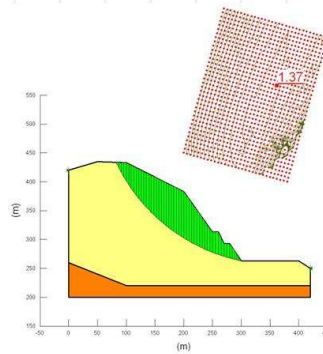


4. Analiza stabilnosti kosina

- Uvod u metode proračuna
- Teorijske osnove metoda proračuna
- Postavljanje modela i zadavanje ulaznih veličina
- Vrste proračuna
- Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna



Uvod u metode proračuna

- Svrha proračuna
 - Faktor sigurnosti (stabilnosti) kosine
 - Položaj i oblik potencijalne klizne plohe
 - Geometrija stabilne kosine ili konstrukcijske veličine elemenata za ustabiljenje kosine
- Metode proračuna
 - Metode mehanike kontinuuma
 - Metode opće granične ravnoteže (statičke)
 - Metoda konačnih elemenata (dinamička)
 - Metoda konačnih diferencija (dinamička)
 - Mehanika diskontinuuma
 - Metode granične ravnoteže za određeni tip sloma (statičke)
 - Metode diskretnih elemenata (dinamičke)

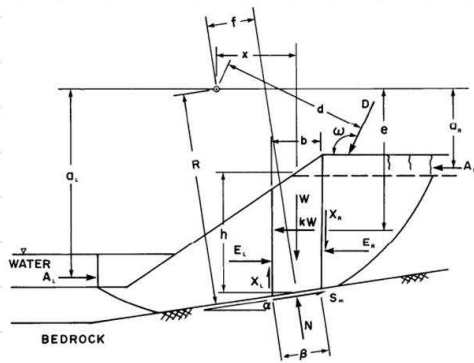
Uvod u metode proračuna

- Računalni programi
 - SLOPE/W (GEO-SLOPE International, Ltd., Canada)
 - FLAC/Slope (Itasca Consulting Group, Inc. USA)
 - SLIDE (Rocscience, Inc., Canada)

Teorijske osnove metoda proračuna

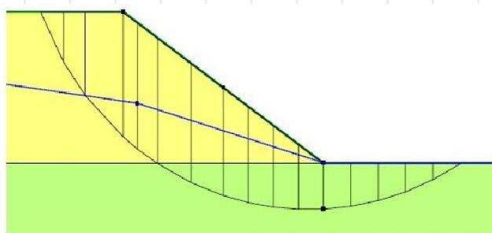
- Postupak proračuna metodama granične ravnoteže
 - Definiranje modela klizne mase
 - Diskretizacija modela klizne mase na lamele
 - Proračun djelujućih sila i opterećenja
 - Proračun faktora sigurnosti i postupak nalaženja kritične klizne plohe
- Metode proračuna faktora sigurnosti
 - Metoda Felleniusa
 - Pojednostavljene metode Bishopa i Janbua
 - Metoda Morgenstern-Pricea
 - Metoda Spencera
 - MKE metoda

Definiranje modela klizne mase



Diskretizacija modela klizne mase na lamele

- Podjela klizne mase na određeni broj vertikalnih lamela temeljem zadane prosječne širine lamele i geometrijskih uvjeta



Proračun djelujućih sila i opterećenja

- Proračun težina lamela

$$W = \sum_{j=1}^m \gamma_j h_j \beta \cos \alpha$$

- Proračun djelovanja sila od vanjskih opterećenja
 - Djelovanje koncentriranog ili kontinuiranog vanjskog opterećenja
 - Seizmičko opterećenje

$$F_h = k_p W$$

- Proračun normalnih i posmičnih sila na bazama lamela te međulamelarnih normalnih i posmičnih sila ovisi o odabranoj metodi proračuna

Proračun faktora sigurnosti i postupak nalaženja kritične klizne plohe

- Osnovna pretpostavka iterativnih metoda je da faktor sigurnosti ima jednaku vrijednost duž cijele klizne plohe na temelju čega se uvodi mobilizirana posmična sila

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

- Proračun faktora sigurnosti izvodi se na temelju uvjeta ravnoteže sila i/ili ravnoteže momenata ovisno o odabranoj metodi proračuna
- Postupak nalaženja kritične klizne plohe sastoji se od definiranja modela klizne mase koji ovisi o načinu zadavanja potencijalno mogućih kliznih ploha po obliku i njihovom položaju te nalaženja kritične klizne plohe za koju je dobivena najmanja vrijednost faktora sigurnosti

Metoda Felleniusa (Fellenius, 1936)

