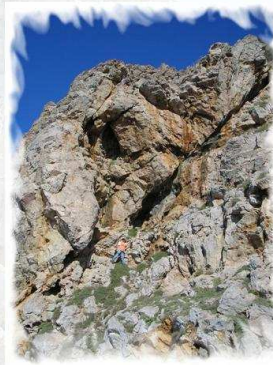


## 6. Analize stabilnosti kosina

- Geometrija kosina
- Zahtjevi stabilnosti
- Oblici nestabilnosti i kliženja
- Postupci i metode proračuna
- Ravninski slom
- Klinasti slom
- Opći oblik sloma
- Metode stabilizacije i zaštite kosina



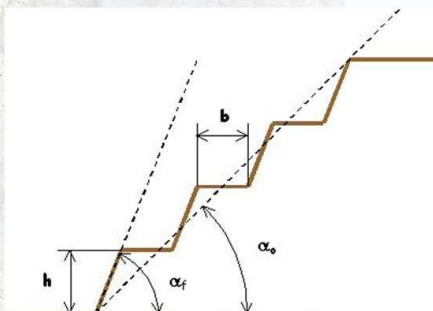
## Geometrija kosina

- Konkavni oblik
- Konveksni oblik



## Geometrija kosina

- Vrsta kosina
  - Radne kosine
  - Završne kosine
- Geometrija
  - Visina etažnih kosina  $h$
  - Nagib etažnih kosina  $\alpha_f$
  - Širina etažne ravnine  $b$
  - Generalni nagib iskopa  $\alpha_o$



## Zahtjevi stabilnosti

- ❑ Mjera stabilnosti
  - Faktor sigurnosti (stabilnosti)
- ❑ Zahtjevane vrijednosti prema Pravilniku o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina (SL, 4/86)
  - Etažne radne kosine 1,0 – 1,05
  - Sustav etažnih radnih kosina 1,05 – 1,1
  - Sustav etažnih radnih kosina s transportnim putovima 1,15 – 1,2
  - Završne kosine 1,3 – 1,5
- ❑ Prema Eurokodu 7 zahtjevana vrijednost je 1,0 pri provjeri graničnog stanja ULS (Ultimate Limit State) uz primjenu parcijalnih koeficijenata za određeni projektni slučaj (EN 1997-1)

## Oblici nestabilnosti

- ❑ Obrušavanje – pojava odvajanja i rušenja slobodnih blokova na vrlo strmim stijenskim kosinama
- ❑ Prevrtnje – oblik nestabilnosti koji izaziva moment sile vlastite težine oko neke točke na bazi bloka
- ❑ Kliženje – nestabilnost koja se događa prilikom prekoračenja posmične čvrstoće na kliznoj plohi
- ❑ Puzanje – pojava nestabilnosti vezana uz reološka svojstva materijala
- ❑ Kompleksna pokretanja – predstavljaju moguće kombinacije dva ili više oblika pokretanja

## Oblici kliženja

- ❑ Slom po plohama diskontinuiteta
  - Ravninski slom
  - Klinasti slom
  - Stepeničasti slom
  - Blokovski po poligonalnoj kliznoj plohi
- ❑ Slom kroz stijensku masu (opći ili zakrivljeni oblik sloma)
- ❑ Kombinirani slom (najčešće kombiniran od ravninskog sloma po plohama diskontinuiteta i zakrivljenog kroz stijensku masu)



