tan j}{\tan b} \quad (7.3.)$$

Dakle, granicni slučaj stabilnosti je  $\beta = \varphi$ , ( $F_s=1$ ), što znači da je maksimalni pokos nekoherentnog materijala jednak kutu unutarnjeg trenja.

**Uocimo: (1) gustoca tla (masa) ne utjece na stabilnost, (2) ista je sigurnost bez obzira da li je tlo suho ili potopljeno (citava kosina pod vodom ili iznad vode), (3) nasip može biti bilo koje visine.**

Posebno se moraju razmotriti slučajevi naglo sniženja nivoa vode i strujanje vode paralelno s kosinom.

Na slici 7.7. prikazan je slučaj za sniženje nivoa vode i njeno strujanje. Propusnost tla je mala i ne omogućava brzu promjenu NPV (u tlu) nakon sniženja vode u retenciji (NV) pa zaostala voda formira porne tlakove u tlu. Konacno bi se za takvo stanje tecenja vode u tlu (prema retenciji) uspostavila strujna mreža. Do tada je tlo pod djelovanjem tlakova usljed naglog sniženja vode. Pretpostavimo da se formira klizna ploha paralelno s kosinom na dubini  $z$ , pa se ravnoteža može promatrati na lameli širine  $b$ .



slika 7.7. Stabilnost beskonacne kosine pod djelovanjem strujanja vode

U analizi sila koristit ce se princip da je konacno djelovanje na tlo od vanjskih sila i vode jednako razlici totalnih naprezanja (totalnih sila) i ukupnih pornih tlakova (sila od pornih tlakova).

Iz slike se vidi da je:

normalna sila,  $N=W\cos\beta$ ,  $l=b/\cos\beta$ , normalni totalni napon  $\sigma_n = W\cos\beta/l = W\cos\beta^2/b$

efektivni normalni napon  $s'_n = W\cos\beta^2/b - u = (\gamma z b \cos\beta^2)/b - u = \gamma z \cos\beta^2 - u$

posmicna sila,  $T= W\sin\beta$ , a posmicni napon je  $t= W\sin\beta/l= \gamma z \sin\beta \cos\beta$

Zahtijevana cvrstoca tla je:  $s'_n \tan\phi = t F$  pa je

$(\gamma z \cos\beta^2 - u) \tan\phi = \gamma z \sin\beta \cos\beta F$ , odnosno traženi faktor sigurnosti je

$$F = \left(1 - \frac{u}{\gamma z \cos^2 \beta}\right) \frac{\tan\phi}{\tan\beta} = \left(1 - \frac{r_u}{\cos^2 \beta}\right) \frac{\tan\phi}{\tan\beta} \quad (7.4.)$$

gdje je  $r_u = \frac{u}{\gamma z}$ , = koeficijent pornog tlaka, tj. odnos pornog tlaka u nekoj tocki prema težini

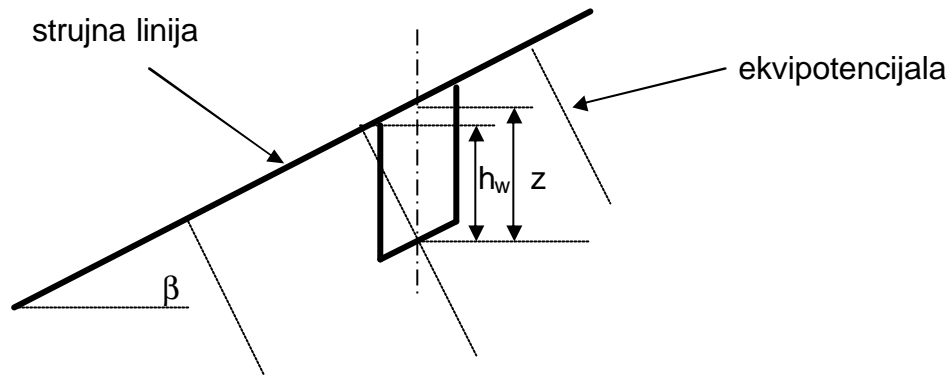
tla iznad te tocke na jedinичnoj površini (težina tla  $\gamma$  vrijedi za citavu lamelu, obično se uzima kao za vodom zasícenu citavu lamelu)

Dakle, za slućaj naglog sniženja vode potrebno je poznavati raspored pornih tlakova u tlu. Koeficijent  $r_u$  ima vrijednost 0.0-0.7. Vrijednost  $F$  je manja za slućaj naglog sniženja nivoa vode zbog zaostalih pornih tlakova nego za slućaj suhe ili potopljene kosine u nekoherentnom tlu.