- Prva objavljena metoda koja uvodi koncepciju diskretizacije modela klizne mase na vertikalne lamele za koje se računaju djelujuće sile
- Rješenje za vrijednost normalnih sila na bazama lamela

$$N = W \cos \alpha - kW \sin \alpha + [D \cos(\omega + \alpha - 90)]$$

- Rješenje za faktor sigurnosti

$$FS = \frac{\sum [c' \beta + N \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha + \sum kW \cos \alpha - [D \cos(\omega + \alpha)]}$$

Pojednostavljena metoda Bishopa (Bishop, 1950)

- Uvodeći vrijednost mobilizirane posmične sile postavlja se iterativni postupak proračuna i računanje s međulamelarnim normalnim silama
- Rješenje za vrijednost normalnih sila na bazama lamela

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

- Rješenje za faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata

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

Pojednostavljena metoda Janbua (Janbu, 1954)

- Uvodeći vrijednost mobilizirane posmične sile postavlja se iterativni postupak proračuna i računanje s međulamelarnim normalnim silama
- Rješenje za vrijednost normalnih sila na bazama lamela

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

- Rješenje za faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata

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

Metoda Morgenstern-Pricea i metoda Spencera (Morgenstern & Price, 1965; Spencer, 1967)

- Uvode se međulamelarne posmične sile koje se računaju preko međulamelarnih normalnih sila i funkcije ovisnosti

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

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

- Rješenje za vrijednost normalnih sila na bazama lamela

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

- Konačna vrijednost faktora sigurnosti dobiva se na temelju koeficijenta λ za koji se postižu jednake vrijednosti faktora sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata FS_m i uvjeta ravnoteže sila FS_f

MKE metoda (GEO-SLOPE)

- ❑ Proračun punog stanja naprezanja metodom konačnih elemenata pomoću programa SIGMA/W
- ❑ Izračun vrijednosti normalnih i posmičnih naprezanja (σ_n, σ_s) za središta baza lamela duž klizne plohe na temelju vrijednosti punog stanja naprezanja ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$)
- ❑ Izračun vrijednosti raspoloživih posmičnih čvrstoća materijala te sila posmičnih otpora duž klizne plohe
- ❑ Izračun vrijednosti globalnog faktora stabilnosti FS na temelju sume raspoloživih otpora S_r i sume mobiliziranih posmičnih sila S_m

$$FS = \frac{\sum S_r}{\sum S_m}$$

Rješavanje sustava metodom opće granične ravnoteže

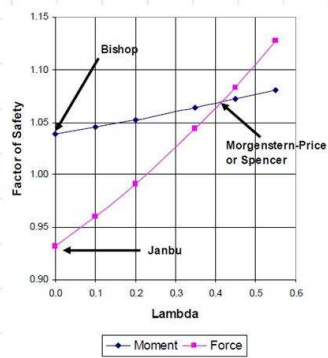
- ❑ Fredlund 1977. godine objavljuje metodu opće granične ravnoteže (GLE, General Limit Equilibrium), (Fredlund and Krahn, 1977; Fredlund et al., 1981) kojom se mogu dobiti rješenja svih prikazanih metoda na temelju uvođenja mogućnosti izbora različitih funkcija ovisnosti međulamelarnih posmičnih sila kao i vrijednosti λ
- ❑ Proračun faktora sigurnosti odvija se u nekoliko koraka koji su implementirani u programu SLOPE/W kao i u nekim drugim računalnim programima
- ❑ 1. korak - izračun faktora sigurnosti provodi se na temelju uvjeta ravnoteže momenata, pri čemu se vrijednosti za normalne sile na bazama lamela računaju prema rješenju Felleniusa što predstavlja početnu ili aproksimativnu vrijednost za slijedeće korake proračuna

Rješavanje sustava metodom opće granične ravnoteže

- ❑ 2. korak - izračun faktora sigurnosti provodi se na temelju uvjeta ravnoteže momenata i ravnoteže sila pri čemu se vrijednosti za normalne sile na bazama lamela računaju prema rješeljima pojednostavljene metode Bishopa i Janbua
- ❑ 3. korak - prvo se računaju vrijednosti međulamelarnih normalnih sila, zatim međulamelarnih posmičnih sila, a onda vrijednosti normalnih sila na bazama lamela te faktori sigurnosti. Izračun faktora sigurnosti se ponavlja za različite vrijednosti λ
- ❑ 4. korak - nalazi se vrijednost λ za koju se dobivaju iste vrijednosti faktora sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata i ravnoteže sila

