

Sveučilište u Zagrebu

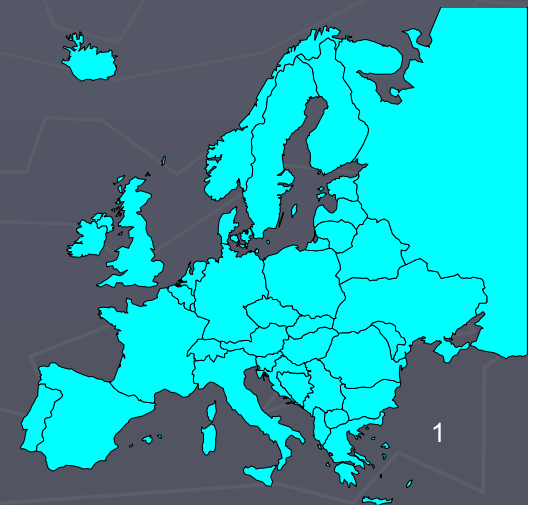
Diplomski sveučilišni studij

Građevinski fakultet

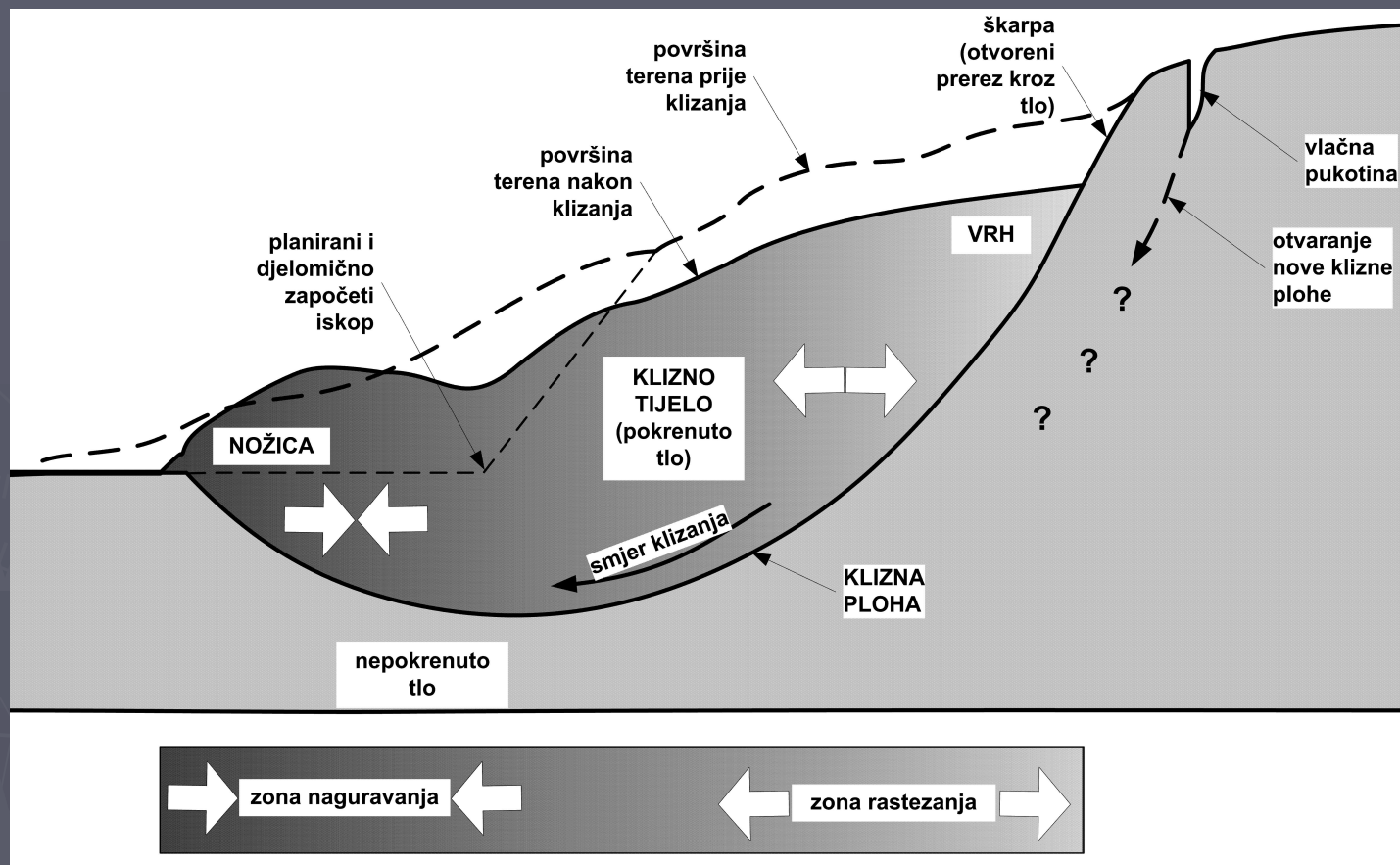
Smjer: **GEOTEHNIKA**

# Stabilnost kosina 2

Prof. dr. sc. Tomislav Ivšić  
Građevinski fakultet Zagreb



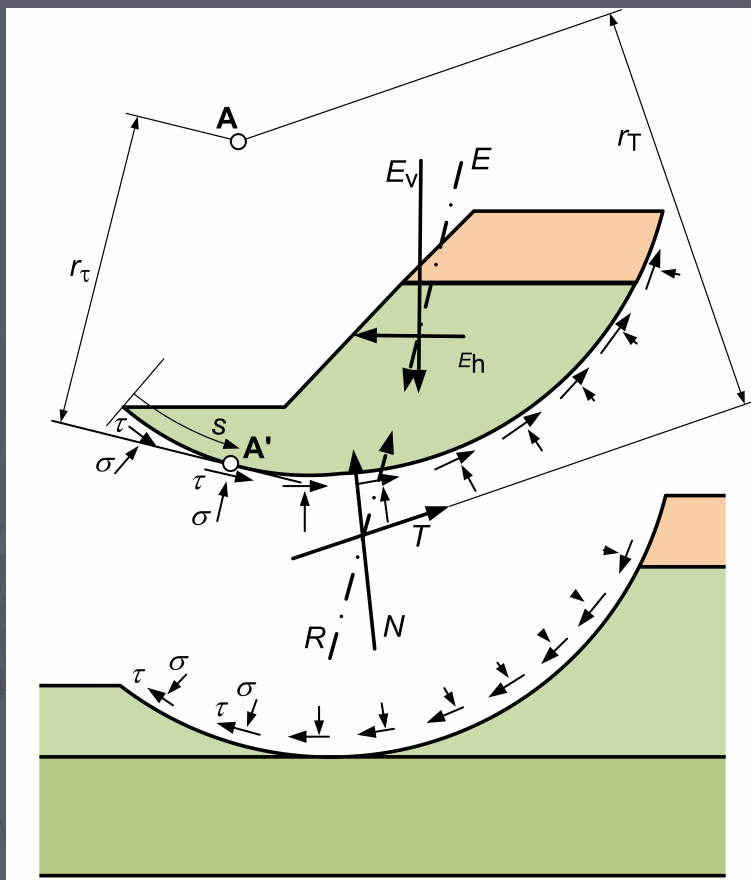
# Klizno tijelo, klizna ploha, klizište i oblici klizanja