### Strujanje vode paralelno s kosinom (potopljena kosina)

Promotrit ce se slućaj pojednostavljenog strujanja vode paralelno s kosinom. Strujanje izaziva strujne sile koje djeluju na jedinicu volumena tla i izazivaju smanjenje stabilnosti. Strujanje je paralelno s kosinom pa su strujnice paralelne kosini a ekvipotencijale okomite na njih. Porni tlak u sredini lamele jednak je vertikalnoj udaljenosti sredine lamele i tocke u kojoj njena ekvipotencijala sijeće kosinu (vidi sliku 7.8.).

Uz pomoc izraza za  $r_u$  može se definirati i iskazati faktor sigurnosti  $F$  za opći slućaj kosine kod naglog sniženja vode (7.4.) za slućaj potopljene kosine sa strujanjem paralelno s njom.



slika 7.8. Utjecaj strujanja paralelno s kosinom na stabilnost beskonacnog pokosa u nekoherentnom tlu

prema oznakama na slici i prema definiciji  $r_u$  slijedi  $r_u = \frac{u}{g'z} = \frac{g_w z \cos^2 b}{g'z} = \frac{g_w}{g'} \cos^2 b$ , pa jednačba za F preko  $r_u$  izvedena za strujanje vode daje

$$F = \left(1 - \frac{g_w}{g'}\right) \frac{tgj}{tg b} = \left(\frac{g - g_w}{g'}\right) \frac{tgj}{tg b} = \frac{g'}{g} \frac{tgj}{tg b} \quad (7.5.)$$

što pokazuje da se faktor sigurnosti za slučaj paralelnog strujanja smanjuje za oko polovinu u odnosu na slučaj kada je kosina od nekoherentnog materijala suha ili sasvim potpoljena (nema strujanja) (ovo smanjenje je ovisno o odnosu uronjene i totalne težine tla; za uobicajena nekoherentna tla  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , pa je  $\gamma' = (20 - 10) \text{ kN/m}^3 = 10 \text{ kN/m}^3$ , što daje smanjenje F od  $\gamma/\gamma' = 2$  puta, tj. F je za oko dva puta manji za slučaj strujanja u odnosu na slučaj bez strujanja).

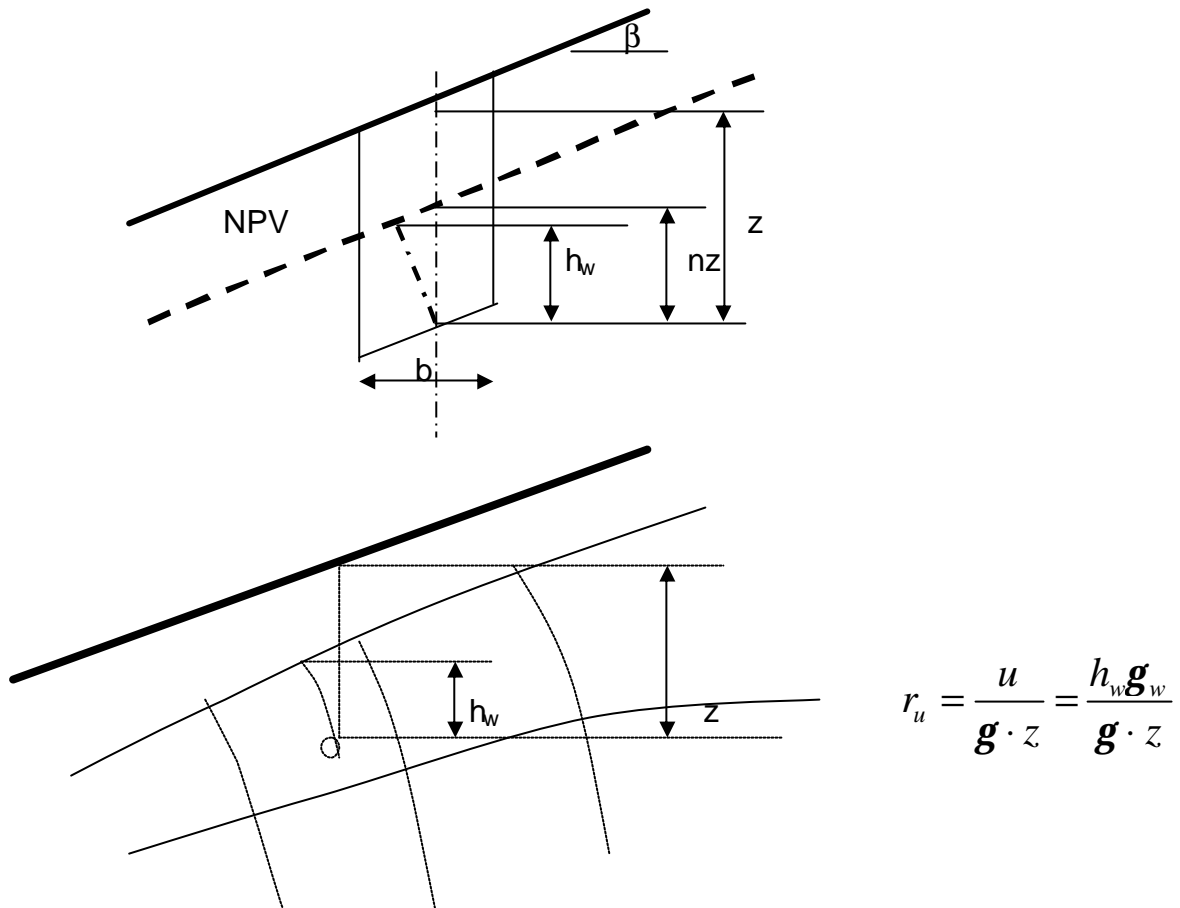
Za **koherentna tla** koja imaju i koheziju i kut unutarnjeg trenja može se pokazati jednačbama ravnoteže da je faktor sigurnosti za potopljenu kosinu sa strujanjem sličan (7.5.) uz dodatak od kohezije, pa je

