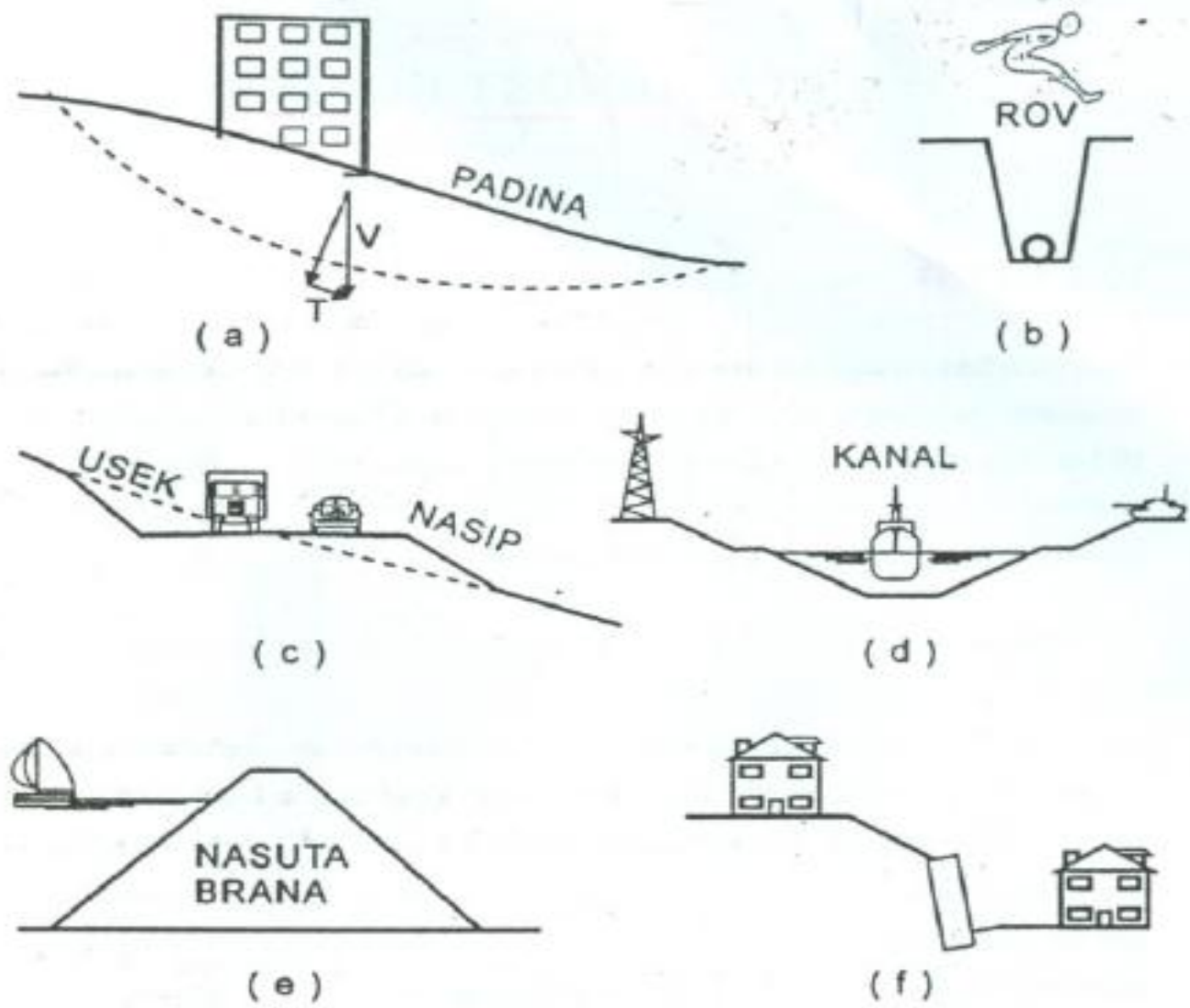


STABILNOST KOSINA

STABILNOST KOSINA

Uvod

Ako se duž potencijalne klizne površi pojave naponi smicanja koji su jednaki smičućoj čvrstoći, može doći do smičućeg loma tla i do velikih pomjeranja mase tla iznad klizne površi, odnosno do rušenja kosine.



Slika 10.1. Kosine, iskopi i nasipi



Panamski kanal, 1913. god. (13 miliona kubika kliznulo je pri iskopu bokova kanala)



Posledice klizanja u naseljenom mjestu



*Klizište izazvano
potresom
(Kalifornija)*





*Klizišta na usjecima
saobraćajnica*





Vajont(1963). Italija(300 miliona kubika kliznulo, talas visok 100m, usmrtio oko 2000 stanovnika, zbrisaogradić Langaronne





Veliko klizište na nasipu rudarske jalovine Aberfanu (Velika Britanija,1966.god.)

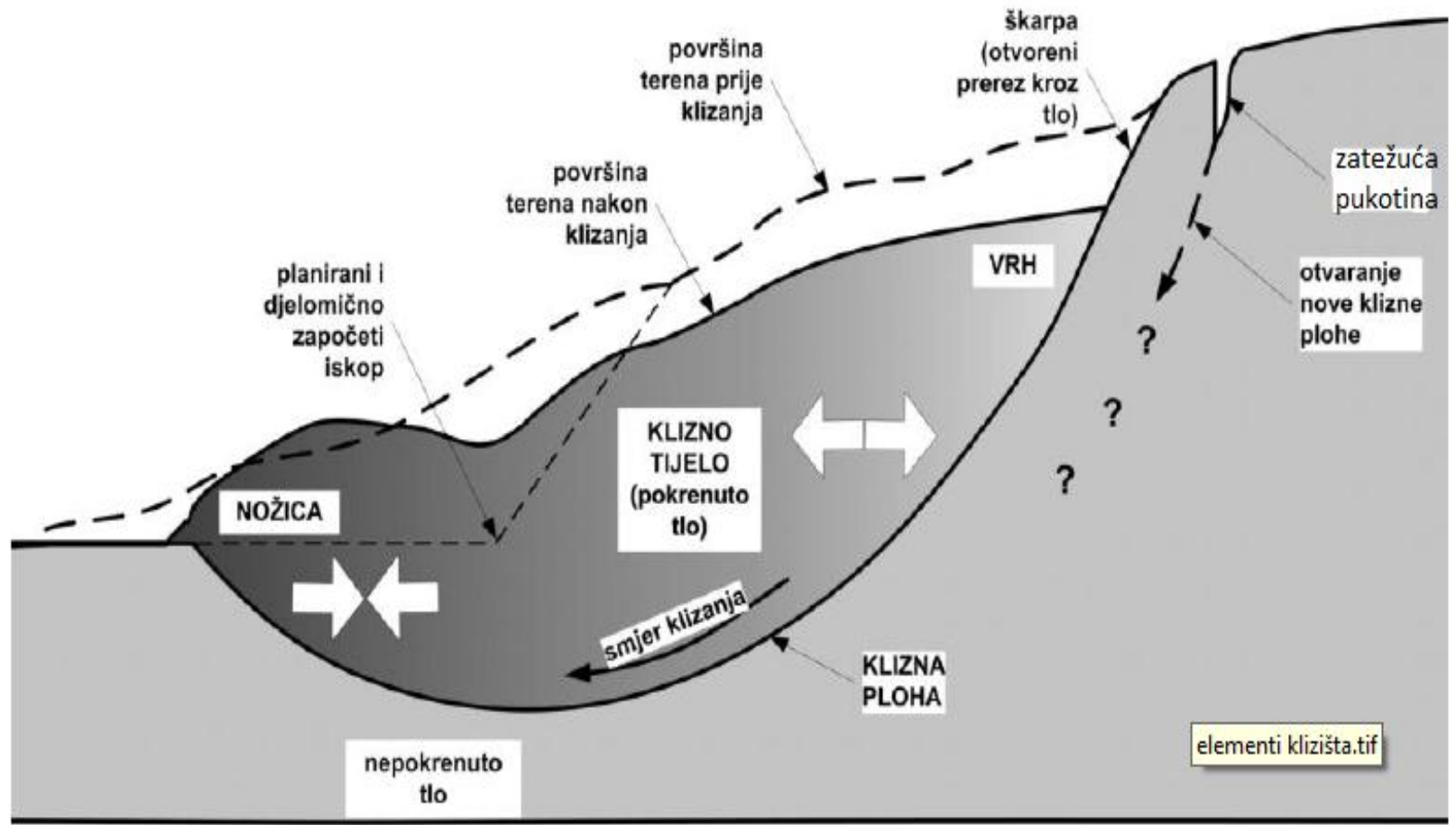








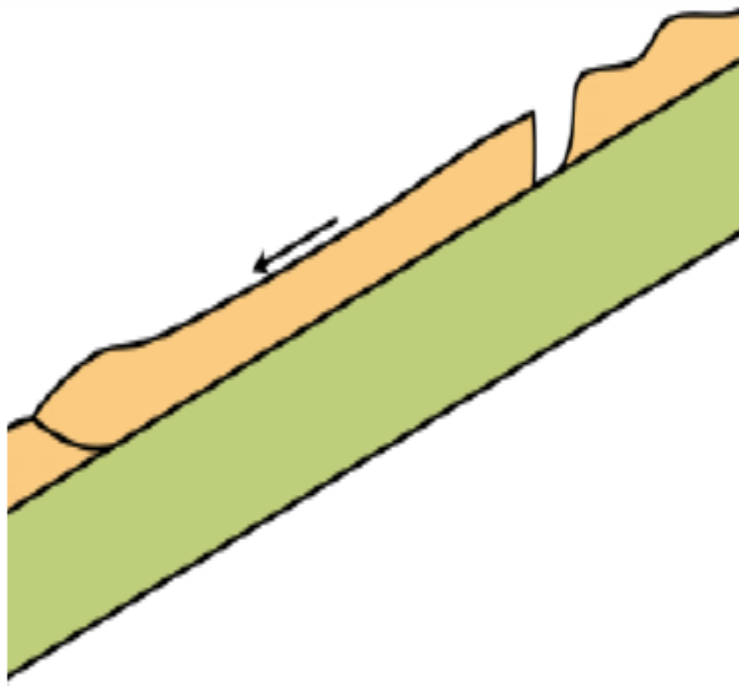
Klizno tijelo, klizna ploha, klizište i oblici klizanja



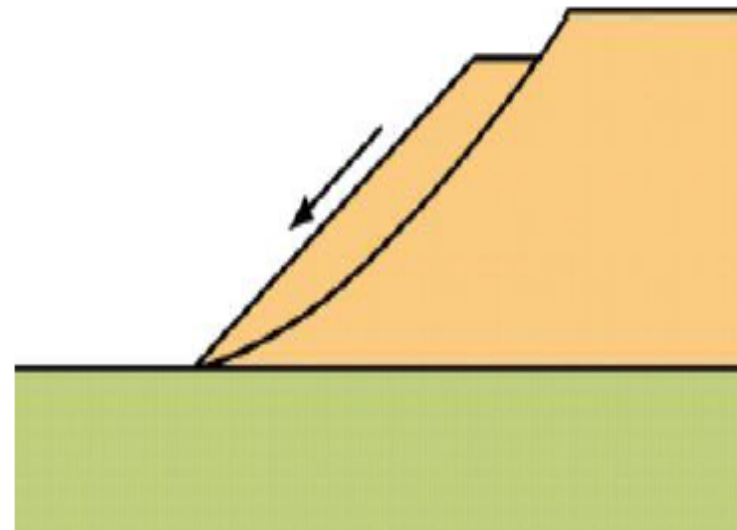
Primjeri različitih oblika klizanja kosina u tlu