## Primjeri nestabilnosti

Obrušavanje



Prevrtanje

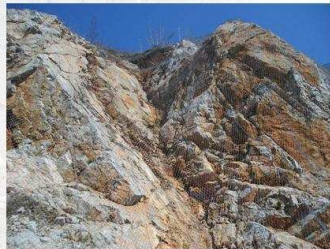


## Primjeri nestabilnosti

Ravninski slom



Klinasti slom



## Primjeri nestabilnosti

Zakrivljeni ili složeni oblik sloma

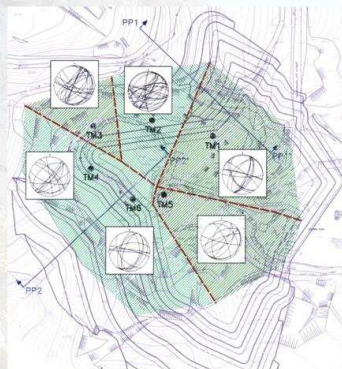


## Postupci analize stabilnosti

- ❑ Prikupljanje ulaznih podataka (utvrđivanje geomehaničkih značajki stijenskih masa i geometrijskih karakteristika kosina)
- ❑ Utvrđivanje proračunskog modela (utvrđivanje reprezentantnih profila obzirom na kritičnost elemenata modela stijenske mase i geometrijskih karakteristika kosina)
- ❑ Preliminarne analize (primjena grafičkih analiza stabilnosti radi utvrđivanja potencijalno mogućih oblika nestabilnosti te klasifikacijskih metoda za procjenu općeg stanja stijenske mase na kosini)
- ❑ Proračuni stabilnosti (faktora sigurnosti) (primjena različitih proračunskih metoda za utvrđene oblike nestabilnosti)

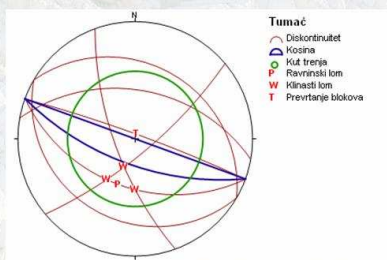
## Utvrđivanje proračunskog modela

- ❑ Utvrđivanje reprezentantnih profila obzirom na kritičnost elemenata modela stijenske mase i geometrijskih karakteristika kosina



## Preliminarne analize

- ❑ Grafička metoda analize stabilnosti (utvrđivanje potencijalno mogućih oblika sloma za položaj kosine i orijentacija diskontinuiteta)





## Preliminarne analize

- Klasifikacijska metoda SMR (Slope Mass Rating) za procjenu općeg stanja stabilnosti stijenske mase na kosini (Romana, 1985)

$$SMR = RMR_{osnovni} - (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Kategorija	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	80 - 100
Opis stijenske mase	Vrlo loša	Loša	Povoljna	Dobra	Vrlo dobra
Stabilnost	Potpuno nestabilna	Nestabilna	Djelomično stabilna	Stabilna	Potpuno stabilna
Oblik sloma	Veliki ravninski ili zakrivljeni slični tlima	Ravninski slom ili veliki klinovi	Ravninski duž samo nekih diskontinuiteta ili više klinova	Poneki blokovski slom	Nema sloma
Vjerojatnost sloma	0,9	0,6	0,4	0,2	0

## Preliminarne analize

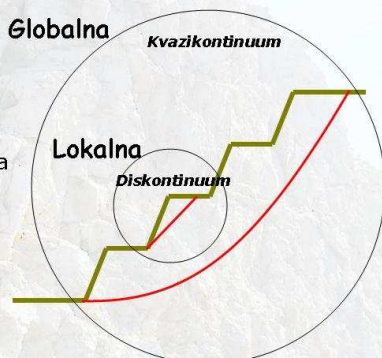
- Korekcijski faktori za SMR metodu analize stabilnosti

Tip loma	Uvjet	Vrlo povoljan	Povoljan	Dobar	Nepovoljan	Vrlo nepovoljan
P	$ \alpha_r - \alpha_s $	$> 30^\circ$	30 - 20°	20 - 10°	10 - 5°	$< 5^\circ$
W	$ \alpha_r - \alpha_s $	$> 30^\circ$	30 - 20°	20 - 10°	10 - 5°	$< 5^\circ$
T	$ \alpha_r - \alpha_s - 180^\circ $	$> 30^\circ$	30 - 20°	20 - 10°	10 - 5°	$< 5^\circ$
P/W/T	$F_1$	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	$ \beta_1 $	$< 20^\circ$	20 - 30°	30 - 35°	35 - 45°	$> 45^\circ$
W	$ \beta_1 $	$< 20^\circ$	20 - 30°	30 - 35°	35 - 45°	$> 45^\circ$
P/W	$F_2$	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	$F_2$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
P	$ \beta_r - \beta_s $	$> 10^\circ$	10 - 0°	0°	0 - (-10°)	$< -10^\circ$
W	$ \beta_r - \beta_s $	$> 10^\circ$	10 - 0°	0°	0 - (-10°)	$< -10^\circ$
T	$ \beta_r + \beta_s $	$< 110^\circ$	110 - 120°	$> 120^\circ$	--	--
P/W/T	$F_3$	0	6	25	50	60