$$F = \frac{c'}{g'z \sin b \cos b} + \frac{g - ng_w}{g'} \times \frac{tgj'}{tg b} \quad (7.6.)$$

gdje je  $n$  broj koji označava odnos između dubine klizne plohe ispod NPV i dubine kl.plohe ispod površine kosine, tj. potopljenost kosine (vidi sliku 7.9.).

Za slučaj kada tlo nema koheziju faktor sigurnosti F se svodi na isti izraz kao i za nekoherentno tlo.

Porni tlakovi na lamele kliznog tijela računaju se iz slike strujanja (vidi sliku 7.9.) prema uobicajenom postupku te se na osnovu tih vrijednosti može izračunati koeficijent pornog tlaka  $r_u$ .

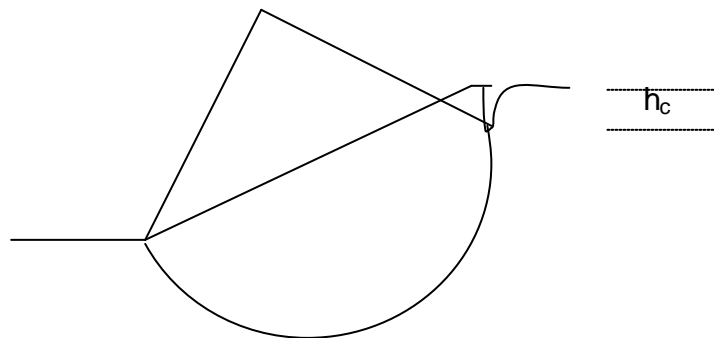


slika 7.9. Definicije parametara za potopljenu kosinu

Cvrstoca koherentnog tla ukljucuje i koheziju i kut trenja. Plohe sloma u homogenim tlima su kruznog oblika. Moguce je nastajanje vlacne pukotine ( $h_c$ ) koja smanjuje duljinu luka na kojoj djeluje kohezija, pa je i sila otpornosti tla po plohi sloma manja.

Visina vlacne pukotine je  $h_c = \frac{2c}{g}$ , za tlo samo s kohezijom (npr. nedrenirano stanje), i

$h_c = \frac{2c}{g} \tan(45 + \frac{j}{2})$ , za tlo s kohezijom i kutem trenja.