Oblici klizanja, odnosno stanja kosina mogu se klasifikovati u nekoliko faza aktivnosti:

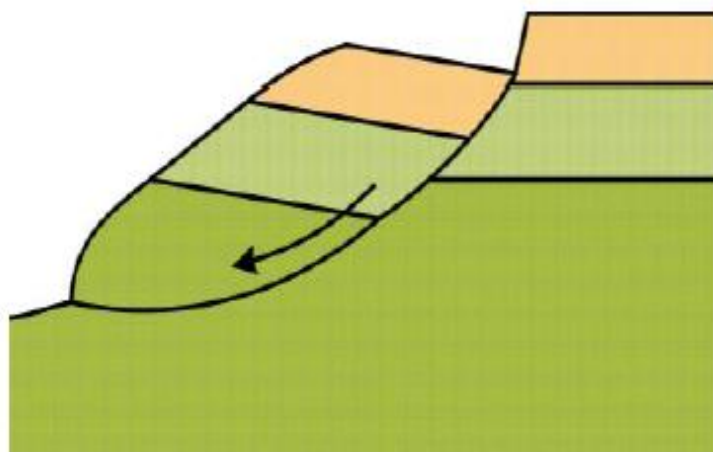
- Stabilna kosina
- Potencijalno nestabilna kosina
- Rana faza rušenja (5mm – 1,5m/god)
- Srednja faza rušenja (do 5 cm/dan)
- Djelimično ili totalno rušenje (nov privremeni položaj, dijela ili cijele mase tla)
- Potpuno rušenje (nov položaj, 1m/min za rot.kl.; Za planarne 20-60 km/čas)