NAPOMENA: P – ravninski slom, W – klinasti slom, T – prevrtanje blokova,  $\alpha_s$  – pružanje kosine,  $\alpha_r$  – pružanje diskontinuiteta,  $\alpha_t$  – azimut presječne,  $\beta_s$  – nagib kosine,  $\beta_1$  – nagib diskontinuiteta,  $\beta_r$  – nagib presječne

## Razine analiza stabilnosti

- Za prosječne vrijednosti značajki stijenske mase i geometrije kosina:
  - GSI 35 ÷ 75
  - Jv 30 ÷ 0,3
  - prosječno stanje površina diskontinuiteta



## Metode proračuna i računalni programi

- Metode granične ravnoteže
  - **Mehanika kontinuuma**
    - SLOPE (GEO-SLOPE) – metode opće granične ravnoteže
    - SLIDE (Rocscience) – metode opće granične ravnoteže
  - **Mehanika diskontinuuma**
    - ROCPANE (Rocscience) – ravninski slom
    - SWEDGE (Rocscience) – klinasti slom
    - KBSLOPE (PanTechnica) – opće blokovski slom
    - EZSLIDE (University of Manitoba) – ravninski i klinasti slom
- Numeričke metode
  - **Mehanika kontinuuma**
    - FLAC, FLAC/Slope (Itasca) – metoda konačnih diferencija
  - **Mehanika diskontinuuma**
    - UDEC (Itasca) – metoda diskretnih elemenata
    - DDA – Discontinuous Deformation Analysis (UC-Berkeley)

## Ravninski slom

- Geometrijski uvjeti za ravninski slom
  - pružanje klizne plohe (plohe sloma) mora biti približno paralelno ( $\pm 20^\circ$ ) pružanju kosine i mora isklinjavati na čelu kosine
  - nagib klizne plohe mora biti manji od nagiba kosine a veći od kuta unutarnjeg trenja na toj plohi
  - bočne granice kosine moraju biti slobodne površine sa zanemarivim otporom klizanju
- Metoda granične ravnoteže prema kojoj se dobiva konzervativan faktor sigurnosti obzirom na geometrijske uvjete koji u stvarnosti rijetko bivaju upotpunosti zadovoljeni
- Metoda prvotno razvijena od Hoeka i Braya 1977.

## Ravninski slom

- Osnovne značajke metode za ravninski slom
  - Metoda razvijena za ravninski slom kosine bez vlačne pukotine i s vlačnom pukotinom na etažnoj ravnini koja mora imati pružanje približno paralelno pružanju kosine
  - Mogućnost proračuna za različita djelovanja vode na kosini
  - Djelovanje vanjskih statičkih i seizmičkih sila
  - Mogućnost primjene aktivnih i pasivnih sidara
  - Primjena linearnog Mohr-Coulombovog ili nelinearnog Bartonovog kriterija čvrstoće

## Ravninski slom

- Geometrija kosine bez vlačne pukotine

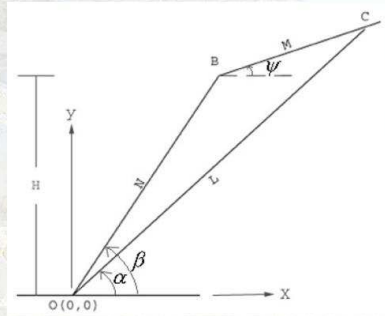
$$N = \frac{H}{\sin \beta}$$

$$B = \{N \cos \beta, H\}$$

$$L = \frac{H(1 - \cot \beta \cdot \tan \psi)}{\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \tan \psi}$$

$$M = \frac{L \cos \alpha - H \cot \beta}{\sin \psi}$$

$$C = \{L \cos \alpha, L \sin \alpha\}$$



## Ravninski slom

- Površina nestabilnog bloka

$$A = \frac{1}{2} \|B_x C_y - B_y C_x\|$$

- Težina bloka

$$W = A \cdot \gamma$$

- Djelovanje vode na kosini

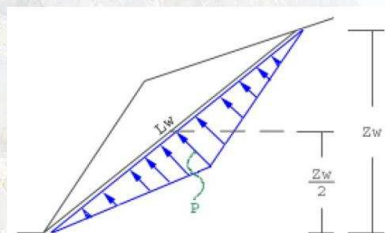
- Slučaj najvećeg tlaka vode u središnjem dijelu
- Slučaj najvećeg tlaka vode u nožišnom dijelu kosine