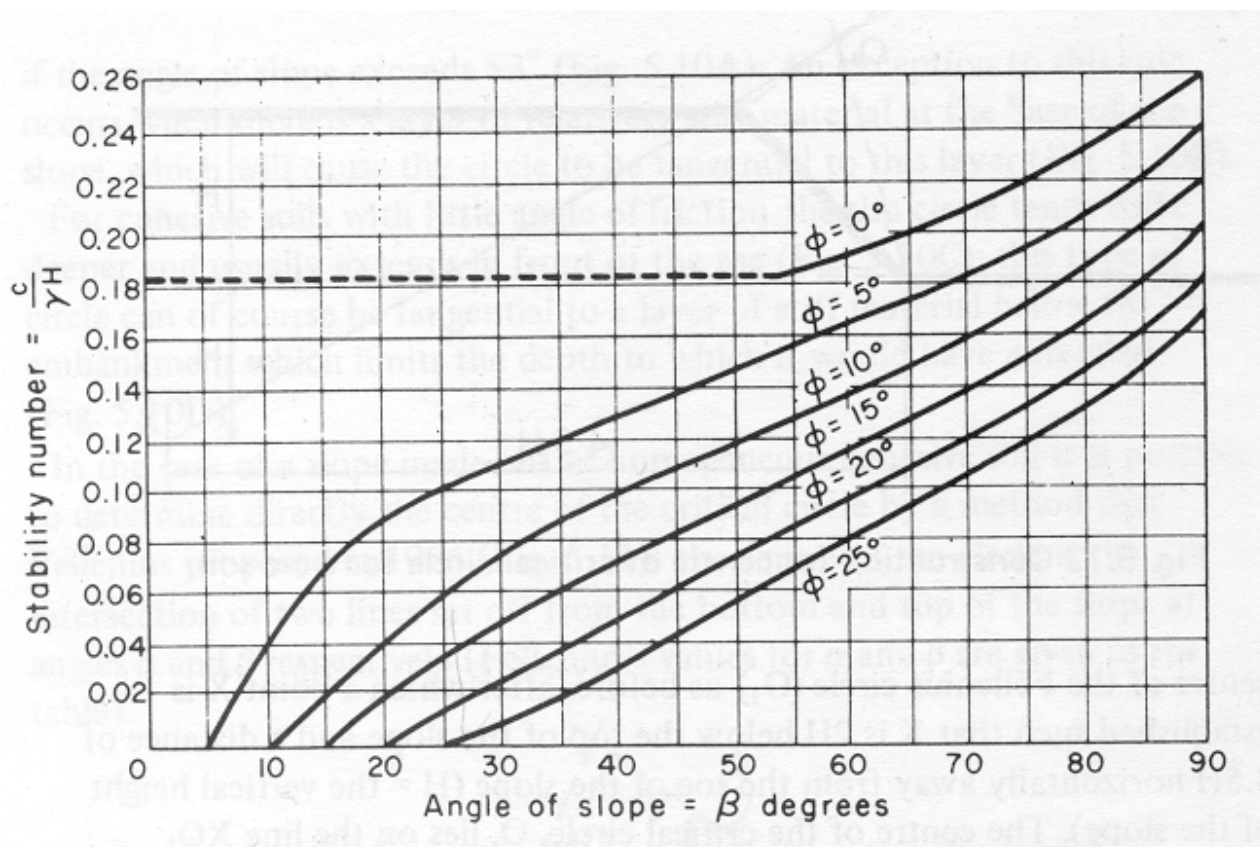
slika 7.11. U koherentnom tlu pojavljuju se vlacne pukotine uz klizne plohe



Razvijeni su dijagrami kojima se analizira stabilnost kosina u homogenom tlu za slučaj nedrenirane cvrstoce ( $\phi=0$ ) i za slučaj cvrstoce uz koheziju i kut trenja (npr. Taylor, 1948). Pri tome se koristi tzv. broj stabilnosti koji je definiran kao