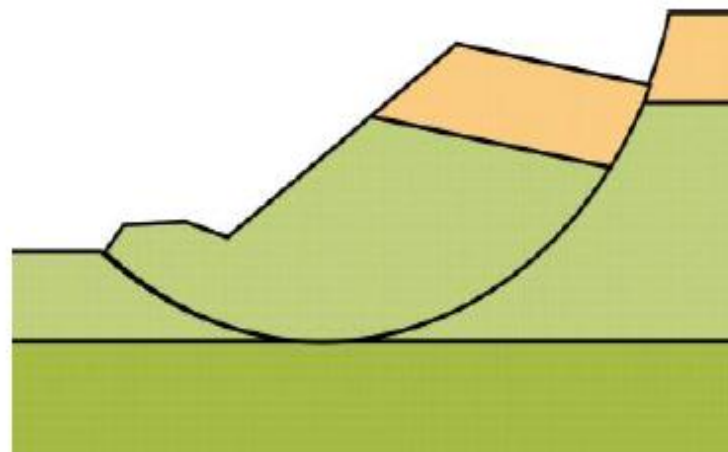
translacijsko klizanje



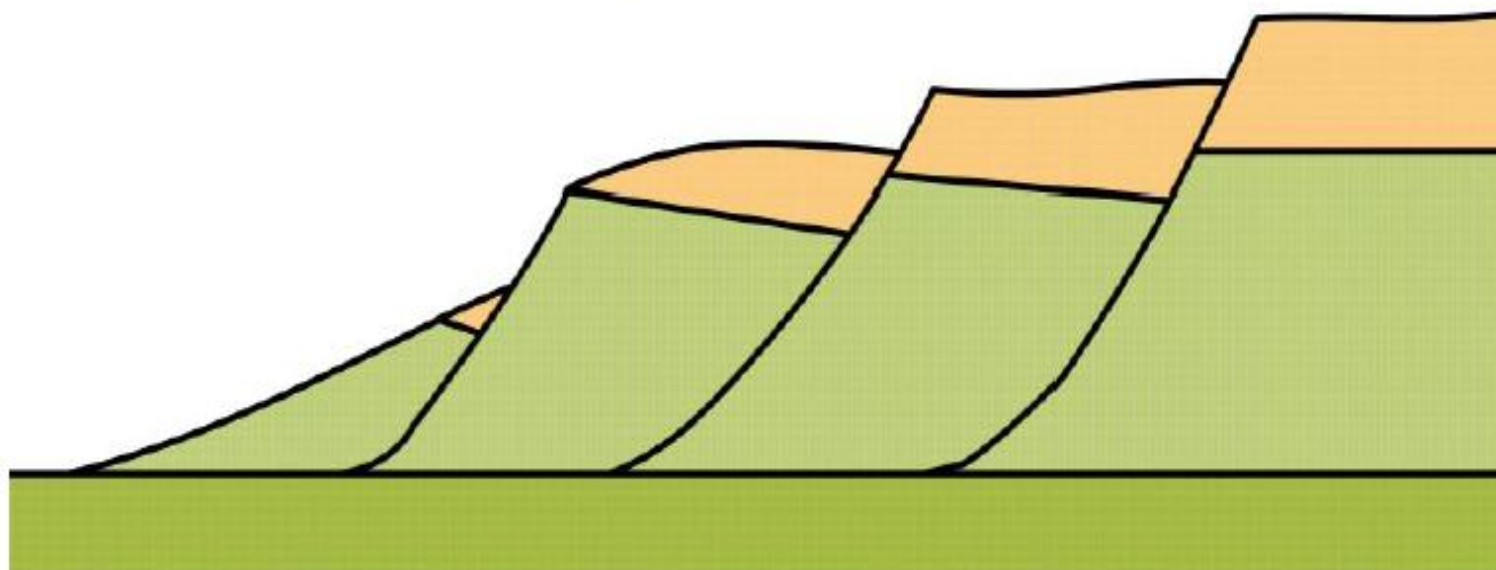
plitko rotacijsko klizanje



duboko rotacijsko klizanje



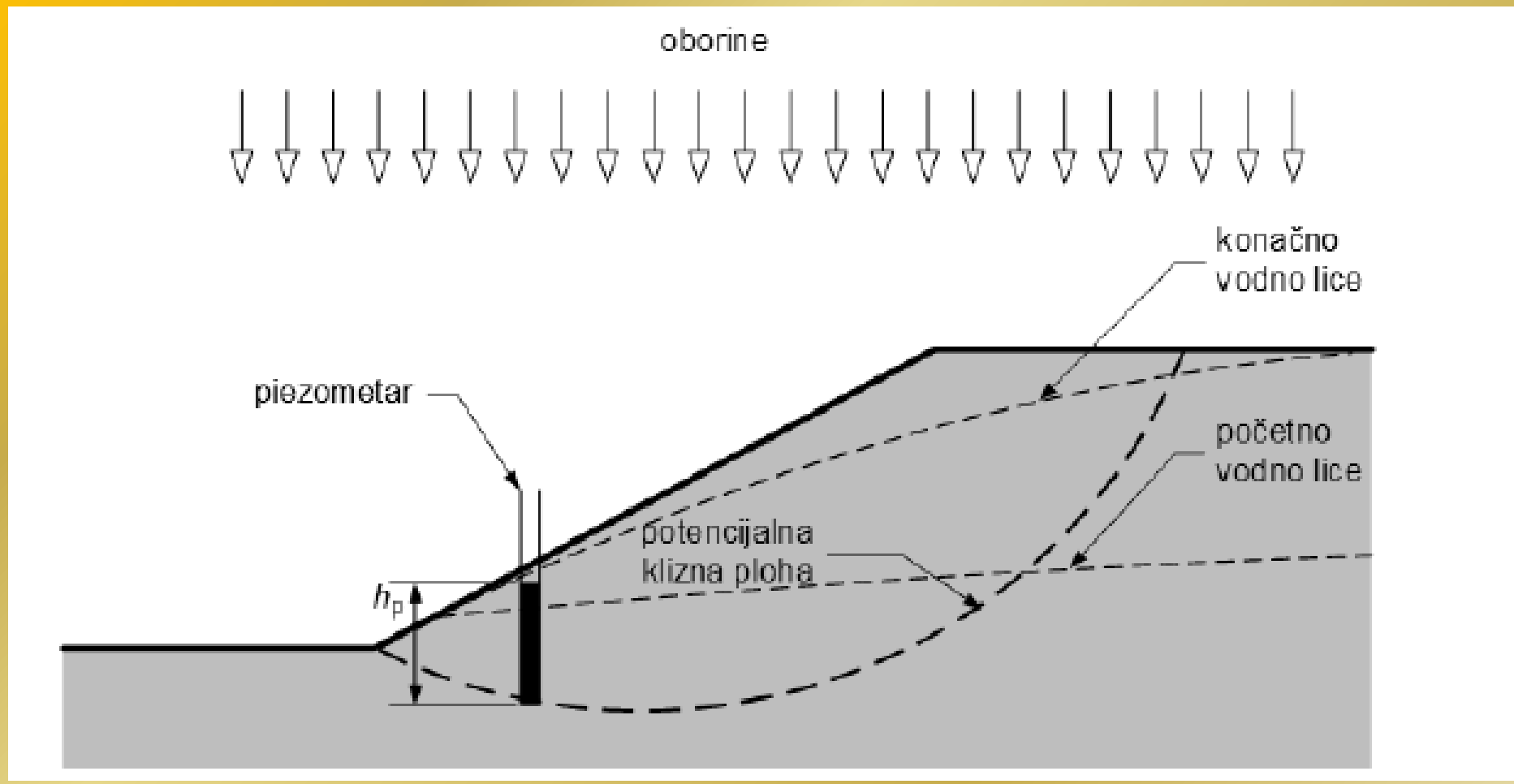
podnožično rotacijsko klizanje

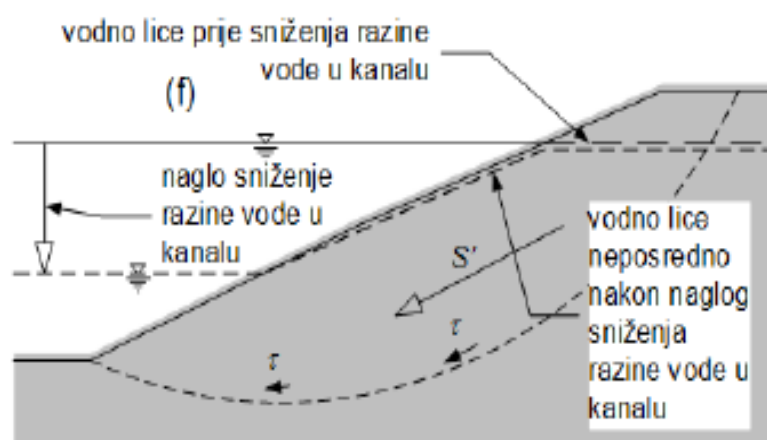
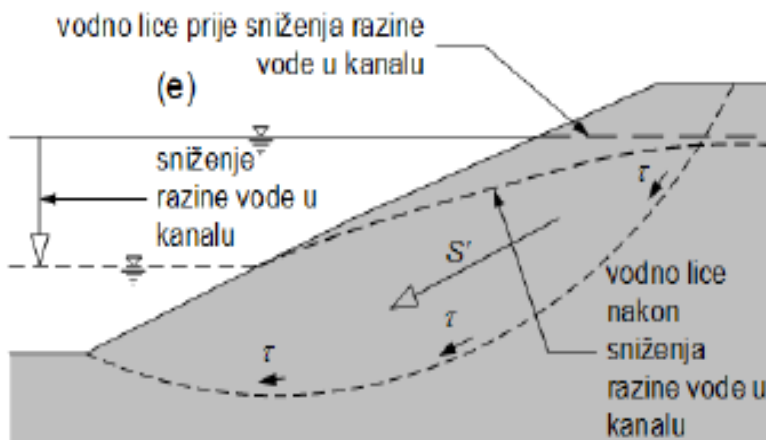
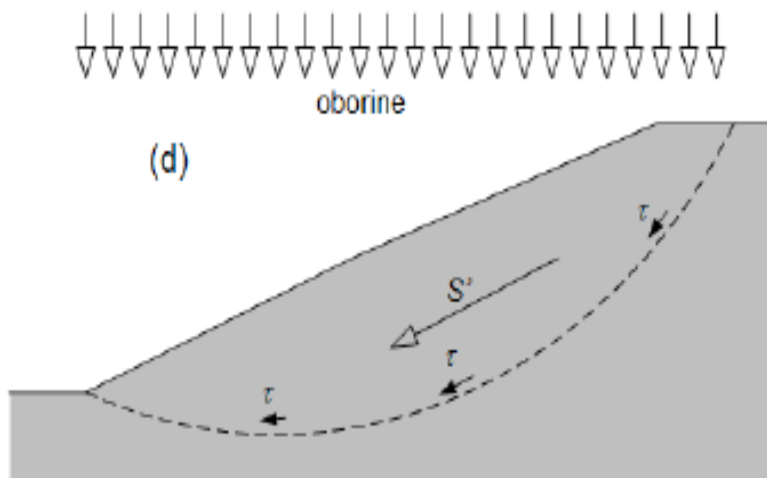
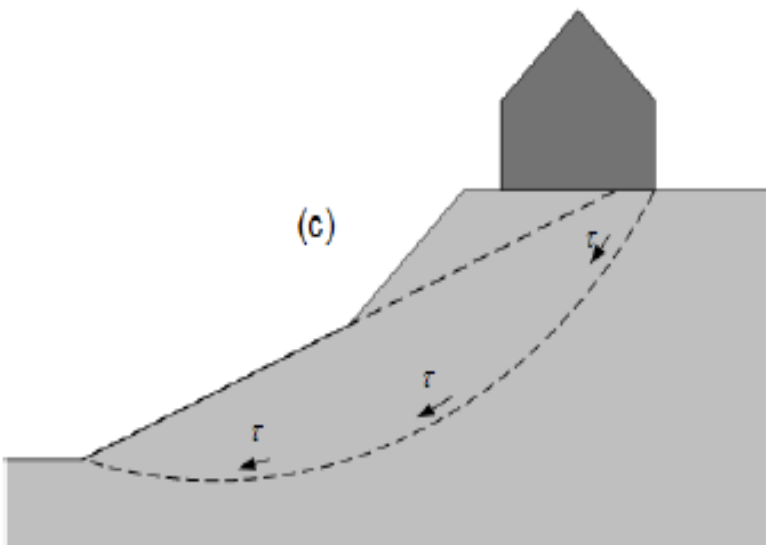
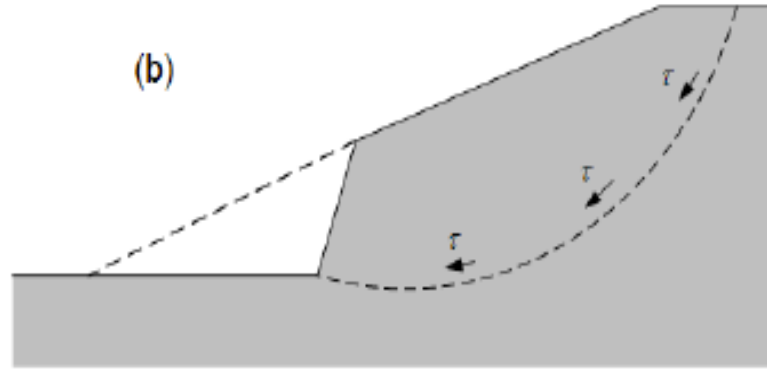
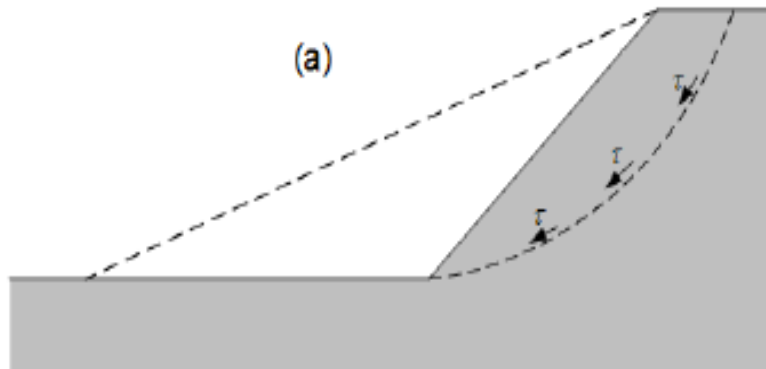


složeno klizanje

Glavni razlozi za moguće pojave nestabilnosti ili nedovoljne sigurnosti kosina mogu se svesti na jedan ili nekoliko od sljedećih uzroka:

- Konture zemljanih masa su suviše strme u odnosu na karakteristike materijala koji je sačinjavaju ili je materijal nedovoljne čvrstoće te ne može da se održi u ravnoteži pri predviđenoj geometriji presjeka.
- Porni pritisci su veliki, što ima odlučujući uticaj na stabilnost mase tla.
- Na masu tla su djelovali, ili će djelovati, neki nepovoljni spoljni uticaji, kao na primjer, velika spoljna (saobraćajna) opterećenja, seizmičke inercijalne sile ili opterećenja okolnih objekata.





PRORAČUN STABILNOSTI KOSINA

Metode proračuna stabilnosti:

- metoda granične ravnoteže (tlo idealno kruto plastično)
- metoda teorije plastičnosti
- metoda konačnih elemenata (MKE), metoda konačnih razlika

METODA GRANIČNE RAVNOTEŽE:  Određivanje **FAKTORA SIGURNOSTI**

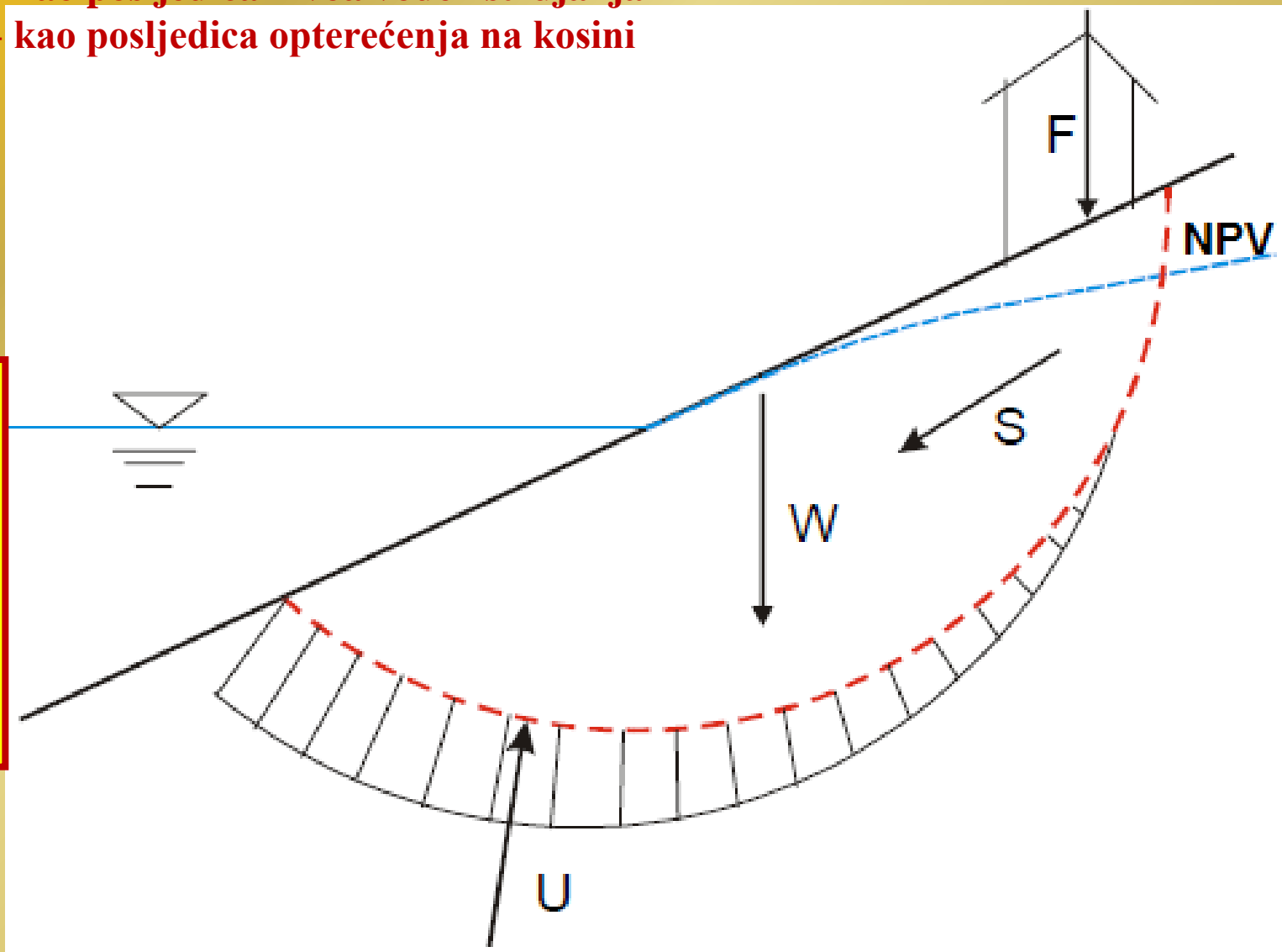
$$F_s = \frac{\text{čvrstoća tla na smicanje}}{\text{posmično naprezanje na odabranoj plohi sloma}} = \frac{\tau_f}{\tau_m}$$

$$F_s = \frac{c' + \sigma'_n \cdot \text{tg}\varphi'}{\tau_m} \text{ za drenirane uslove}$$

SILE KOJE DJELUJU NA KLIZNO TIJELO:

- težina kliznog tijela (W)
- opterećenja na kosini (F)
- porni pritisak (U):
 - kao posljedica nivoa vode i strujanja
 - kao posljedica opterećenja na kosini

Proračunom stabilnosti kosine rješavamo problem ravnoteže promatranog kliznog tijela.