## Ravninski slom

- Slučaj najvećeg tlaka vode u središnjem dijelu

$$P = \frac{1}{2} Z_w \cdot \gamma_w$$

$$U = \frac{Z_w^2 \cdot \gamma_w}{4 \sin \alpha}$$



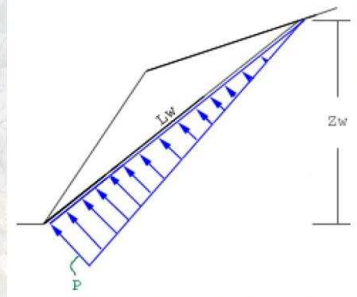


## Ravninski slom

- Slučaj najvećeg tlaka vode u nožišnom dijelu kosine

$$P = Z_w \cdot \gamma_w$$

$$U = \frac{Z_w^2 \cdot \gamma_w}{2 \sin \alpha}$$



## Ravninski slom

- Geometrija kosine s vlačnom pukotinom

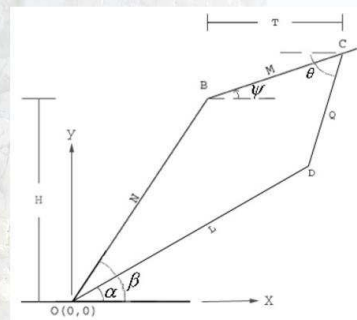
$$N = \frac{H}{\sin \beta}$$

$$M = \frac{T}{\cos \psi}$$

$$B = \{N \cos \beta, H\}$$

$$C = B + \{T, T \tan \psi\}$$

$$Q = \frac{C_y \cot \alpha - C_x}{\sin \theta \cdot \cot \alpha - \cos \theta}$$



## Ravninski slom

- Duljina klizne plohe

$$L = \frac{C_x - Q \cos \theta}{\cos \alpha}$$

- Površina nestabilnog bloka

$$A = \frac{1}{2} \|B_x D_y - B_y D_x\| + \frac{1}{2} \|(D_x - B_x)(C_y - B_y) - (D_y - B_y)(C_x - B_x)\|$$

- Težina bloka

$$W = A \cdot \gamma$$

- Djelovanje vode na kosini

- Slučaj najvećeg tlaka vode u središnjem dijelu
- Slučaj najvećeg tlaka vode u nožišnom dijelu kosine



## Ravninski slom

- Slučaj najvećeg tlaka vode u središnjem dijelu

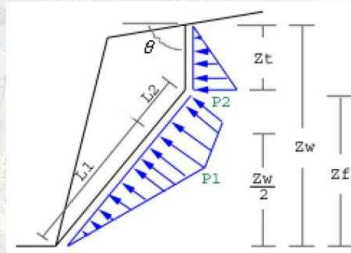
$$P_1 = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot Z_w$$