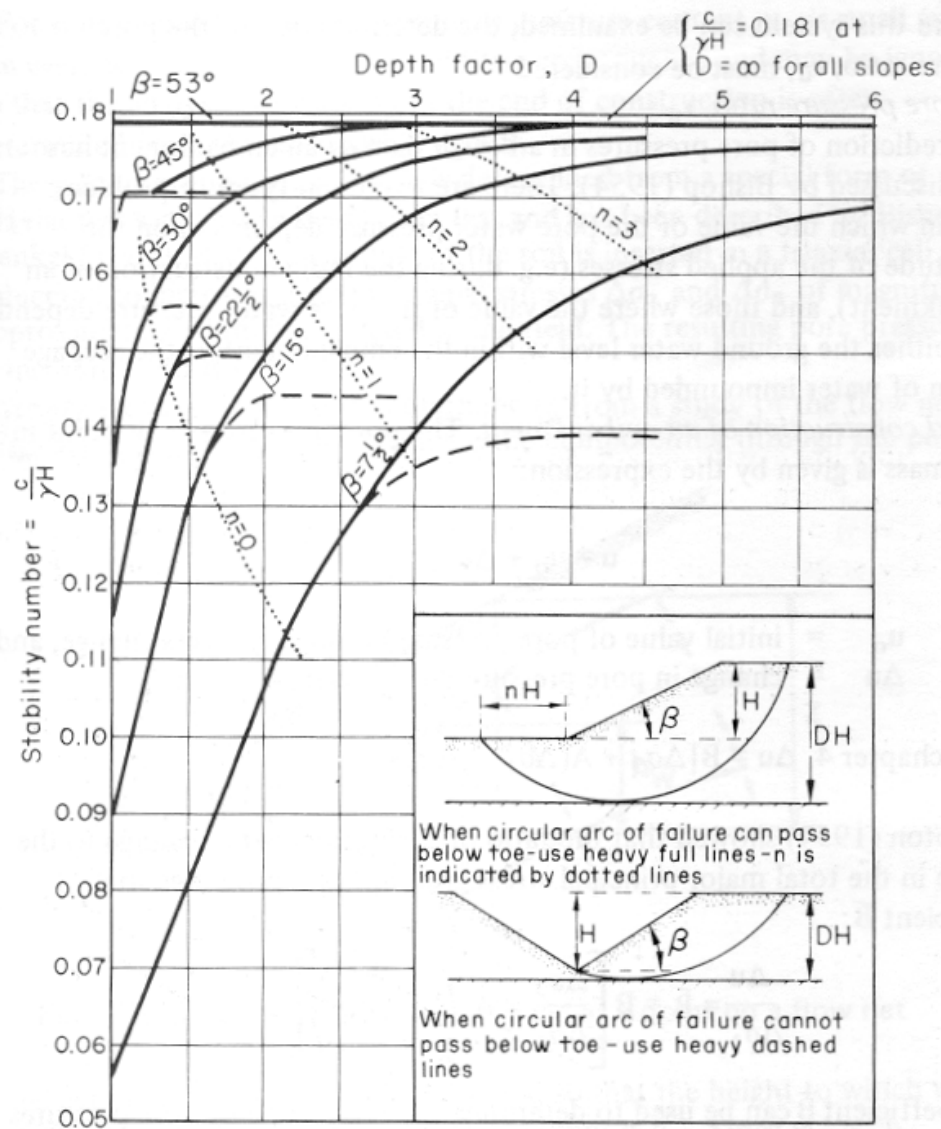
$$N = \frac{c_m}{gH} \quad (7.5.)$$

gdje je  $c_m$  = mobilizirana nedrenirana cvrstoca ( $=c_u/F$ ),  $H$ =vertikalna visina nasipa. Pokazuje se da dvije slične kosine u različitim tlima imaju isti  $N$  pod uvjetom da ta dva tla imaju isti kut trenja. Pomocu Taylorovih dijagrama može se izračunati sigurna visina nasipa (za odabrani nagib pokosa) ili nagib pokosa za odabranu visinu, kada se zna  $c_m=c/F$ . Postupkom se odredi iz dijagrama  $c_m$  a onda se odredi pripadni faktor sigurnosti  $F=c/c_m$ . Ako se radi analiza za totalna naprezanja za tlo s kohezijom i kutem unutarnjeg trenja tada se pretpostavi faktor sigurnosti za  $c$  ili  $\phi$ , izračuna se mobilizirani parametar (kao  $c_m=c/F$  ili  $\tan\phi_m = \tan\phi/F$ ) te se iz dijagrama (slika 7.12.) uz taj parametar odredi drugi parametar cvrstoce i njegov faktor sigurnosti  $F$ . Postupak je iterativan dok se ne poklope pretpostavljeni i izračunati faktor sigurnosti ( $F$  mora biti isti za  $c$  i  $\phi$  jer se radi o jedinstvenoj posmičnoj cvrstoci). Za slučaj nedrenirane analize može se koristiti dijagram na slici 7.13. Pomocu broja  $n$  na toj slici se može odrediti geometrijski oblik plohe sloma.



slika 7.12. Taylor-ov (1948) dijagram za određivanje faktora sigurnosti kosine u tlu s kohezijom i kutem unutarnjeg trenja (za  $\phi=0^\circ$  i za  $\beta<53^\circ$  vidi dijagram na slici 7.13.)