Slika 3-7 Elementi nestabilnosti na kosini

# Mehanizam klizanja

## Analiza opterećenja i uvjeti globalne ravnoteže



Slika 3-9 Opterećenja na klizno tijelo

$$\vec{E} = -\vec{R}$$

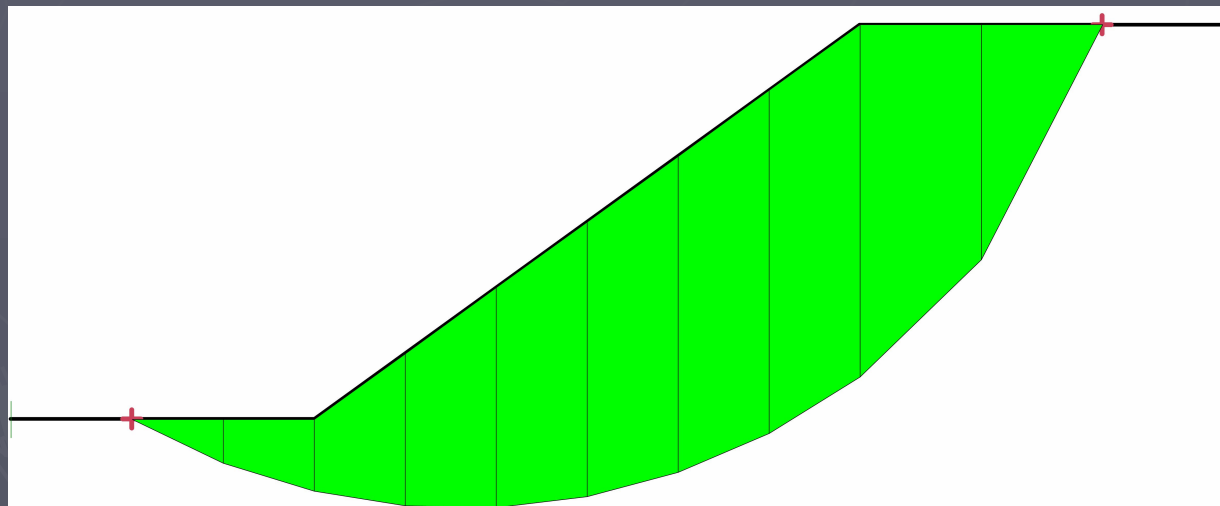
Akcija = reakcija

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{T}$$

$$\vec{T} = \int_0^l \vec{t}(s) ds$$

# Analiza stabilnosti metodama granične ravnoteže

## Metoda granične ravnoteže i pretpostavke



## Faktor sigurnosti

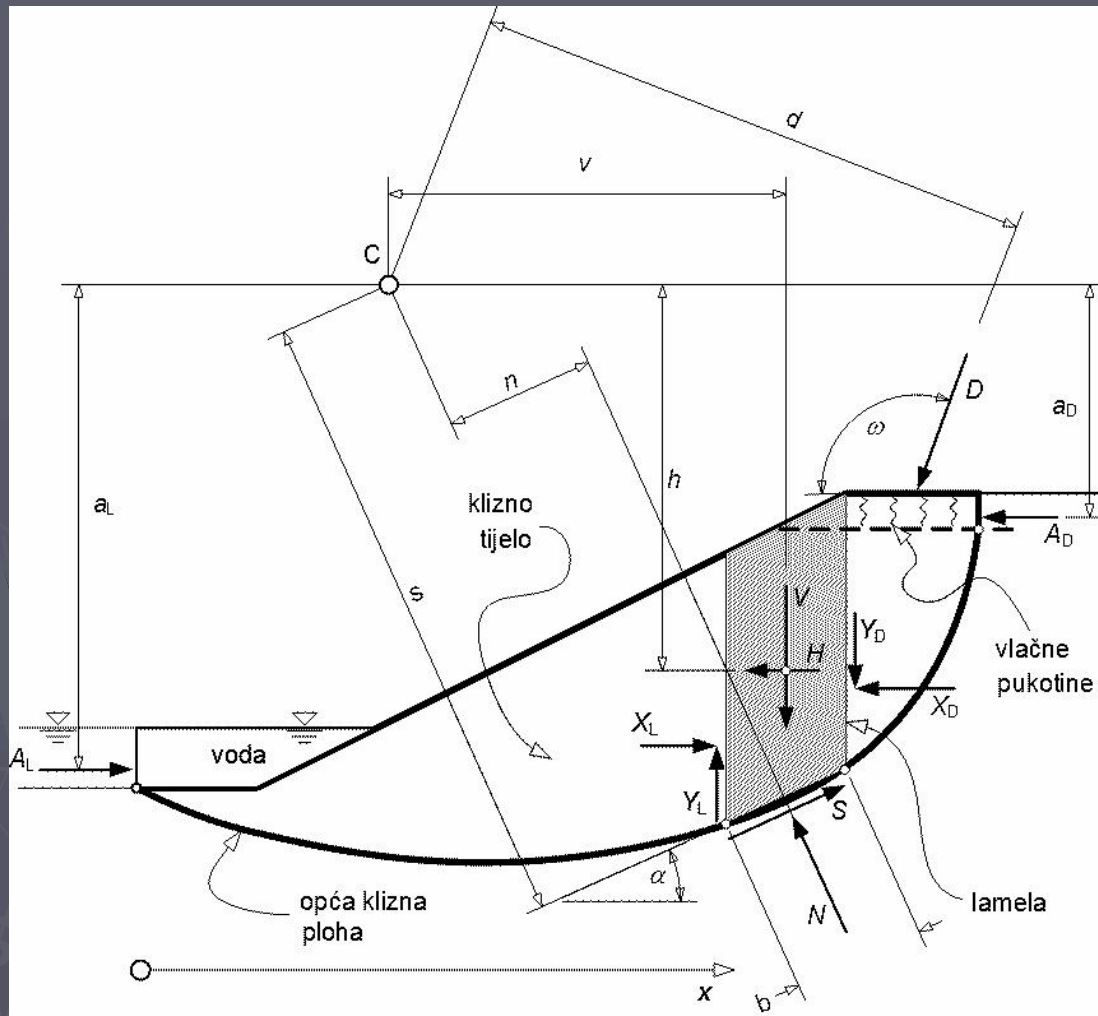
$$F = \frac{\tau_f}{\tau}$$

Slika 3-17 Klizno tijelo podijeljeno u vertikalne lamele za primjenu metode granične ravnoteže

- $F > 1$  → stabilno stanje
- $F = 1$  → stanje sloma, nestabilno stanje
- $0 \leq F < 1$  → neravnotežno stanje, nestabilno stanje

# Opća metoda granične ravnoteže

## STATIČKA NEODREĐENOST I PRETPOSTAVKE



Slika 3-18 Opća klizna ploha i sile koje djeluju na tipičnu lamelu

# STATIČKA NEODREĐENOST I PRETPOSTAVKE

**Tablica 3-1 Nepoznanice u kliznom tijelu s n lamela**

Opis nepoznanice	oznaka	broj
Normalna sila na osnovici lamele (rezultanta normalnog naprezanja $\sigma$ )	$N$	$n$
Hvatište sile $N$	-	$n$
Tangencijalna sila na osnovici lamele (rezultanta posmičnog naprezanja $\tau$ )	$S$	$n$
Normalna sila između dviju lamela	$X$	$n - 1$
Tangencijalna sila između dviju lamela	$Y$	$n - 1$
Hvatište sile $X$	-	$n - 1$
<b>Ukupno nepoznanica</b>		<b><math>6n - 3</math></b>

**Tablica 3-2 Broj jednadžbi ravnoteže sustava od n lamela**

Jednadžbe ravnoteže lamela	broj
Zbroj sila u vodoravnom smjeru	$n$
Zbroj sila u uspravnom smjeru	$n$
Zbroj momenata sila obzirom a točku $C$	$n$
<b>Ukupno jednadžbi ravnoteže</b>	<b><math>3n</math></b>

# STATIČKA NEODREĐENOST I PRETPOSTAVKE

## Mohr-Coulombov zakon čvrstoće

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$$