$$P_2 = \gamma_w \cdot Z_t$$

$$L_1 = \frac{Z_w}{2 \sin \alpha} \quad L_2 = L - L_1$$

$$U = \frac{1}{2} P_1 \cdot L_1 + \frac{1}{2} (P_1 + P_2) L_2$$

$$V = \frac{Z_t^2 \cdot \gamma_w}{2 \sin \theta}$$



## Ravninski slom

- Slučaj najvećeg tlaka vode u nožišnom dijelu kosine

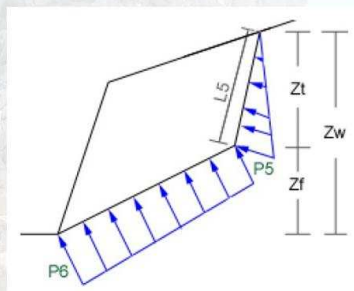
$$P_5 = \gamma_w \cdot Z_t$$

$$P_6 = \gamma_w \cdot Z_w$$

$$L_5 = \frac{Z_t}{\sin \theta}$$

$$U = \frac{1}{2} (P_5 + P_6) L$$

$$V = \frac{1}{2} P_5 \cdot L_5$$



## Ravninski slom

- Djelovanje vanjske sile na kosini

$$E_x = E \cdot \cos \delta$$

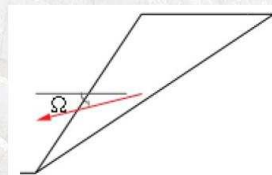
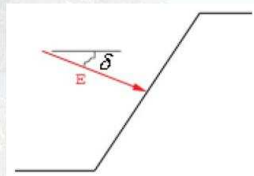
$$E_y = -E \cdot \sin \delta$$

- Djelovanje seizmičke sile na kosini

$$S = W_y \cdot \alpha_s = -W \cdot \alpha_s$$

$$S_x = S \cdot \cos \Omega$$

$$S_y = S \cdot \sin \Omega$$



## Ravninski slom

- Djelovanje sile aktivnog sidra na kosini

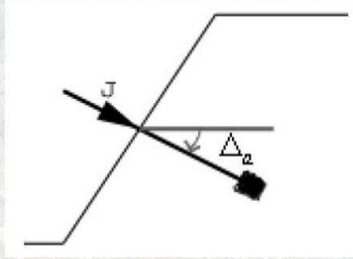
$$J_x = J \cdot \cos \Delta_a$$

$$J_y = -J \cdot \sin \Delta_a$$

- Djelovanje sile pasivnog sidra na kosini

$$K_x = K \cdot \cos \Delta_p$$

$$K_y = -K \cdot \sin \Delta_p$$



## Ravninski slom

- Djelovanje sume svih sila na kosini

$$F_x = E_x + S_x + J_x + V_x$$

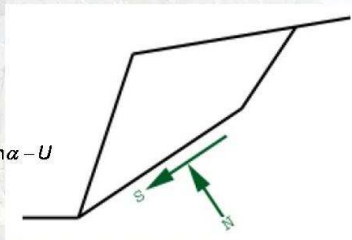
$$F_y = W_y + E_y + S_y + J_y + V_y$$

$$F_x = \sum F_{x+} \rightarrow \quad F_y = \sum F_{y+} \uparrow$$

- Normalna i posmična sila na kosini

$$N = -(F_y + K_y) \cos \alpha + (F_x + K_x) \sin \alpha - U$$

$$S = -F_y \cdot \sin \alpha - F_x \cdot \cos \alpha$$



## Ravninski slom

- Posmična čvrstoća

- Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće

$$\tau = c \cdot L + N \cdot \tan \varphi + K_x \cos \alpha + K_y \sin \alpha$$

- Barton-Bandisov kriterij čvrstoće

$$\tau = N \cdot \tan \left[ \varphi_0 + JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{N/L} \right) \right] + K_x \cos \alpha + K_y \sin \alpha$$

- Faktor sigurnosti

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

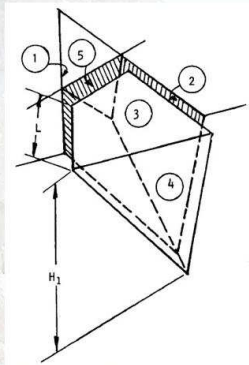


## Klinasti slom

- Geometrijski uvjeti za klinasti slom
  - Presječna (pravac koji predstavlja presjek između dviju ravnina koje formiraju nestabilni klin) mora isklinjavati na čelu kosine
  - nagib presječne mora biti manji od nagiba kosine a veći od kuta unutarnjeg trenja na plohama diskontinuiteta
- Metoda granične ravnoteže prema kojoj se dobiva faktor sigurnosti za pojednostavljeni trodimenzionalni oblik nestabilnog klina
- Pojednostavljena (modificirana) metoda za klinasti slom prvotno razvijena od Hoeka i Braya 1977.