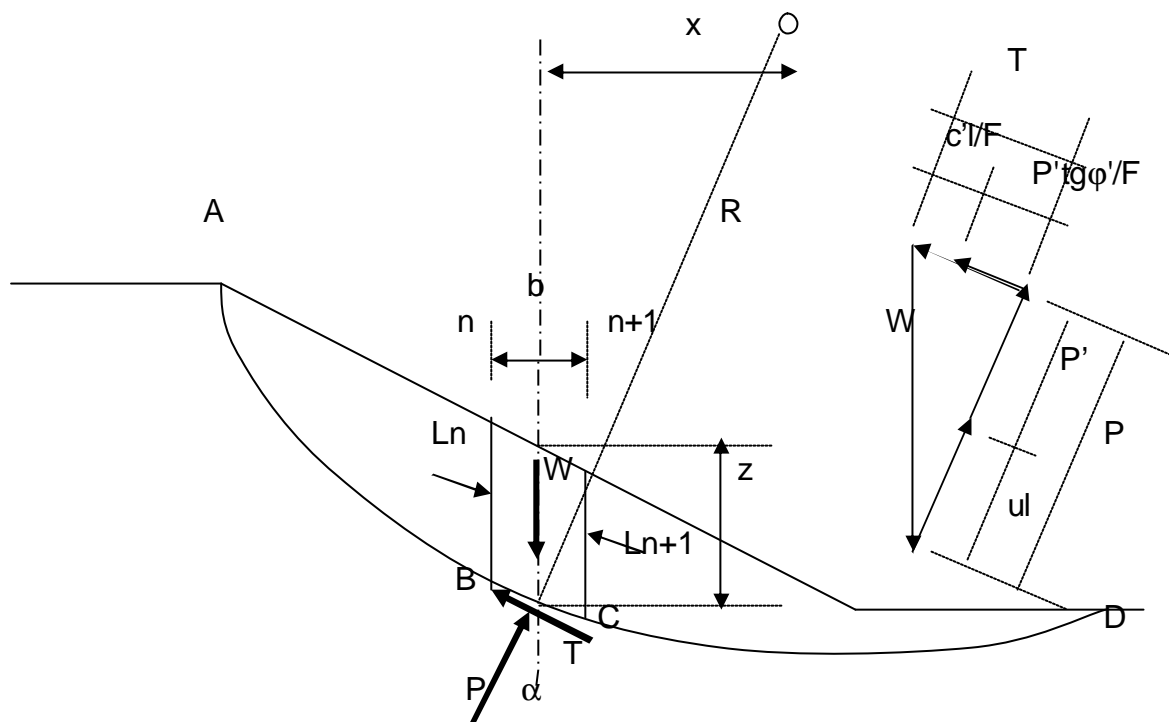
(Primjer: za tlo sa  $\phi=25^\circ$  i  $c=10$  kPa, te za kosinu  $\beta<30^\circ$ , pretpostavi  $F=1.5$ ; tada je  $\tan\phi_m=\tan\phi/1.5$  i  $\phi_m=17.2^\circ$ , pa je iz dijagrama  $c/\gamma H=0.04$ , a uz  $\gamma=20$  kN/m<sup>3</sup> i neka je  $H=4$  m dobije se  $c(=c_m)=3.2$  kPa, pa je  $F_c=10/3.2=3$ , dakle treba povećati ulazni  $F$  (umjesto 1.5); za  $F=2.5$  dobiva se istim postupkom  $F_c=1.67$ ; a za  $F=2$  dobiva se  $F_c=2.08$ , dakle jedinstveni faktor sigurnosti je  $F=2$ .)



slika 7.12. Taylor-ov (1948) dijagram za određivanje faktora sigurnosti kosine u tlu s nedreniranom cvrstocom (kut unutarnjeg trenja  $\phi=0^\circ$  ; za  $\beta>53^\circ$  vidi dijagram na slici 7.12.)