## Tangencijalna sila na dnu lamele S - rezultanta posmičnih naprezanja

$$S = [C + (N - U) \tan \varphi] / F$$

## Nagib međulamelarnih sila

$$\frac{Y}{X} = \lambda f(x)$$

Opis nepoznanice ili dodatne pretpostavke	oznaka	broj
Preostali višak nepoznanica u odnosu na broj jednažbi iz tablica 3-1 i 3-2	-	$3n - 3$
Faktor sigurnosti	$F$	1
Faktor $\lambda$	$\lambda$	1
Mohr-Coulombov zakon čvrstoće, izraz (3.12)	-	$-n$
Funkcija nagiba međulamelarnih sila	$f(x)$	$-(n - 1)$
Hvatište sila $N$ na sredini dna lamele	-	$-n$
<b>Ukupno višak nepoznanica nad brojem jednažbi</b>		<b>0</b>

# Jednadžbe ravnoteže i njihovo rješenje

Za pojedinačnu lamelu

$$\Sigma \mathbf{H} = 0 \quad \Delta X - N \sin \alpha + S \cos \alpha - H + D \cos \alpha = 0 \quad \Delta X = X_D - X_L$$

$$\Sigma \mathbf{V} = 0 \quad N \cos \alpha + S \sin \alpha - \Delta Y - V - D \sin \omega = 0 \quad \Delta Y = Y_D - Y_L$$

$$\Sigma \mathbf{M} = 0 \quad Vv - Ss - Nn + Hh + Dd - X_L x_L + X_D x_D - Y_L y_L + Y_D y_D = 0$$

Sređivanjem izraza dobije se :

$$N = \frac{V - \Delta Y - \frac{\sin \alpha}{F} (C - U \tan \varphi) + D \sin \omega}{m_\alpha}$$

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{1}{F} \sin \alpha \tan \varphi$$

Globalne jednadžbe ravnoteže za cijelu plohu

$$\Sigma \Delta X - \Sigma N \sin \alpha + \Sigma S \cos \alpha - \Sigma H + \Sigma D \cos \omega = 0$$

$$F_x = \frac{\Sigma (C \cos \alpha + (N - U) \tan \varphi \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha + \Sigma H - \Sigma D \cos \omega + A_L - A_D}$$

$$\Sigma Vv - \Sigma Ss - \Sigma Nn + \Sigma Hh + \Sigma Dd + A_L a_L - A_D a_D = 0$$

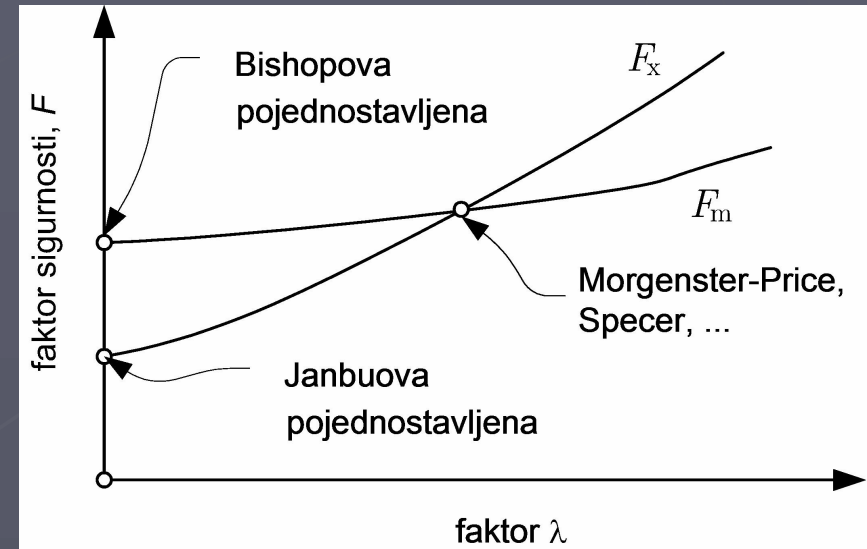
$$F_m = \frac{\Sigma (Cs + (N - U) s \tan \varphi)}{\Sigma Vv - \Sigma Nn + \Sigma Hh + \Sigma Dd + A_L a_L - A_D a_D}$$