Klasične metode su dugom primjenom i povratnim analizama pokazale da su primjenjive u velikom broju slučajeva, a uz određene manje modifikacije su prihvaćene i u novim evropskim normama (eurokod 7).

Klasične metode se temelje na pretpostavkama:

- **da je materijal tla kruto plastičan (neki to zovu i idealno plastičan), tj. da pri naprezanjima manjim od posmične čvrstoće u njemu nema pomaka;**
Kad posmična naprezanja dostignu određenu vrijednost materijal puca i stvara se klizna ploha (masa tla iznad klizne plohe je klizni disk),
- **kliznu plohu treba, za svaku analizu, zadati unaprijed i**
- **vrijedi Mohr-Coulombov zakon sloma tla.**

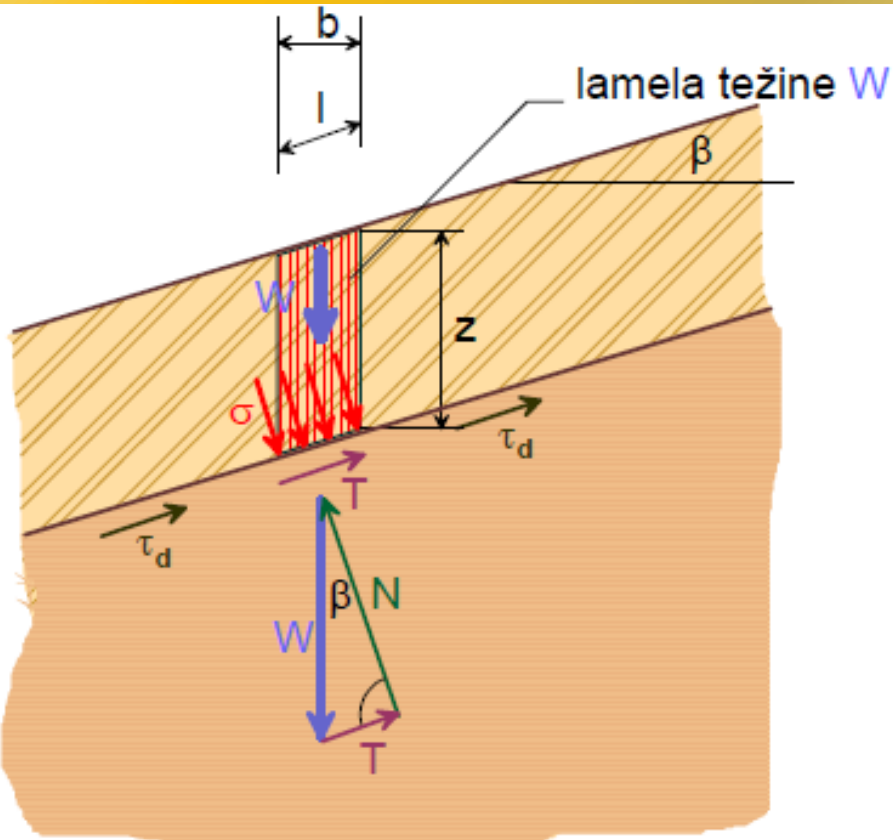
Kao i u svakom inženjerskom problemu, u kojemu se razmatraju naprezanja, tako je i kod metoda stabilnosti pokosa potrebno odrediti ravnotežu sila za zadani problem.

Sile koje treba uravnotežiti su:

- **aktivne sile; to su sile koje teže pokrenuti klizni disk: vlastita težina kliznog diska, sile strujnog pritiska, vanjska opterećenja (nasip, građevina, pokretna opterećenja), potres i**
- **reaktivne sile; to su sile koje se suprotstavljaju aktivnim silama i nastoje stabilizovati kosinu; one se javljaju u tlu, na kliznoj plohi, kao rezultat otpora samog tla; ako se ustanovi da otpor tla nije dovoljan, dodatne reaktivne sile mogu se proizvesti pomoću raznih umjetno proizvedenih elemenata kao što su: sidra, piloti, armature, zatege i sl.**

Stabilnost dugačkih kosina u nekoherentnom tlu

Slučaj 1: bez podzemne vode.



Reaktivne sile N i T se odrede prema težini lamele, W . Sile ćemo odrediti iz zadanih fizikalnih i geometrijskih podataka

$$l = \frac{b}{\cos \beta}$$

$$N = \gamma \cdot bz \cos \beta$$

$$T = \gamma \cdot bz \sin \beta$$

$$\sigma_A = \frac{N}{l} = \frac{\gamma \cdot bz \cos \beta}{\frac{b}{\cos \beta}} = \gamma \cdot z \cos^2 \beta$$

$$\tau_d = \frac{T}{l} = \frac{\gamma \cdot bz \sin \beta}{\frac{b}{\cos \beta}} = \gamma \cdot z \sin \beta \cdot \cos \beta$$

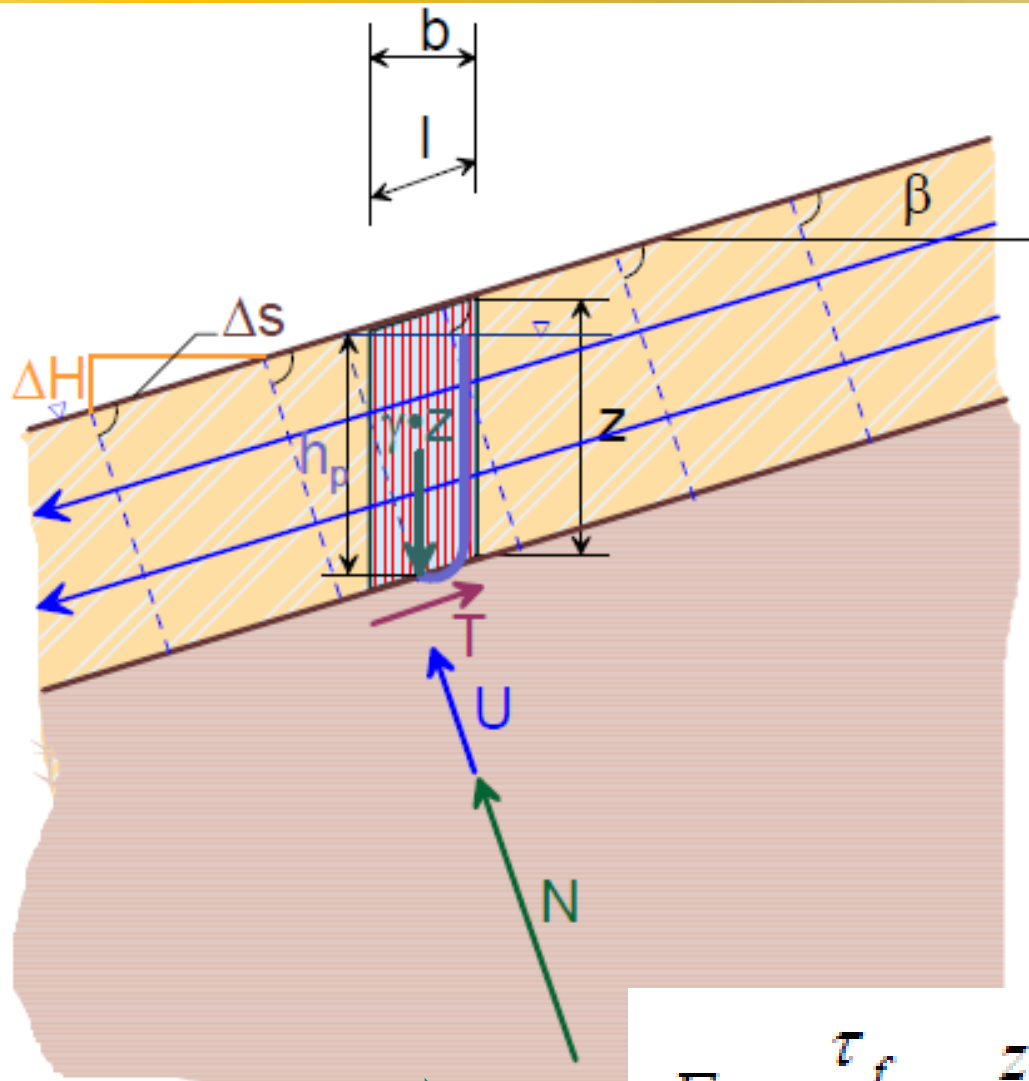
$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{\sigma' \cdot \tan \varphi'}{\tau_d} = \frac{\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \varphi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta}$$



$$F_s = \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta}$$

Stabilnost dugačkih kosina u nekoherentnom tlu

Slučaj 2: podzemna voda teče paralelno s površinom terena



$$h_p = z \cos^2 \beta$$

$$u = h_p \gamma_w = z \gamma_w \cos^2 \beta$$

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma - u \\ &= \gamma z \cos^2 \beta - \gamma_w z \cos^2 \beta \\ &= z (\gamma - \gamma_w) \cos^2 \beta \\ &= z \gamma' \cos^2 \beta \end{aligned}$$