## Klinasti slom

- Geometrija klina
  - 1 - ravnina diskontinuiteta A
  - 2 - ravnina diskontinuiteta B
  - 3 - etažna ravnina
  - 4 - kosina



## Klinasti slom

- Faktor sigurnosti prema modificiranoj metodi

$$F = \frac{3}{\gamma H} \cdot (c_A X + c_B Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} X\right) \tan \varphi_A + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} Y\right) \tan \varphi_B$$

$\gamma$  - jedinična težina stijenskog materijala

$\gamma_w$  - jedinična težina vode

$c_A, c_B$  - vrijednosti kohezija na kliznim plohama A i B

$\varphi_A, \varphi_B$  - vrijednosti kuta unutarnjeg trenja na kliznim plohama

$H$  - moguća visina stijenskog klina

$X, Y, A, B$  - su bezdimenzionalni faktori

## Klinasti slom

- Bezdimezionalni faktori

$$X = \frac{\sin \theta_{2-4}}{\sin \theta_{4-5} \cos \theta_{2-na}} \quad Y = \frac{\sin \theta_{1-3}}{\sin \theta_{3-5} \cos \theta_{1-nb}}$$

$$A = \frac{\cos \psi_a - \cos \psi_b \cos \theta_{na-nb}}{\sin \psi_5 \sin^2 \theta_{na-nb}} \quad B = \frac{\cos \psi_b - \cos \psi_a \cos \theta_{na-nb}}{\sin \psi_5 \sin^2 \theta_{na-nb}}$$

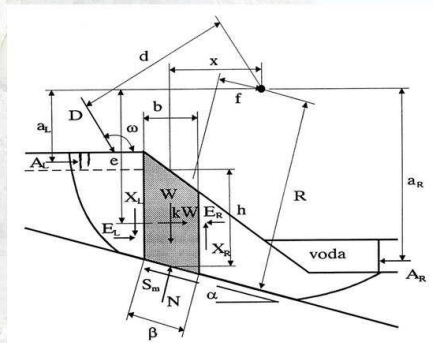
- Kutovi  $\theta_{2-4}$ ,  $\theta_{4-5}$ ,  $\theta_{1-3}$  i  $\theta_{3-5}$  predstavljaju kutove između pojedinih bridova klina, a dobivaju se kao i kut između polova normale na plohe klizanja  $\theta_{na-nb}$  iz stereografske projekcije. Na taj se način, također, određuje i kut  $\theta_{1-nb}$  koji predstavlja kut između pola normale ravnine B na brid 1 i kut  $\theta_{2-na}$  koji predstavlja kut između pola normale ravnine A i brida 2. Kutovi  $\psi_a$  i  $\psi_b$  su kutovi pada ravnina, a kut  $\psi_5$  je nagib presječne.

## Opći (zakrivljeni) oblik sloma

- Javlja se u uvjetima (odnos razlomljenosti i geometrijskih veličina kosine) kad se stijenska masa ponaša kao kvazikontinuirana geotehnička sredina prilikom čega se slom odvija po zakrivljenoj kliznoj plohi kroz stijensku masu
- Metode granične ravnoteže uz podjelu klizne mase na vertikalne lamele (Janbu, Bishop, Spencer, Morgenstern-Price i dr.)
- Metoda granične ravnoteže uz podjelu klizne mase na lamele proizvoljnog oblika (Sarua)
- Numeričke metode (metode konačnih elemenata i metoda konačnih diferencija) uz primjenu postupka redukcije veličina posmične čvrstoće

## Metode granične ravnoteže za opći oblik sloma

- Definicije veličina za opći oblik sloma





## Metode granične ravnoteže za opći oblik sloma

- Osnovna pretpostavka o vrijednosti mobilizirane posmične sile i faktoru sigurnosti duž cijele klizne plohe

$$S_m = \frac{\beta[c' + (\sigma_n - u)\tan\varphi']}{F}$$

- Faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata

$$F_m = \frac{\sum [c'\beta + (N - u\beta)\tan\varphi']R}{\sum Wx - \sum Nf + \sum kW_e \pm [Dd] \pm Aa}$$

- Faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže sila

$$F_s = \frac{\sum [c'\beta + (N - u\beta)\tan\varphi']\cos\alpha}{\sum N\sin\alpha + \sum kW - [D\cos\omega] \pm A}$$