# Jednadžbe ravnoteže i njihovo rješenje

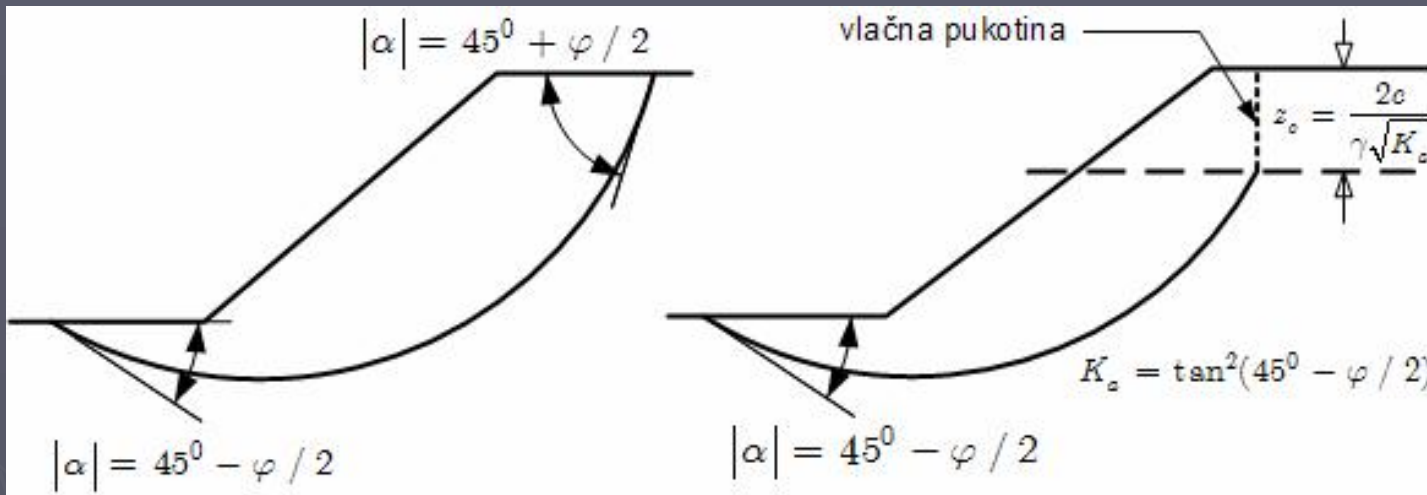
## Iterativni postupak

1. razina: pretp.  $F$  i  $\Delta X = 0$   $\Delta Y = 0$
2. razina: pretp.  $\lambda = 0$
3. razina : promjena  $\lambda$  do  $F_x \approx F_m$



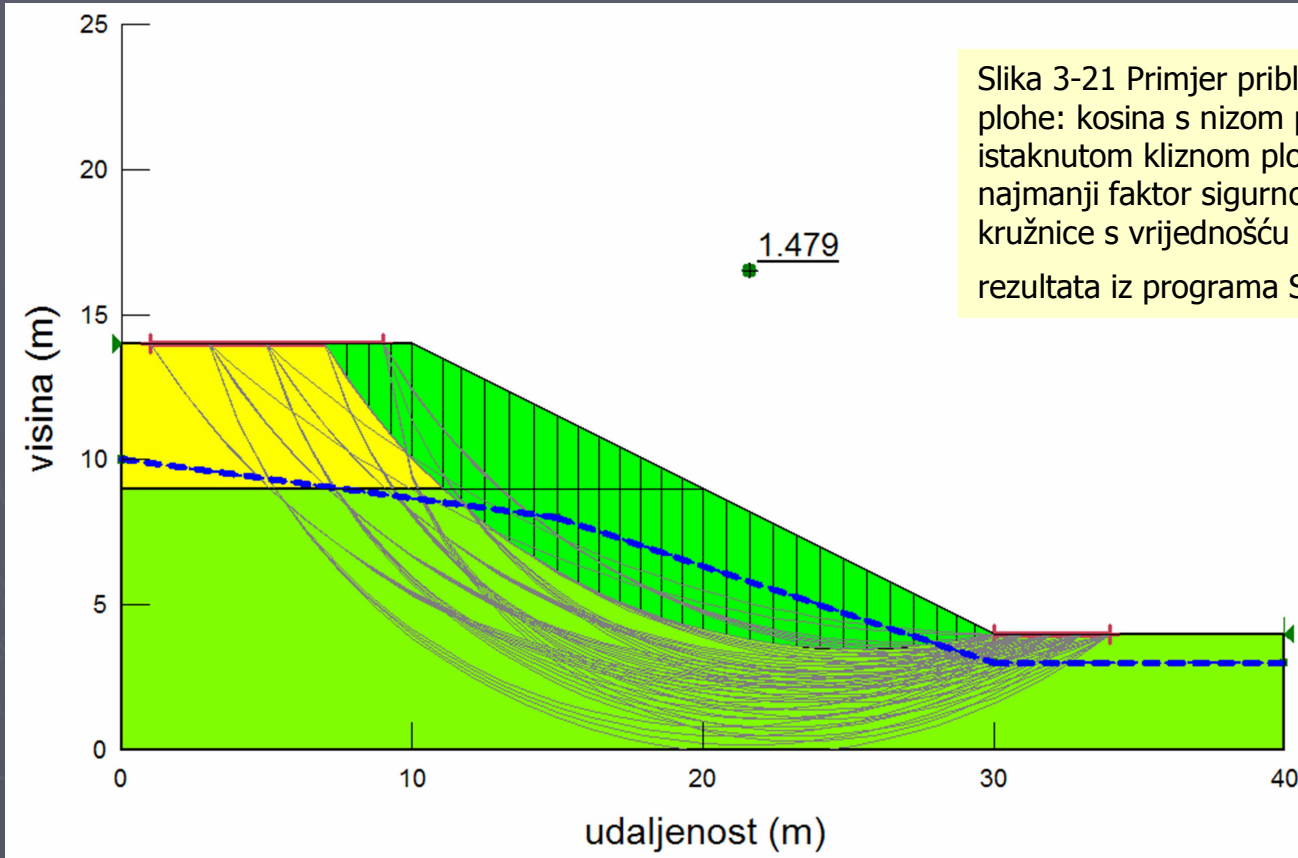
Slika 3-19 Treća razina iteracije u proračunu faktora sigurnosti po općoj metodi granične ravnoteže u kojoj se mijenja faktor  $\lambda$  tako dugo, dok se faktori sigurnosti određeni iz ravnoteže momenata ( $F_m$ ) i iz ravnoteže sila u vodoravnom smjeru ( $F_x$ ) ne izjednače; za  $\lambda = 0$  ove jednadžbe daju faktore sigurnosti nekih pojednostavljenih metoda