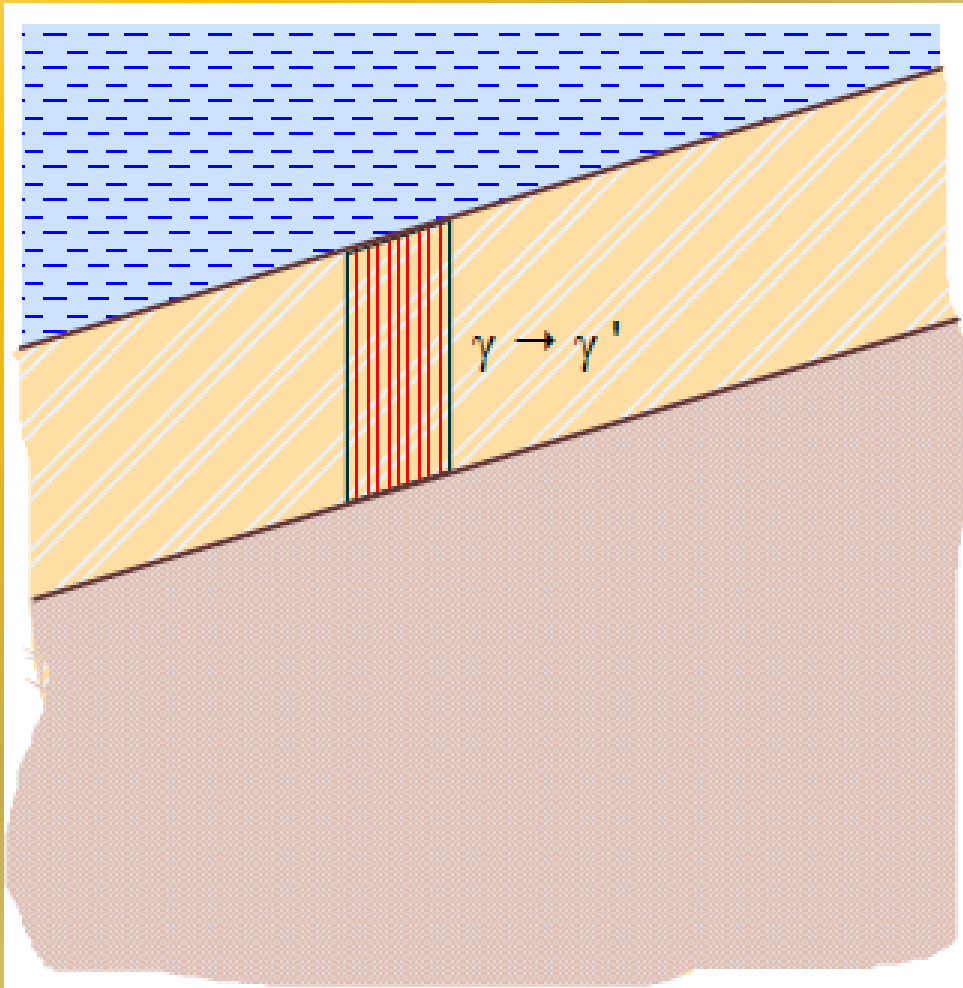
$$\tau = \gamma z \sin \beta \cos \beta$$

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{z \gamma' \cos^2 \beta \cdot \tan \varphi'}{\gamma \cdot z \sin \beta \cdot \cos \beta} = \frac{\gamma' \tan \varphi'}{\gamma \cdot \tan \beta}$$



Stabilnost dugačkih kosina u nekoherentnom tlu

Slučaj 3: pokos duže vremena potopljen



Ovakav slučaj može biti obala rijeke, mora ili jezera.

Kad se kaže "duže vremena potopljen,, misli se da nema nagle promjene nivoa vode jer u tom slučaju može biti mjerodavna tzv. $\phi = 0$ analiza, kod koje se koristi nedrenirana čvrstoća

$$F_s = \frac{\gamma' \cdot z \cos^2 \beta \cdot \tan \varphi'}{\gamma' \cdot z \sin \beta \cdot \cos \beta}$$

$$F_s = \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta}$$

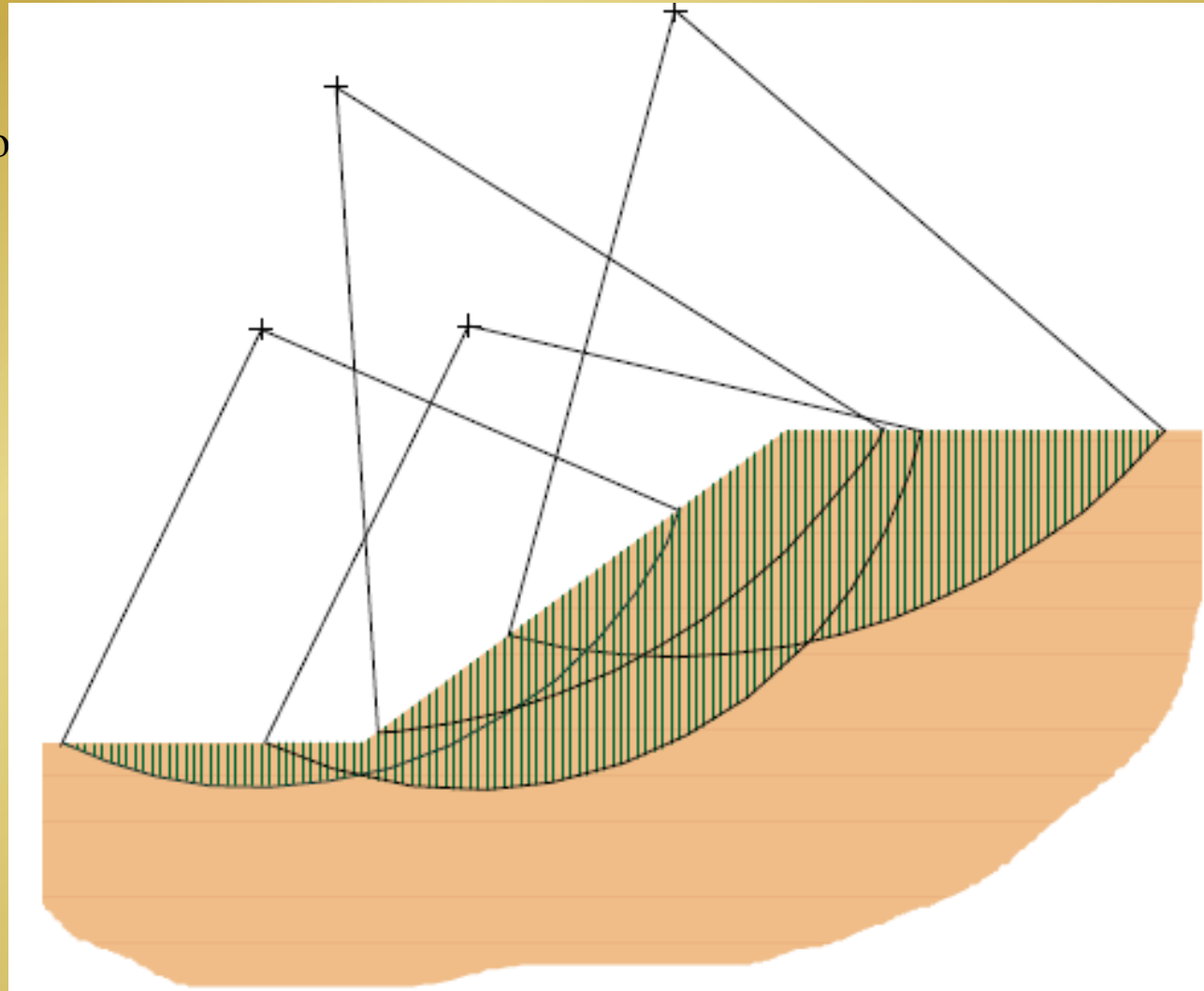


Kružne klizne plohe - grafička metoda

Za kružne klizne plohe grafičku je metodu razradio Taylor (1948).

Vrijede sljedeće pretpostavke:

- da se klizna masa pomiče kao kruti disk,
- položaj klizne plohe mora biti pretpostavljen unaprijed,
- faktor sigurnosti je konstantan duž klizne plohe i
- vrijedi Mohr-Coulombov zakon čvrstoće

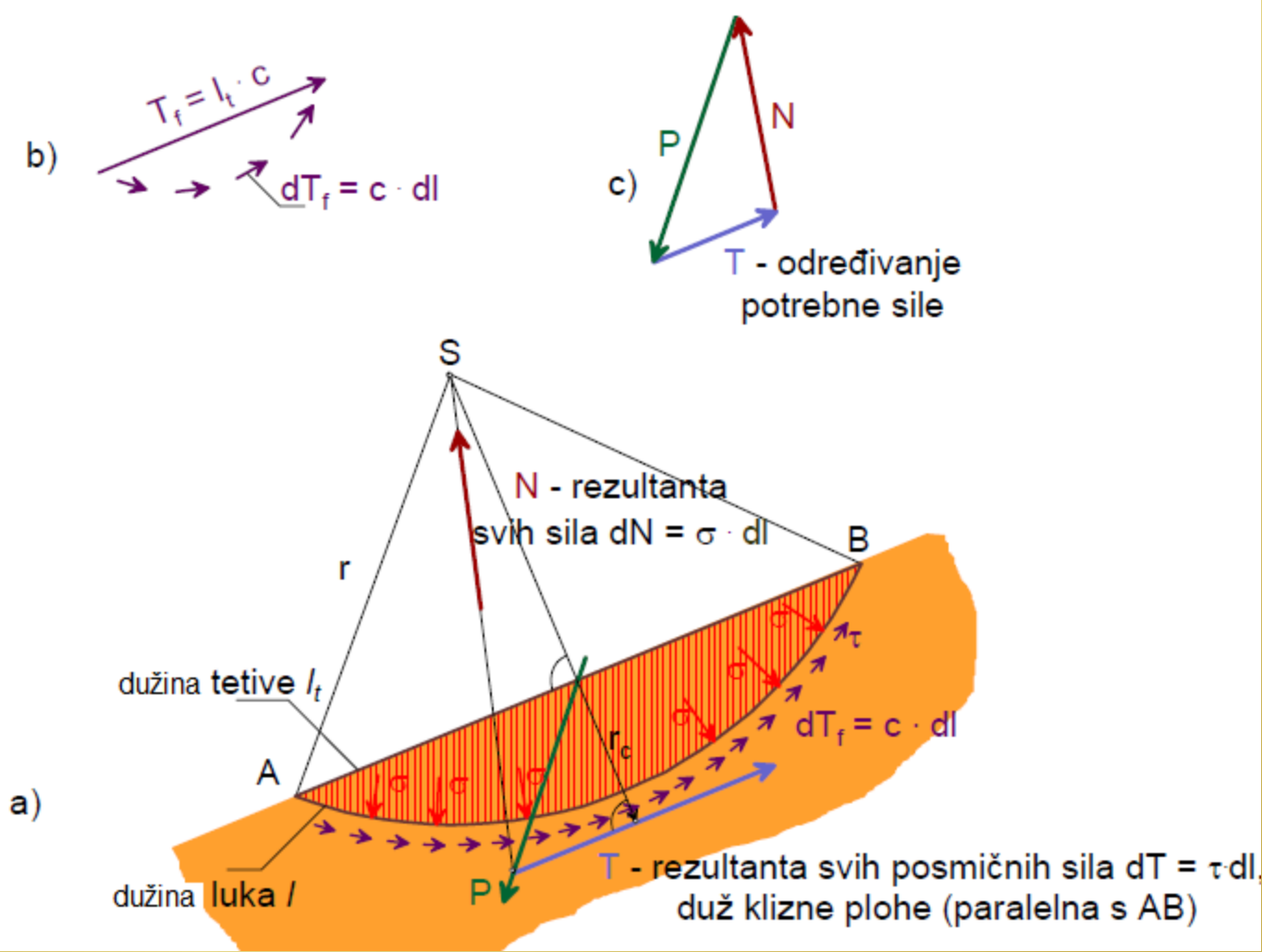


Grafička metoda se primjenjuje za homogene kosine.