Rješavanje sustava metodom opće granične ravnoteže

- Nalaženje konačnog faktora sigurnosti

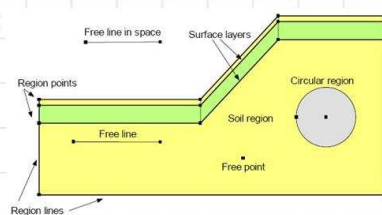


Postavljanje modela i zadavanje ulaznih veličina

- Postavljanje geometrije modela
- Odabir kriterija čvrstoće i zadavanje pripadnih značajki materijala
- Zadavanje posebnih konstrukcija
- Djelovanje dodatnih opterećenja
- Zadavanje kliznih ploha

Postavljanje modela

- Postavljanje geometrije modela
 - Zadavanje točaka
 - Kreiranje poligona
 - Kreiranje slobodnih linija i točaka

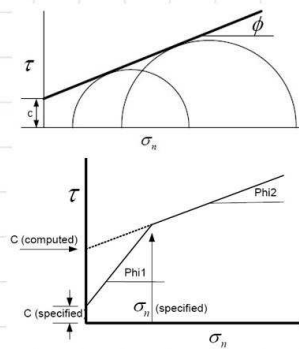


Kriteriji čvrstoće materijala

- Null model
- Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće
 - Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće
 - Bilinearan Mohr-coulombov kriterij čvrstoće
 - Kriterij čvrstoće u nedreniranim uvjetima
- Kriteriji anizotropne čvrstoće
 - Anizotropna čvrstoća
 - Korekcija parametara čvrstoće preko funkcije faktora anizotropije
- Nelinearni kriteriji čvrstoće
 - Kriterij čvrstoće zadan u numeričkom obliku
 - Hoek-Brownov kriterij čvrstoće

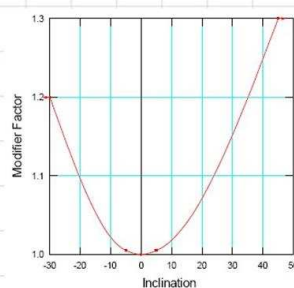
Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće

- Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće
 - Kohezija c
 - Kut unutarnjeg trenja φ
- Bilinearan Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće
 - Kohezija c
 - Kut unutarnjeg trenja φ_1
 - Kut unutarnjeg trenja φ_2
 - Normalno naprezanje σ_n
- Kriterij čvrstoće u nedreniranim uvjetima
 - Kohezija c



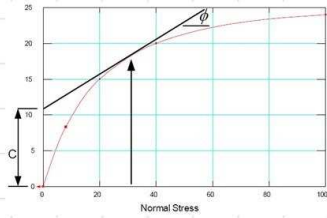
Kriteriji anizotropne čvrstoće

- Anizotropna čvrstoća
 - Kohezije c_h i c_v
 - Kutovi unutarnjeg trenja φ_h i φ_v
$$X = X_h \cos^2 \alpha + X_v \sin^2 \alpha$$
- Korekcija parametara čvrstoće preko funkcije faktora anizotropije
 - Funkcija faktora anizotropije
 - Kohezija c
 - Kut unutarnjeg trenja φ



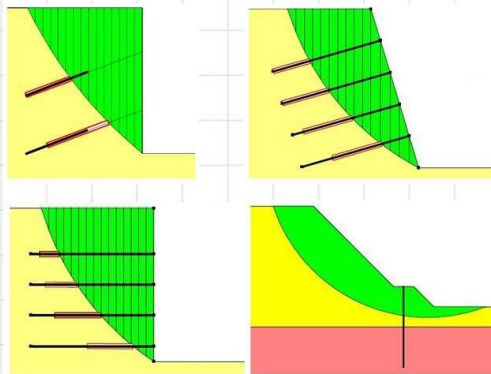
Nelinearni kriteriji čvrstoće

- Kriterij čvrstoće zadan u numeričkom obliku
 - Vrijednosti naprezanja (σ_n, τ)
- Hoek-Brownov kriterij čvrstoće
 - Jednoosna tlačna čvrstoća intaktnog materijala σ_{ci}
 - Konstanta intaktnog materijala m_i
 - Geološki indeks čvrstoće GSI
 - Faktor poremećenosti uslijed iskopa D



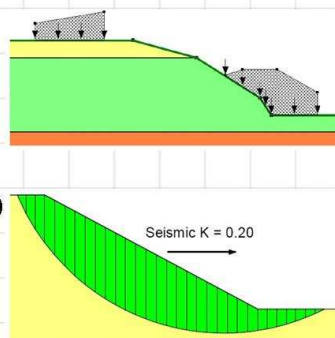
Zadavanje posebnih konstrukcija

- Sidra
- Čavli
- Geotekstil
- Piloti



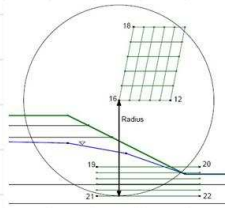
Djelovanje dodatnih opterećenja

- Koncentrirane sile
 - Mjesto (x, y)
 - Vrijednost sile D
 - Kut djelovanja ω
- Kontinuirana opterećenja
 - Mjesto djelovanja $\{A, B\}$
 - Vrijednost opterećenja
- Seizmička (pseudostatička) opterećenja
 - Seizmički koeficijent k