# Oblik klizne plohe i problemi konvergencije s m-alfa



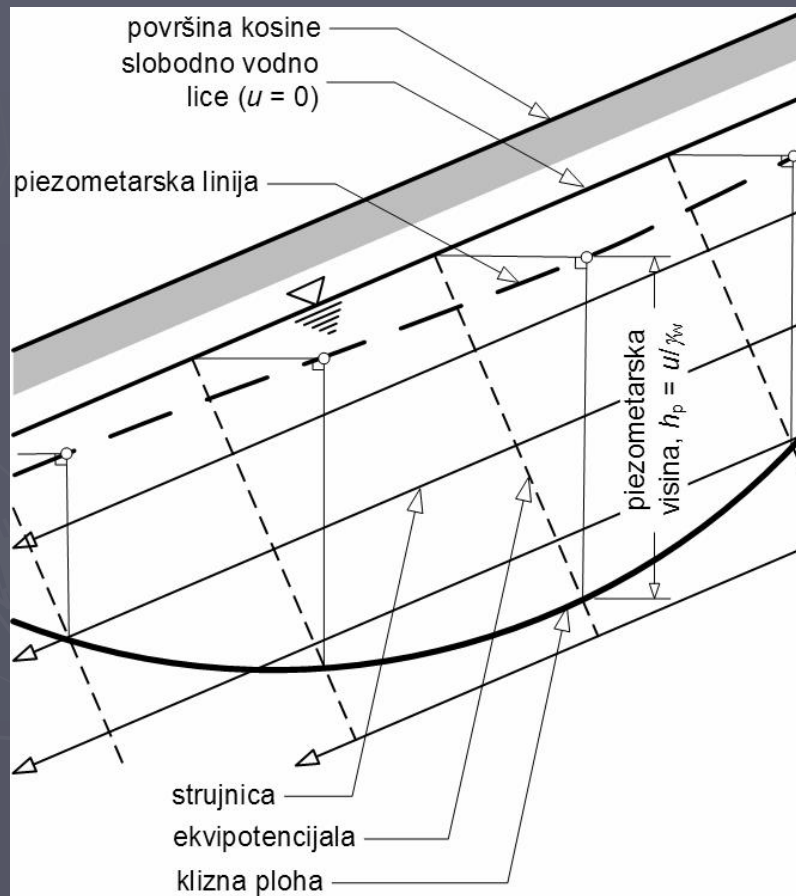
Slika 3-20 Realniji nagibi klizne plohe na vrhu kliznog tijela i u nožici (lijevo) ili uvođenje vlačne pukotine (desno) kao rješenje problema nepovoljnog slučaja za koji je  $m_\alpha = 0$

# KRITIČNA KLIZNA PLOHA



Slika 3-21 Primjer približnog pronalaženja kritične klizne plohe: kosina s nizom probnih kružnih kliznih ploha te istaknutom kliznom plohom koja među probnima ima najmanji faktor sigurnosti; istaknuto je središte kritične kružnice s vrijednošću pripadnog faktora sigurnosti (prikaz rezultata iz programa Slope/W tvrtke GeoSlope, Kanada)

# TLAKOVI VODE U PORAMA TLA, PIEZOMETARSKA LINIJA I KOEFICIJENT PORNOG TLAKA



Slika 3-22 Piezometarska linija u proračunu stabilnosti kosina: općenito svakoj kliznoj plohi odgovara druga piezometarska linija koja je po svom položaju obično nešto niža od slobodnog vodnog lica

Koeficijent pornog tlaka

$$r_u = \frac{u}{\sigma_v}$$

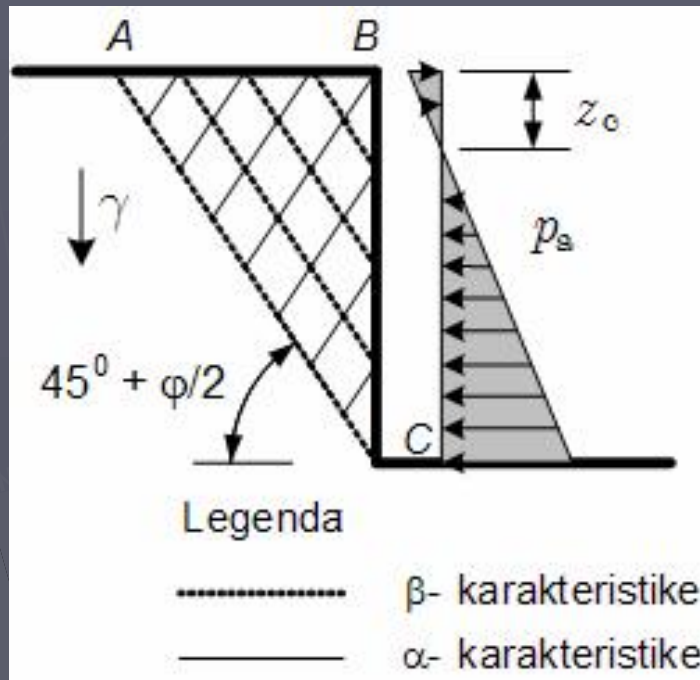
# Posebne varijante metode granične ravnoteže