## 7.6. BISHOPOVA METODA

Slučaj nehomogene kosine i/ili klizne plohe oceg oblika zahtijeva druge postupke proračuna. Oni se svode na analizu stabilosti kliznog tijela podijeljenog u lamele (jednake širine). Najčešće se koristi postupak koji je predložio Prof. Bishop (Engleska, 1956), koji se po njemu i nazvao.



slika 7.14. Prikaz sila na lamele kliznog tijela za proračun po metodi Bishop

Klizna ploha je dio kružnice (ABCD), razmatraju se sile na lamelama, sa slijedecim znacenjem:

$W$	= težina tla (lamelle)
$P$	= ukupna normalna sila na dno lamelle
$T$	= posmicna sila na dnu lamelle
$z$	= visina lamelle
$b$	= širina lamelle
$l$	= duljina tetive na luku BC
$\alpha$	= kut nagiba $P$ prema vertikali
$x$	= horizontalna udaljenost centra lamelle do centra rotacije

Provjerit ce se ravnoteža kliznog tijela pod djelovanjem naznacениh sila. Sile se racunaju preko naprežanja i površina. Uvodi se pretpostavka da je  $L_n=L_{n+1}$  i da su na pravcu (njihova razlika je mala i ova pretpostavka izaziva malu netocnost).

Mobilizirana cvrstoca tla za ravnotežu izražena preko efektivnih naprežanja je

$$t = \frac{c' + (s_n - u)tgj'}{F}, \text{ totalni normalni napon } s_n = P/l, \text{ pa je sada}$$

$$t = \frac{1}{F} \left( c' + \left[ \frac{P}{l} - u \right] tgj' \right), \text{ pa je ukupna posmicna sila na dnu lamelle } T = t l \quad (7.6.)$$

Jednadžba ravnoteže za moment oko centra klizne plohe može se napisati za sve sile na svim lamelama pa je

$$\sum Wx = \sum TR = \sum t l R = \frac{R}{F} \sum [c'l + (P - ul)tgj'] \quad (7.7.)$$

Uz  $P=W\cos\alpha$  (iz projekcije na normalu na dno lamele) i uz  $x=R\sin\alpha$  dobiva se faktor sigurnosti

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum [c'l + (W \cos \alpha - ul)tgj'] \quad (7.8.)$$

Ako se porni tlak prikaže preko  $r_u$  tada je (uz  $b=l \cos\alpha$ ,  $u=r_u W/(l \cos\alpha)=r_u W \sec\alpha/l$ )

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum [c'l + (W \cos \alpha - r_u \sec \alpha)tgj'] \quad (7.9.)$$

Ovaj izraz daje rješenje koje je općenito poznato kao uobicajeno – konvencionalno-rješenje po Bishopu, a ono daje faktor sigurnosti do 15 posto veći od preciznijih postupaka.

Precizniji bi bio postupak u kome bi se jednadžbe ravnoteže radile za moment (kao do sada) i za vertikalni smjer (ne za smjer normale kao do sada), pa je tada

$W=P\cos\alpha + T\sin\alpha$ ,  $P=P'+ul$ ,  $T=1/F \times (c'l + P'tg\phi)$ , pa je konacan izraz za faktor sigurnosti

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left[ (c'l + W(1 - r_u)tgj') \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{tgj' tga}{F}} \right] \quad (7.10.)$$

Vidljivo je da postupak proračuna mora biti iterativan, jer se  $F$  nalazi na obje strane jednadžbe. Postupak racunanja provodi se tablicno, za svaku lamelu posebno: uz pretpostavljeni  $F$  izracunaju se dijelovi izraza (7.10.) pa se onda zbroje doprinosi svake lamele u tom izrazu kako bi se izracunao  $F$ . Ukoliko se pretpostavljeni  $F$  i izracunati  $F$  znacajnije razlikuju proračun se provodi uz novu pretpostavljenu vrijednost  $F$  dok se pretpostavljeni i izracunati  $F$  ne razlikuju dovoljno malo. Ponekad se umjesto duljine  $l$  koristi duljina  $b$  u racunu preko transformacije  $b=l \cos\alpha$ .

Svaki proračun odnosi se na jednu kliznu plohu. Traženje kritične klizne plohe zahtijeva ispitivanje više kliznih ploha. Racunski programi na racunalima to obavljaju vrlo brzo.

Neke druge metode proračuna uvažavaju postojanje (raspodjele) bocnih normalnih naprezanja na lamelama i položaj i nagib njihove rezultante.

Bishop i Morgenstern su (1960.) pokazali su da se faktor sigurnosti odnosi linearno s  $r_u$  (kada je on konstantan), kao  $F=m-nr_u$ . ( $m$  je faktor sigurnosti za totalna naprezanja (pretpostavlja se da nema pornih tlakova a  $n$  je faktor koji iskazuje utjecaj pornog tlaka na

faktor sigurnosti). Izradili su tablice za homogene kosine s konstantnim  $r_u$ , s vrijednostima  $m$  i  $n$ .