## Metode granične ravnoteže za opći oblik sloma

- Rješenje za vrijednost normalne sile na bazi lamele bez djelovanja međulamelarnih posmičnih sila (Bishop, Janbu)

$$N = \frac{W - \left( \frac{c'\beta - u\beta\tan\varphi'}{F} \right) \sin\alpha + D\sin\omega}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha \cdot \tan\varphi'}{F}}$$

- Rješenje za vrijednost normalne sile na bazi lamele uz djelovanje međulamelarnih posmičnih sila

$$N = \frac{W + (X_L - X_R) - \left( \frac{c'\beta - u\beta\tan\varphi'}{F} \right) \sin\alpha + D\sin\omega}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha \cdot \tan\varphi'}{F}}$$

## Metode granične ravnoteže za opći oblik sloma

- Rješenje za vrijednosti međulamelarnih normalnih sila

$$E_R = E_L - \frac{(c'\beta - u\beta\tan\varphi')}{F} \cos\alpha + N \left( \sin\alpha - \frac{\tan\varphi' \cos\alpha}{F} \right) + kW - [D\cos\omega]$$

- Rješenje za vrijednost međulamelarnih posmičnih sila

$$X = E \cdot \lambda \cdot f(x)$$

- Primjena različitih postupaka traženja kritične klizne plohe s najmanjom vrijednošću faktora sigurnosti (faktor sigurnosti kosine)

## Metode stabilizacije i zaštite kosina

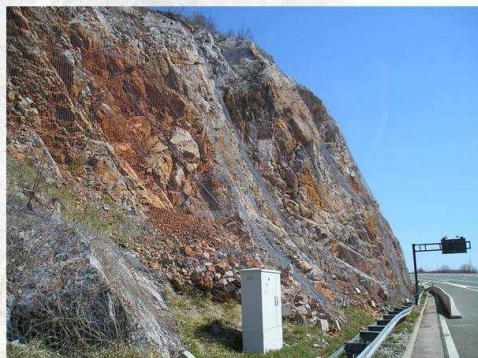
- Promjenom položaja i geometrijskih karakteristika
  - Orijehtacija
  - Visina i nagib etažnih kosina
  - Širina etažnih ravnina
- Primjenom različitih potpornih konstrukcija, elemenata podgradnog sustava i ojačanja stijenske mase
  - Uobičajne (jednostavne, tipske) sistematske mjere
  - Složenije mjere
- Dreniranjem kosina

## Uobičajne (tipske) sistematske mjere stabilizacije i zaštite kosina

- Mjere zaštite kosina
  - Čeličnim mrežama s utezima
  - Mlaznim betonom
  - MAT ili MACMAT mrežama
- Mjere stabilizacije i zaštite kosina
  - Štapnim sidrima
  - Sklopom čeličnih mreža, štapnih sidara i čeličnih užadi
  - Sklopom armaturnih mreža, štapnih sidara i mlaznog betona

## Primjer zaštite kosine čeličnim mrežama s utezima

- Zaštita kosine pri obrušavanju kamena





## Primjer zaštite kosine mlaznim betonom

- Zaštita kosine od površinskog raspadanja stijene



## Primjer zaštite kosine MAT ili MACMAT mrežama

- Zaštita kosine od površinske erozije stijene



## Primjer stabilizacije i zaštite kosine sklopom mreža, štapnih sidara i čeličnih užadi

- Stabilizacija labilnih blokova na kosini i zaštita uslijed obrušavanja kamena



## Složene mjere stabilizacije i zaštite kosina

- ❑ Kombinacija uobičajnih tipskih rješenja
- ❑ Različite potporne konstrukcije
- ❑ Kombinacija potpornih konstrukcija i uobičajnih tipskih rješenja
- ❑ Ostalim metodama ojačanja stijenske mase

## Primjer stabilizacije i zaštite kosine različitim potpornim konstrukcijama

- ❑ Stabilizacija i zaštita kosine u nestabilnoj stijenskoj masi



## Primjer stabilizacije i zaštite kombinacijom potporne konstrukcije i tipskog rješenja

- ❑ Stabilizacija i zaštita nestabilnih dijelova stijenske mase na kosini