Tablica 3-4 Karakteristike nekih povijesnih varijanti metode granične ravnoteže

Naziv varijante	klizna ploha	jednadžbe ravnoteže		sile među lamelama		funkcija nagiba sila među lamelama $f(x)$
		$\Sigma_x = 0$	$\Sigma_m = 0$	$\Delta X$	$\Delta Y$	
Obična ili Felleniusova (Fellenius, 1936)	kružna	Ne	Da	$= 0$	$= 0$	$X = 0$ $Y = 0$
Janbuova pojednostavljena (Janbu, 1954)	opća	Da	Ne	$\neq 0$	$= 0$	$= 0$
Bishopova pojednostavljena (Bishop, 1955)	kružna	Ne	Da	$\neq 0$	$= 0$	$= 0$
Morgenstern-Priceova (Morgenstern i Price, 1965)	opća	Da	Da	$\neq 0$	$\neq 0$	zadaje korisnik
Spencerova (Spencer, 1967)	opća	Da	Da	$\neq 0$	$\neq 0$	$= 1$
Sarmina (Sarma, 1973)	opća	Da	Da	$\neq 0$	$\neq 0$	$Y =$ $= C + X \tan \varphi$

Napomene:  $\Sigma_x = 0$  ... jednadžba ravnoteže u vodoravnom smjeru  
 $\Sigma_m = 0$  ... jednadžba ravnoteže momenta sila

# VERTIKALNI ZASJEK I VLAČNA PUKOTINA



Slika 3-23 Aktivno stanje sloma i raspodjela aktivnog tlaka na vertikalnom presjeku kroz tlo i kritična dubina  $z_c$

Aktivni tlak

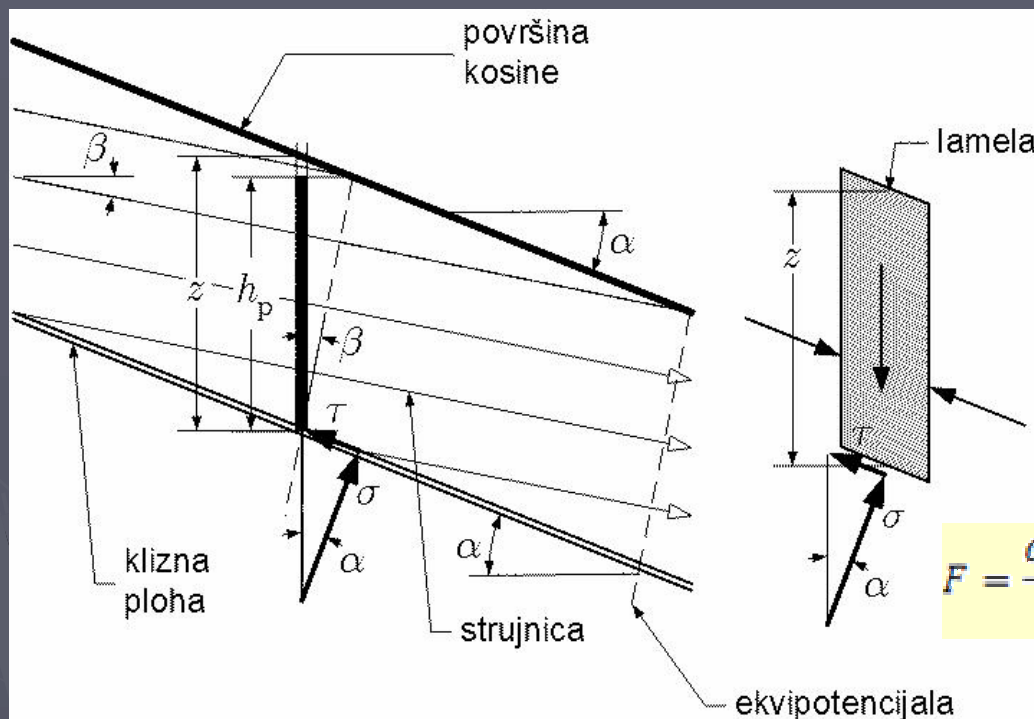
$$\sigma'_h = p_a = \sigma'_v K_a - 2c' \sqrt{K_a}$$

$$z_c = \frac{2c'}{\gamma' \sqrt{K_a}}$$

Za nedrenirano stanje

$$z_c = \frac{2c_u}{\gamma}$$

# Ravna homogena kosina



$$\sigma = \gamma z \cos^2 \alpha$$

$$\tau = \gamma z \cos \alpha \sin \alpha = \gamma z \frac{\tan \alpha}{1 + \tan^2 \alpha}$$

$$u = \gamma_w h_p = \gamma_w z \frac{1}{1 + \tan \alpha \tan \beta}$$

$$F = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \varphi'}{\tau} = \frac{c' 1 + \tan^2 \alpha}{\gamma z \tan \alpha} + \frac{\gamma_b \tan \varphi'}{\gamma \tan \alpha}$$

Slika 3-24 Strujanje vode i sile na lameli za beskonačnu kosinu s ravnom kliznom plohom usporednom s površinom terena

**Bez tečenja vode**

$$F = \frac{c' 1 + \tan^2 \alpha}{\gamma z \tan \alpha} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha}$$

# Stabilnost kosina i Eurokod 7

$$E_d \leq R_d$$

$$\tau_k \gamma_F \leq \frac{\tau_f}{\gamma_M}$$

$$\gamma_M \leq \frac{\tau_f}{\tau_k} = F$$

## Proračunske situacije

- Stabilnost u dugotrajnim (stacionarnim) uvjetima
- Stabilnost tijekom i neposredno nakon izgradnje
- Naglo sniženje podzemne vode
- Djelomično potopljena kosina
- Stabilnost prirodnih klizišta nakon velikih pomaka – rezidualna čvrstoća
- Stabilnost visokih usjeka u krutim glinama
- Potresi