Temelji se na dva pojedinačna jednostavna slučaja:

- prvi, kad tlo ima koheziju, a ugao trenja je jednak nuli i
- drugi, kad je obratno

SLUČAJ 1. $c \neq 0$ i $\phi = 0$



$$\int_0^l \vec{r} \cdot d\vec{T}_f = \vec{r}_c \cdot \vec{T}_f$$

$$r \cdot c \cdot \int_0^l dl = r_c \cdot T_f$$

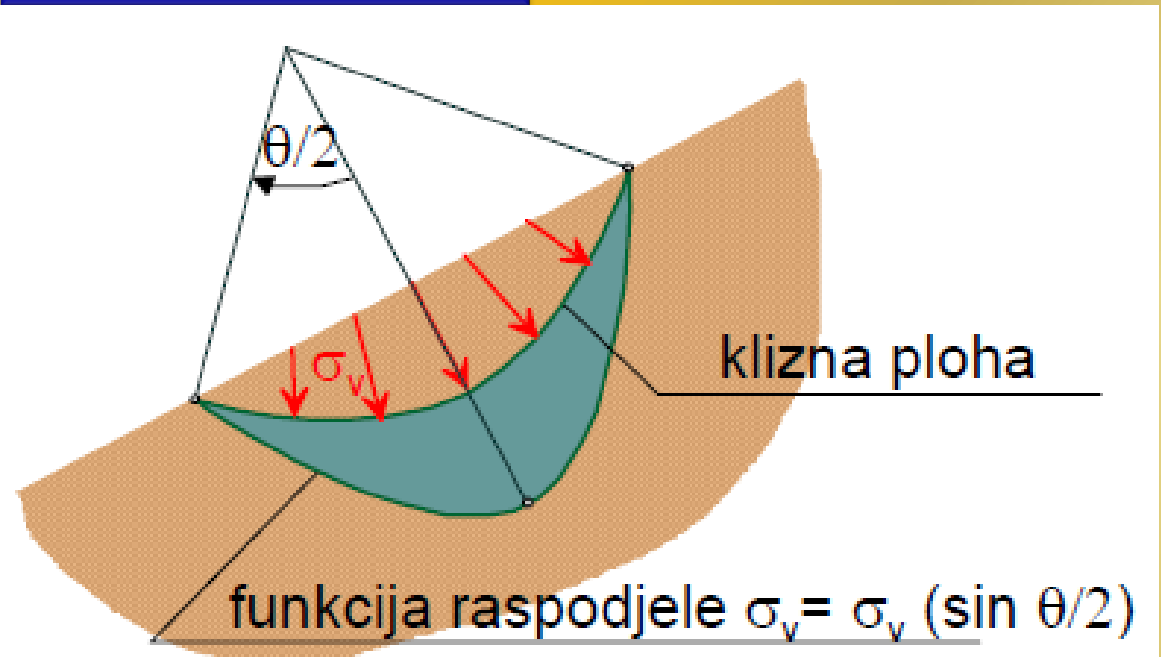
$$r \cdot l \cdot c = r_c \cdot T_f$$

$$r_c = r \frac{l \cdot c}{l_t \cdot c} = r \cdot \frac{l}{l_t} = K_c \cdot r$$

$$F_s = \frac{T_f}{T} = \frac{c \cdot l_t}{T}$$



SLUČAJ 2. $\phi \neq 0$ i $c = 0$



$$r_s = \kappa_s \cdot r$$

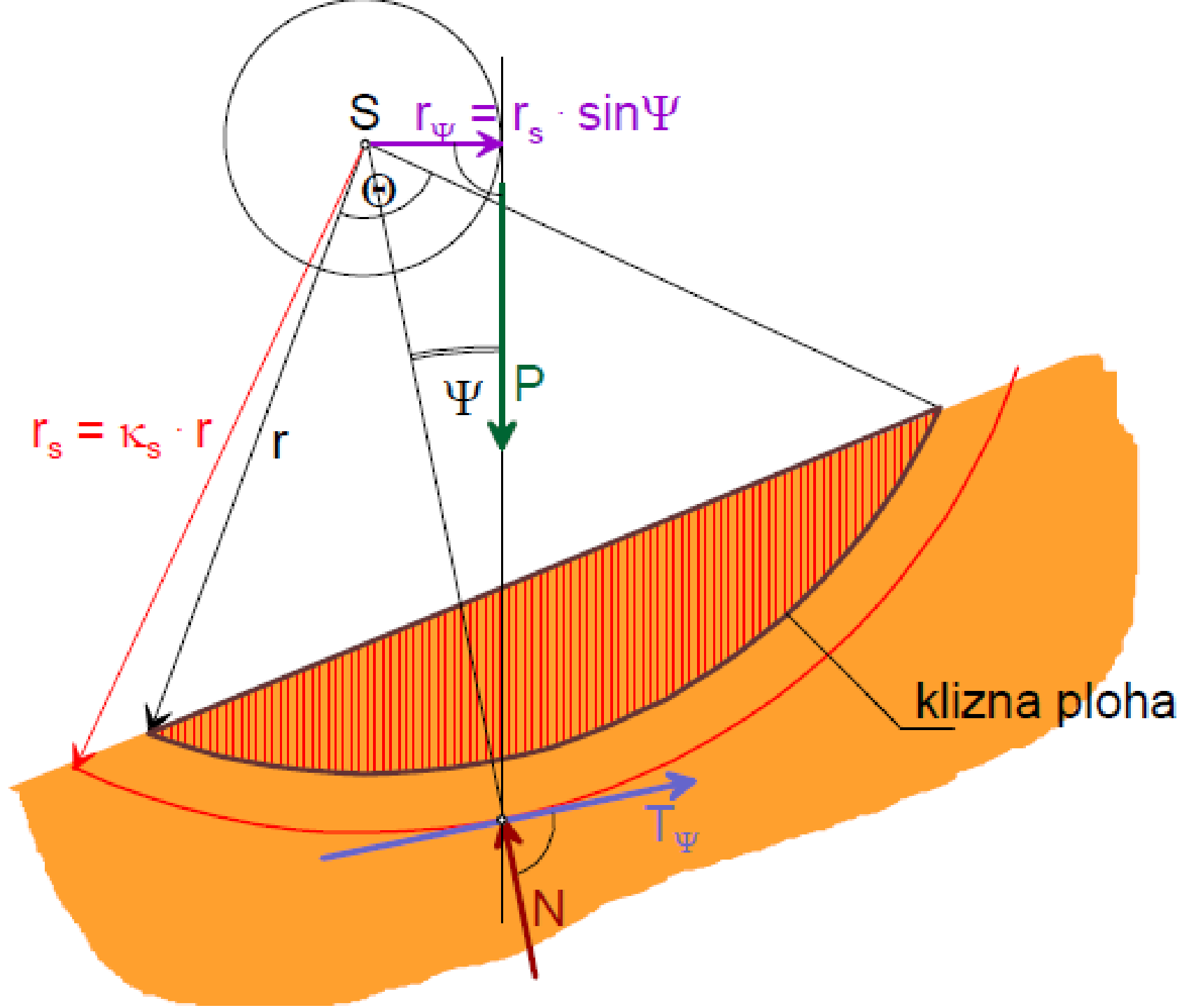
gdje je r radijus klizne plohe, a κ_s je funkcija središnjeg ugla Θ i očitava se iz dijagrama

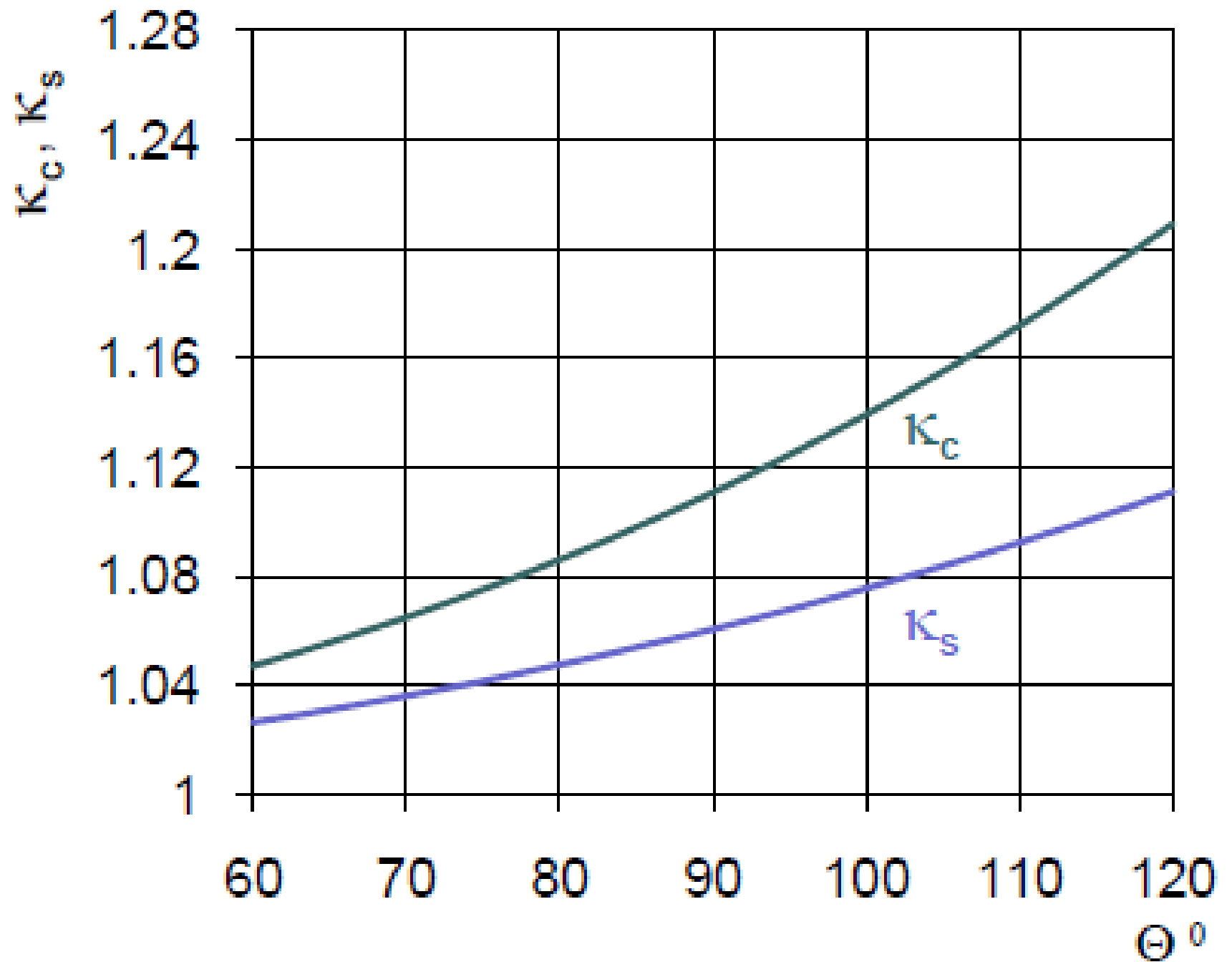
Potrebno je odrediti kut ψ koji aktivna sila zatvara s rezultantom sila normalnih na kliznu plohu.