Opcenito koeficijent pornog tlaka  $r_u$  razlikuje se po visini lamele i po lamelama, pa se za opceniti racun obavlja njegovo osrednjavanje po lameli.

Potreban faktor sigurnosti protiv klizanja kreće se u granicama  $F=1.25-1.5$ , ovisno o tipu konstrukcije, pouzdanosti parametara cvrstoće, privremenom ili trajnom stanju kosine. Uobicajeno se koristi  $F_{s_{min}}=1.5$  za trajne konstrukcije a  $F_s=1.3$  za privremene konstrukcije.

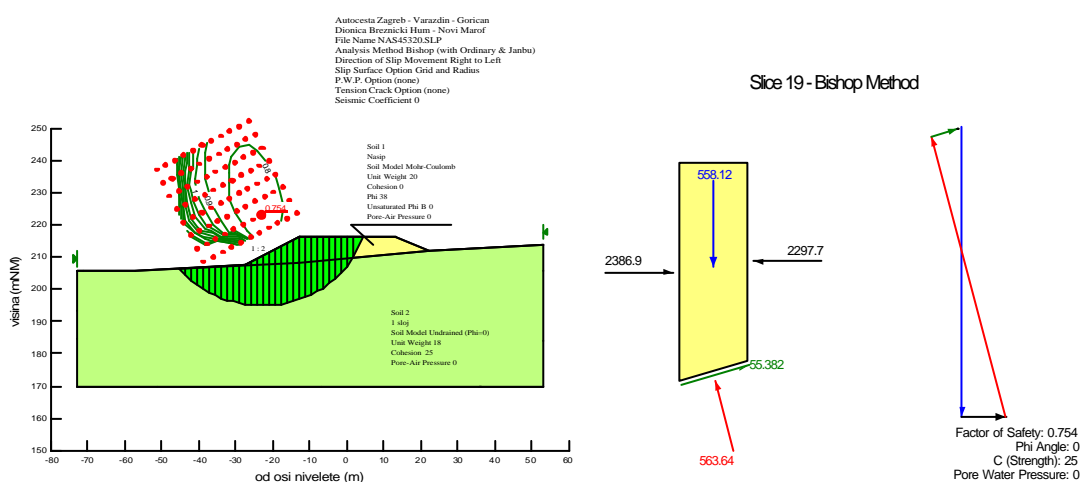
Utjecaj potresa na stabilnost kosine uzima se u obzir dodavanjem horizontalne sile  $\alpha W$  u ovisnosti o očekivanoj horizontalnoj akceleraciji  $\alpha$  ( $W$  je totalna težina lamele).

## 7.7. PARAMETRI CVRSTOĆE TLA

Parametri cvrstoće određuju se pokusima u laboratoriju. Za potrebe analiza stabilnosti za brza opterećenja i za meka tla koristi se nedrenirana cvrstoca  $c_u$ , a za dugotrajna opterećenja koriste se efektivni parametri cvrstoće  $c'$  i  $\phi'$ . Cesto se koriste tzv. totalni parametri  $c$  i  $\phi$ , za slučaj kada se ne mogu sa sigurnosti ustanoviti porni tlakovi, npr. kod djelomicno zasicenog tla. Poseban problem predstavlja prognoza razvoja pornih tlakova, pa se za potrebe takvih istraživanja izvode posebni pokusi u laboratoriju ua određivanje porasta pornog tlaka u očekivanim promjenama totalnih naprezanja i iz njih se racuna  $r_u$ .

## ZAKLJUCAK

- Problem stabilnosti kosina (pokosa) uobicajen je u geotehnickoj praksi. Postupci proracuna se svode najčešće na numericke postupke proracuna, bilo rucno (tabelarni postupak) ili racunalima (gotovi programi).
- Kriticni elementi proracuna su: određivanje moguće klizne plohe (narocito važno za nehomogene kosine), određivanje polja pornih tlakova (strujna mreža) i određivanje parametara cvrstoće tla.
- Problem klizanja je trodimenzionalan problem, ali se analizira kao dvodimenzionalni problem.
- Danas se uglavnom koriste kompjutorski programi za proracun stabilnosti kosina, u kojima se mogu brzo kontrolirati faktori sigurnosti u odnosu na model kosine (porni tlakovi, oblik i položaj klizne plohe, parametri cvrstoće).



slika 7.15. Rezultat kompjutorskog proracuna stabilnosti nasipa sa silama na jednoj lameli