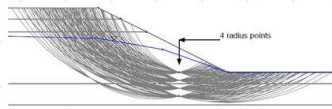


Zadavanje kliznih ploha

- Kružne klizne plohe
 - Središta zakrivljenosti
 - Područje tangenata

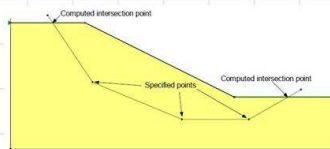
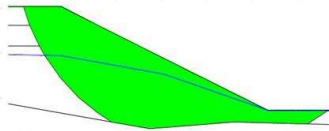


- Kružne klizne plohe
 - Središta zakrivljenosti
 - Točke polumjera ili točke ulaza i izlaza klizne plohe



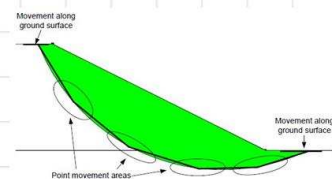
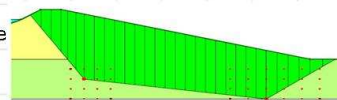
Zadavanje kliznih ploha

- Klizne plohe složenog oblika
 - Kružni dio kroz nestabilnu masu
 - Rubni dio po kontaktu uz krutu podlogu
- Klizne plohe proizvoljnog oblika
 - Proizvoljno zadan niz ravnih segmenata



Zadavanje kliznih ploha

- Blokofske klizne plohe
 - Mreže točaka za formiranje segmenata klizne plohe
 - Kutovi izlaza i ulaza
- Optimizacija kliznih ploha
 - Nalaženje kritične klizne plohe kružnog oblika
 - Primjena dinamičkog algoritma za formiranje optimalnog oblika



Vrste proračuna

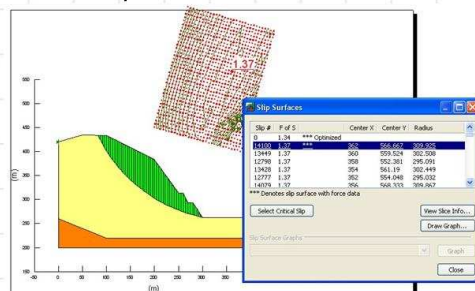
- ❑ Proračun faktora sigurnosti – proračun faktora na temelju rješenja metoda granične ravnoteže za izračun djelujućih sila na modelu
- ❑ Proračun faktora stabilnosti – proračun faktora na temelju rješenja metode konačnih elemenata za izračun punog stanja naprezanja i deformacija (MKE metoda, SIGMA/W)
- ❑ Povratna analiza – proračun vrijednosti drugih veličina za poznatu vrijednost faktora sigurnosti

Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- ❑ Pregled dobivenih vrijednosti faktora sigurnosti i oblika kliznih ploha
 - Provjera nalaženja kritične klizne plohe, odnosno minimalne vrijednosti faktora sigurnosti
 - Pregled i ocjena prihvatljivosti rješenja za oblik kritične klizne plohe
- ❑ Kreiranje grafičkih prikaza rješenja karakterističnih veličina
 - Grafički prikazi raspodjela (normalnih i posmičnih sila na bazama, posmične čvrstoće, međulamelarnih normalnih i posmičnih sila,...)
 - Vrijednosti i poligoni sila za lamele kritične klizne plohe
- ❑ Vrednovanje (ocjena) dobivenih rezultata proračuna u odnosu na teorijske postavke, modela kosine te opterećenja i značajke materijala

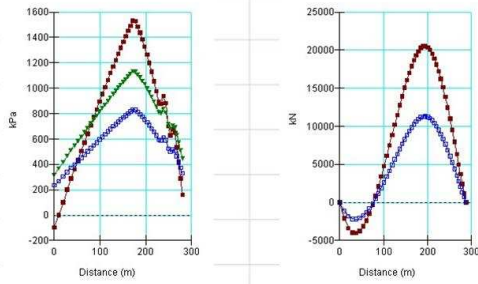
Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- ❑ Pregled dobivenih vrijednosti faktora sigurnosti i oblika kliznih ploha



Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- Dijagrami dobivenih vrijednosti za kritičnu kliznu plohu (normalne i posmične sile, posmična čvrstoća, ...)



Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- Dobivene vrijednosti i poligoni sile za lamele kritične klizne plohe