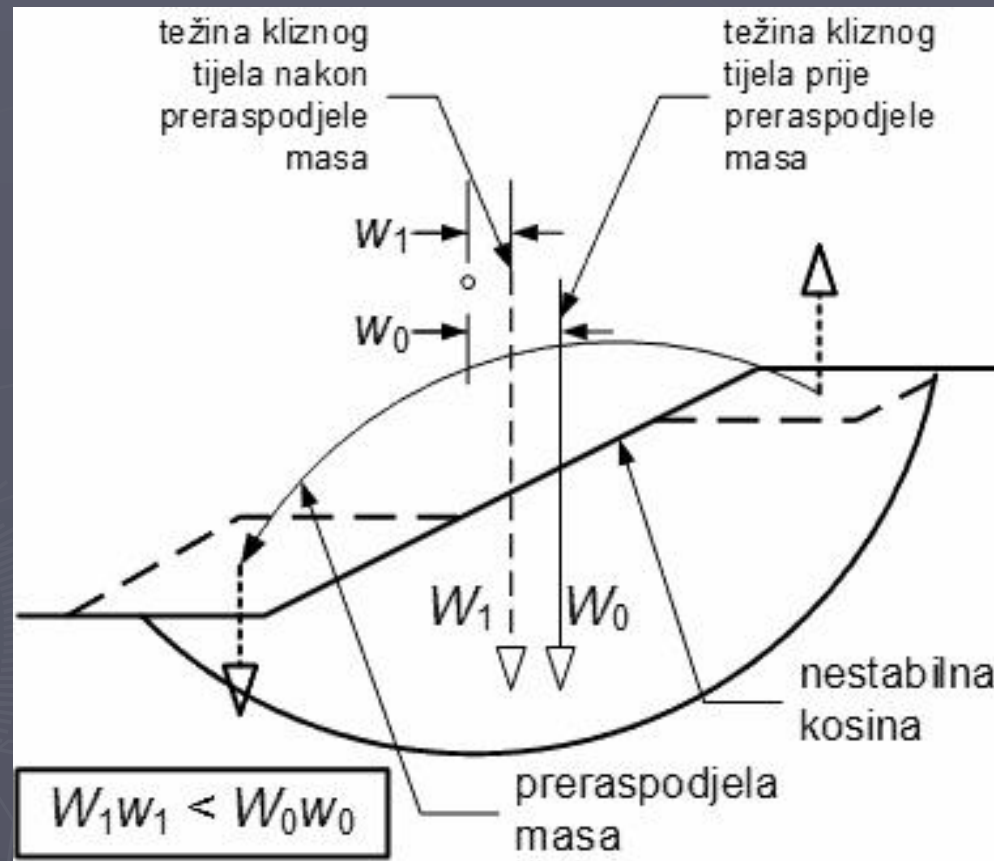


# Metode stabiliziranja kosina

- **Prije primjene neke od mjera stabilizacija prvenstveno je potrebno odrediti uzroke klizanja.**
- **Bez utvrđivanja tih uzroka ne može se očekivati racionalno rješenje problema nestabilnosti.**
- **Za utvrđivanje tih uzroka potrebno je provesti odgovarajuće geotehničke, a za klizišta u prirodnim tlima i geološke istražne radove**
- **Dugotrajna opažanja i mjerenja – inklinometri, piezometri**

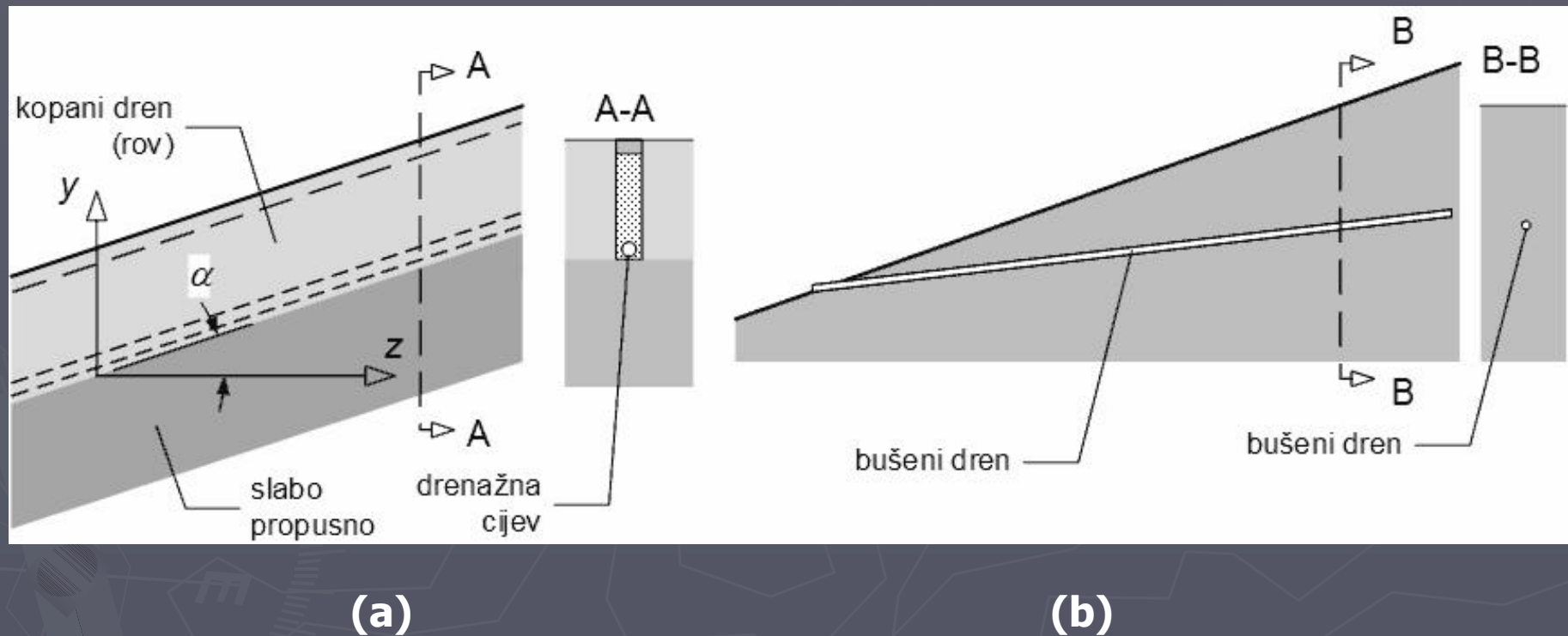
# Metode stabiliziranja kosina

## Preraspodjela zemljanih masa



# Metode stabiliziranja kosina

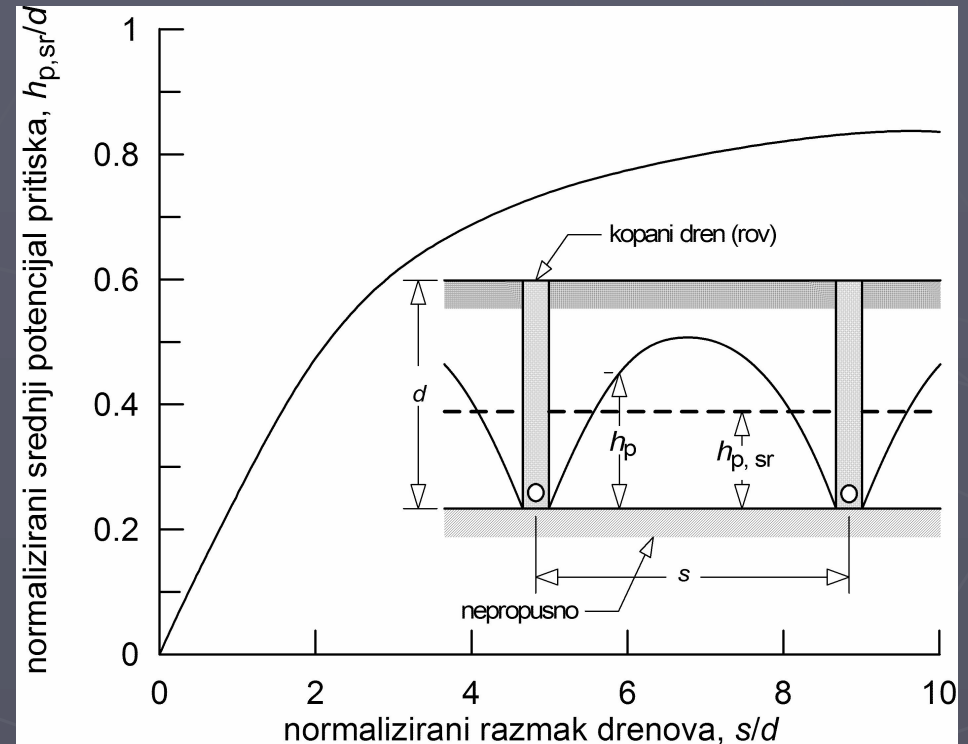
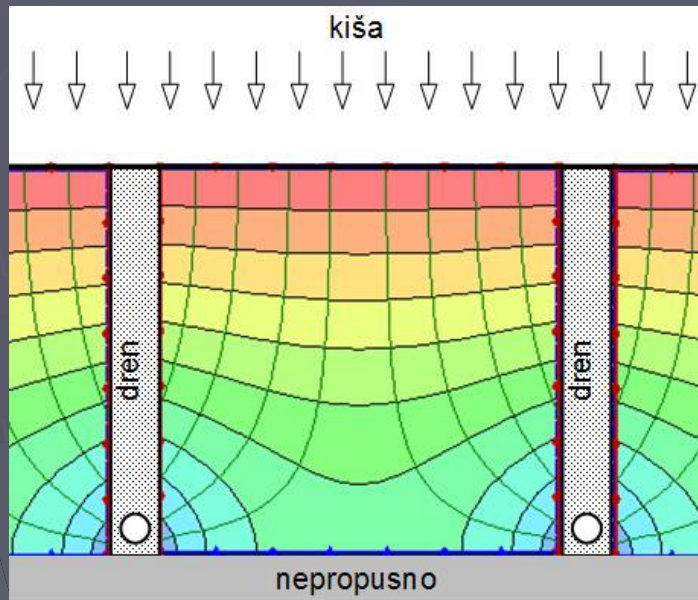
## Površinsko i dubinsko dreniranje



Slika 3-26 Kopani dren (drenažni rov), (a), i bušeni cjevasti dren, (b)

# Metode stabiliziranja kosina

## Površinsko i dubinsko dreniranje

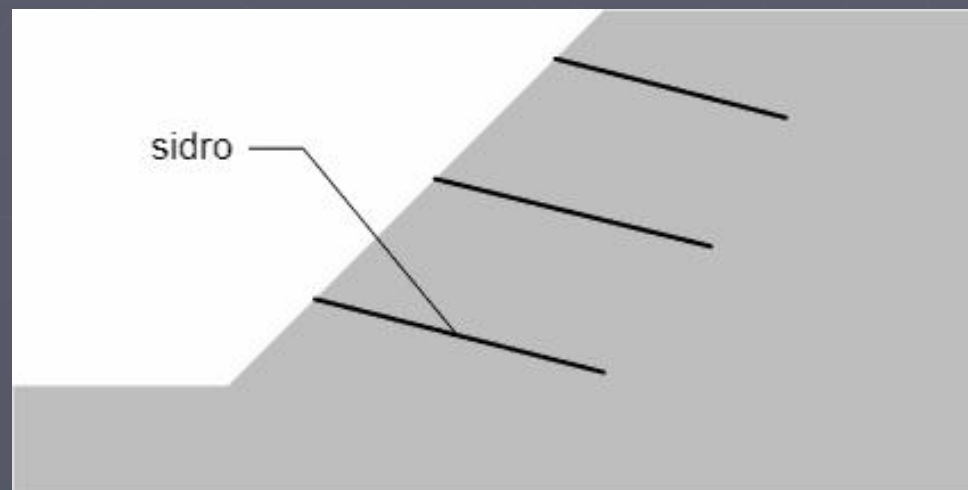


Slika 3-27 Strujna mreža oko usporednih kopanih drenova za slučaj kad je tlak vode na površini terena (kiša) i u drenu (a); učinkovitost usporednih kopanih drenova za prethodni slučaj rubnih uvjeta, izražena preko normalizirane vrijednosti srednjeg piezometarskog potencijala, u ovisnosti o relativnom razmaku drenova

# Metode stabiliziranja kosina

## Potporne konstrukcije

- Potporni zidovi
- Armirano tlo
- Gabioni
- pilotne stijene
- sidrene potporne konstrukcije
- mlazno injektiranje
- poboljšanje tla dubokim miješanjem tla i aditiva (vapno, cement...)



Slika 3-28 Primjer sidrene potporne konstrukcije

# Metode stabiliziranja kosina



**Sustav Terramesh**  
**armirano tlo s gabionskom**  
**fasadom**