Očitanju može pomoći i primjena tzv. «kruga trenja» kojemu je radijus $r_\psi = r_s \cdot \sin \psi$, iz čega se onda jednostavno odredi ψ .

Kada se odredi presjecište sile \mathbf{P} , s kružnicom radijusa r_s očitava se ψ (sl.), a faktor sigurnosti za ovaj slučaj dobijemo iz izraza:

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \psi}$$





Slučajevi s $c \neq 0$ i $\phi \neq 0$

NAČIN 1. Pretpostavi se F_{sc} :

Postupak rješavanja:

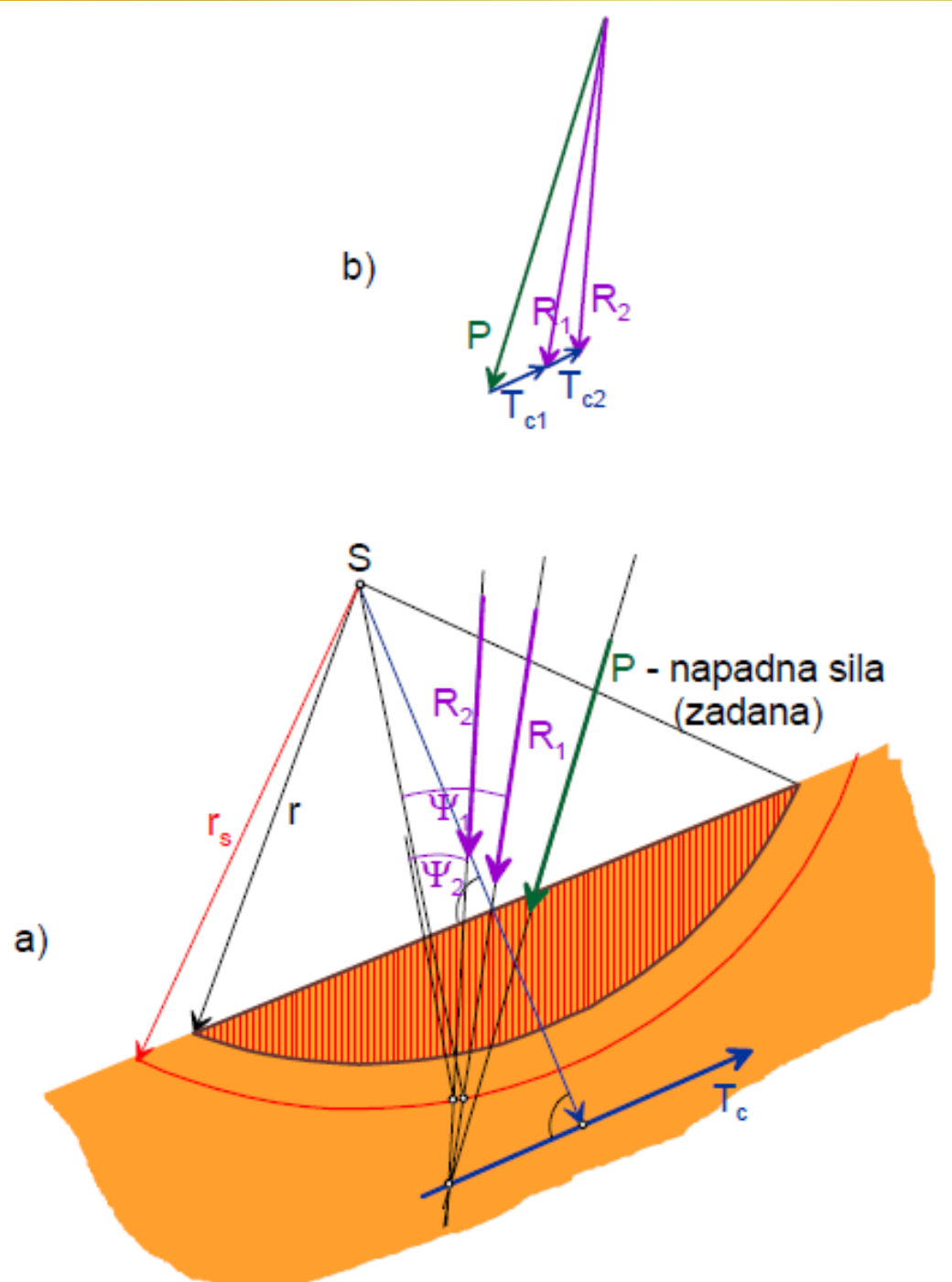
1. Pretpostavi se vrijednost F_{sc1} (npr. 1,5) i izračuna:

$$T_{cl} = \frac{c \cdot l_t}{F_{Scl}}$$

(Napomena: time sila T_{cl} postaje poznata veličina i s njom se može crtati poligon sila),

2. Iz poligona sila odredi se smjer R_1 i nacrtaj na slici; očita se ψ_1 na sjecištu s r_s .

3. Izračuna se $F_{s\phi l} = \frac{tg\phi}{tg\psi}$, ako je različit od F_{sc1} , postupak se ponavlja s $F_{sc2} = (F_{sc1} + F_{s\phi})/2$.



NAČIN 2. Pretpostavi se $F_{s\phi 1}$:

Pretpostavi se $F_{s\phi 1}$ (npr. 1,5) i
Izračuna:

$$r_{\phi 1} = r \cdot \kappa_s \cdot \sin \psi_1$$

Iz:

$$F_{s\phi 1} = \frac{\tan \varphi}{\tan \psi_1} \Rightarrow \tan \psi_1 = \frac{\tan \varphi}{F_{s\phi 1}}$$

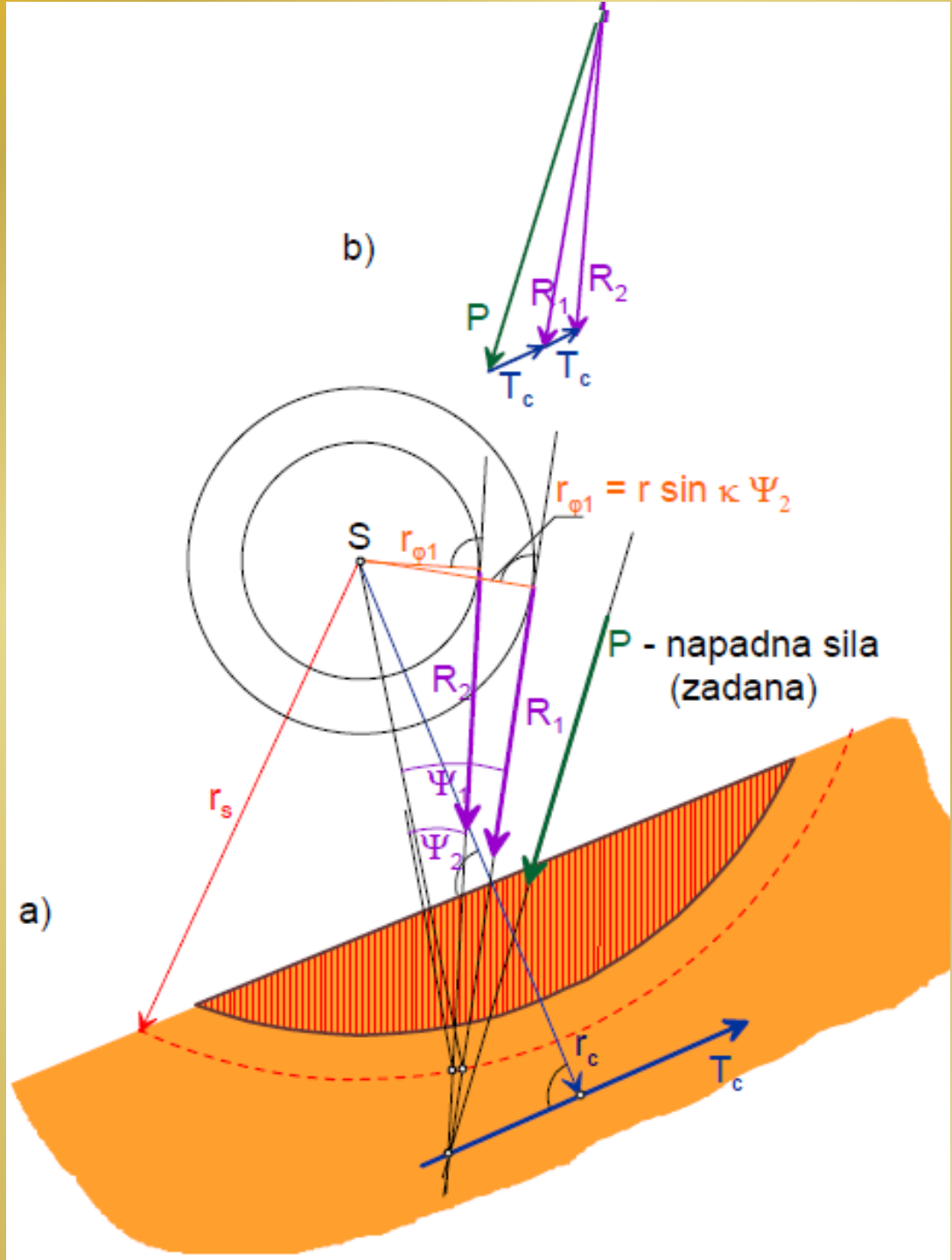
Rezultanta R_1 mora sjeći presjecište P i
 T_c . Iz poligona sila se odredi:

$$T_{cl} = \frac{T_c}{F_{scl}} = \frac{l_t \cdot c}{F_{scl}}$$

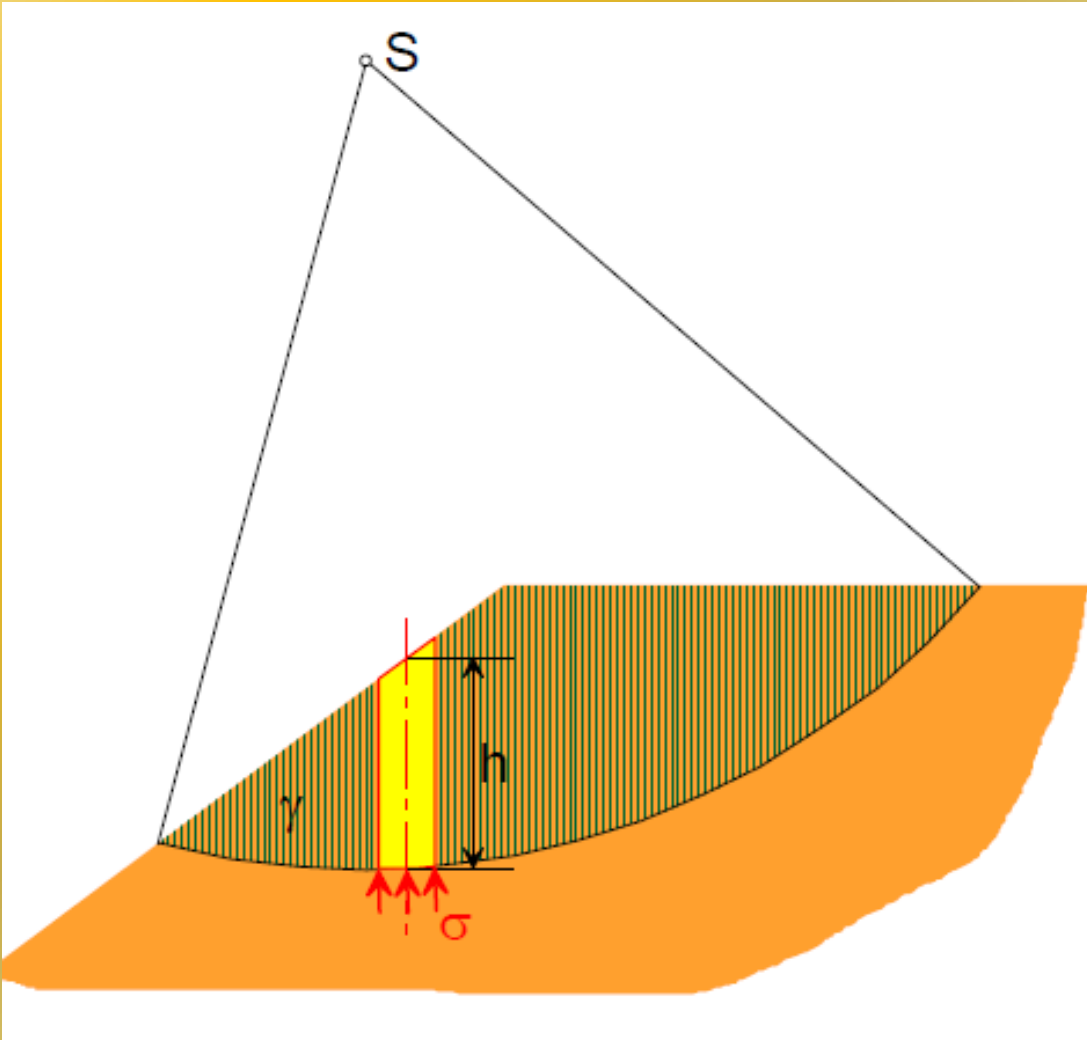
$$\Rightarrow F_{scl} = \frac{l_t \cdot c}{T_{cl}}, \text{ ako je } F_{scl} \approx F_{s\phi 1}$$

imamo rješenje, ako ne, postupak se
ponavlja s

$$F_{s\phi 2} = (F_{scl} + F_{s\phi 1})/2 \text{ itd.}$$

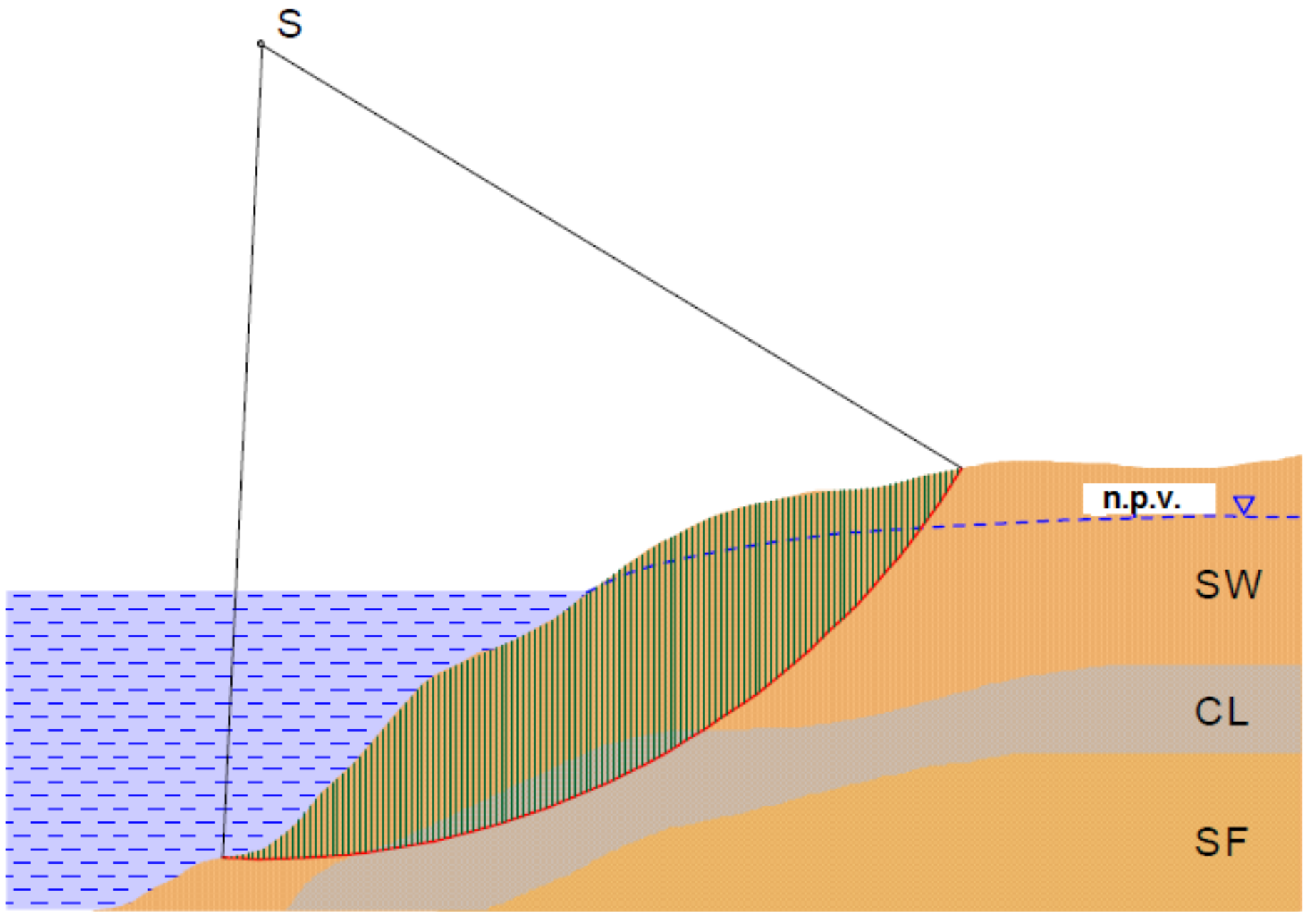


Kružne klizne plohe - metoda lamela



Lamele pružaju dvije osnovne prednosti u odnosu na grafičku metodu:

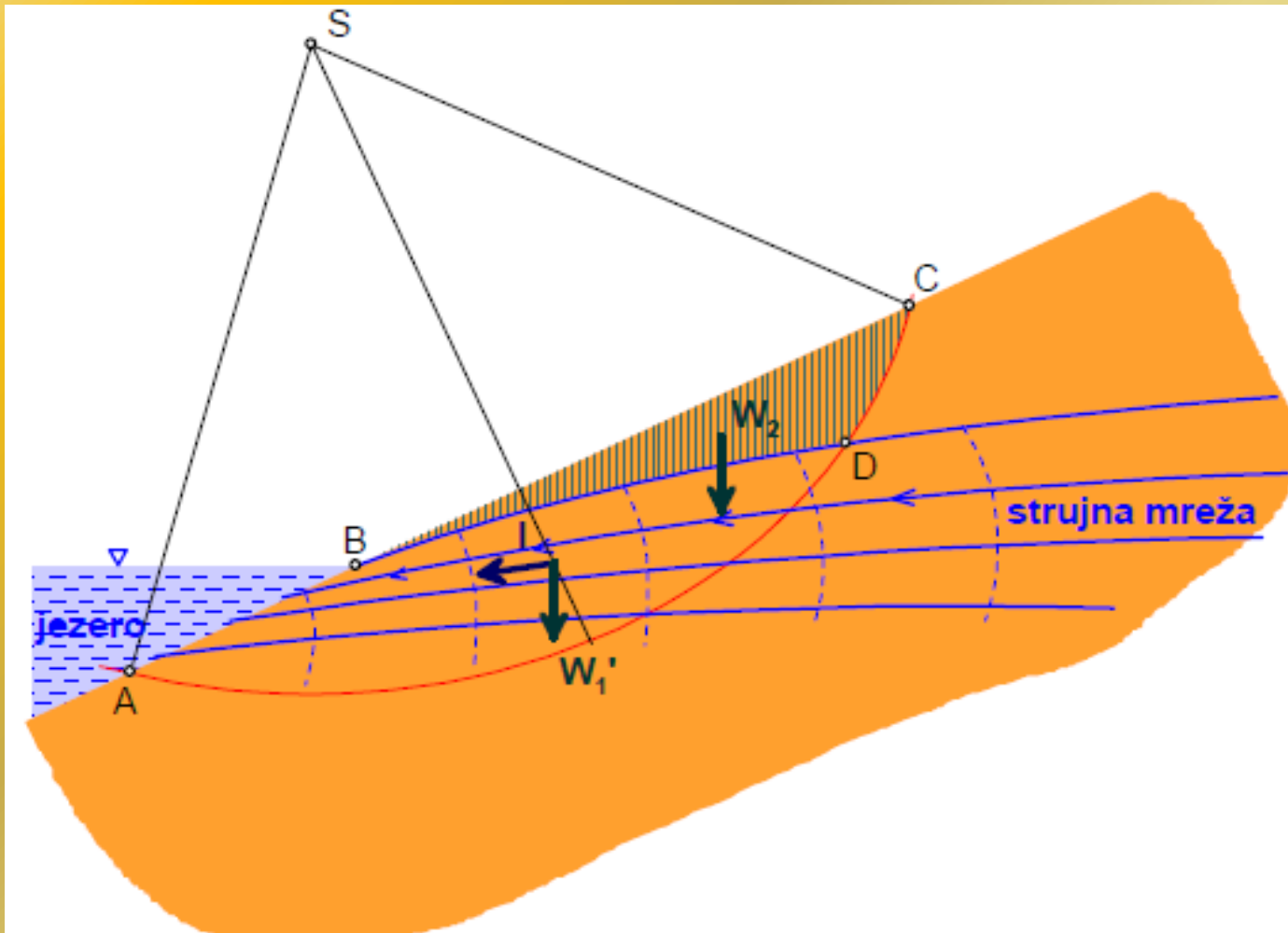
- U grafičkoj metodi uvedena pretpostavka o raspodjeli normalnih naprezanja na kliznoj plohi, ovdje se dobije jednostavno iz opterećenja (težine) same lamele .
- Drugi je razlog za upotrebu lamela –jednostavno uzimanje u obzir složenijih geometrijskih uslova, uslojenosti tla i strujanja podzemne vode.



Primjer složenih geometrijskih uslova uslojenosti tla

Određivanje djelovanja vode na klizni disk

I Način: Određivanje djelovanja vode na stabilnost pokosa preko strujne mreže

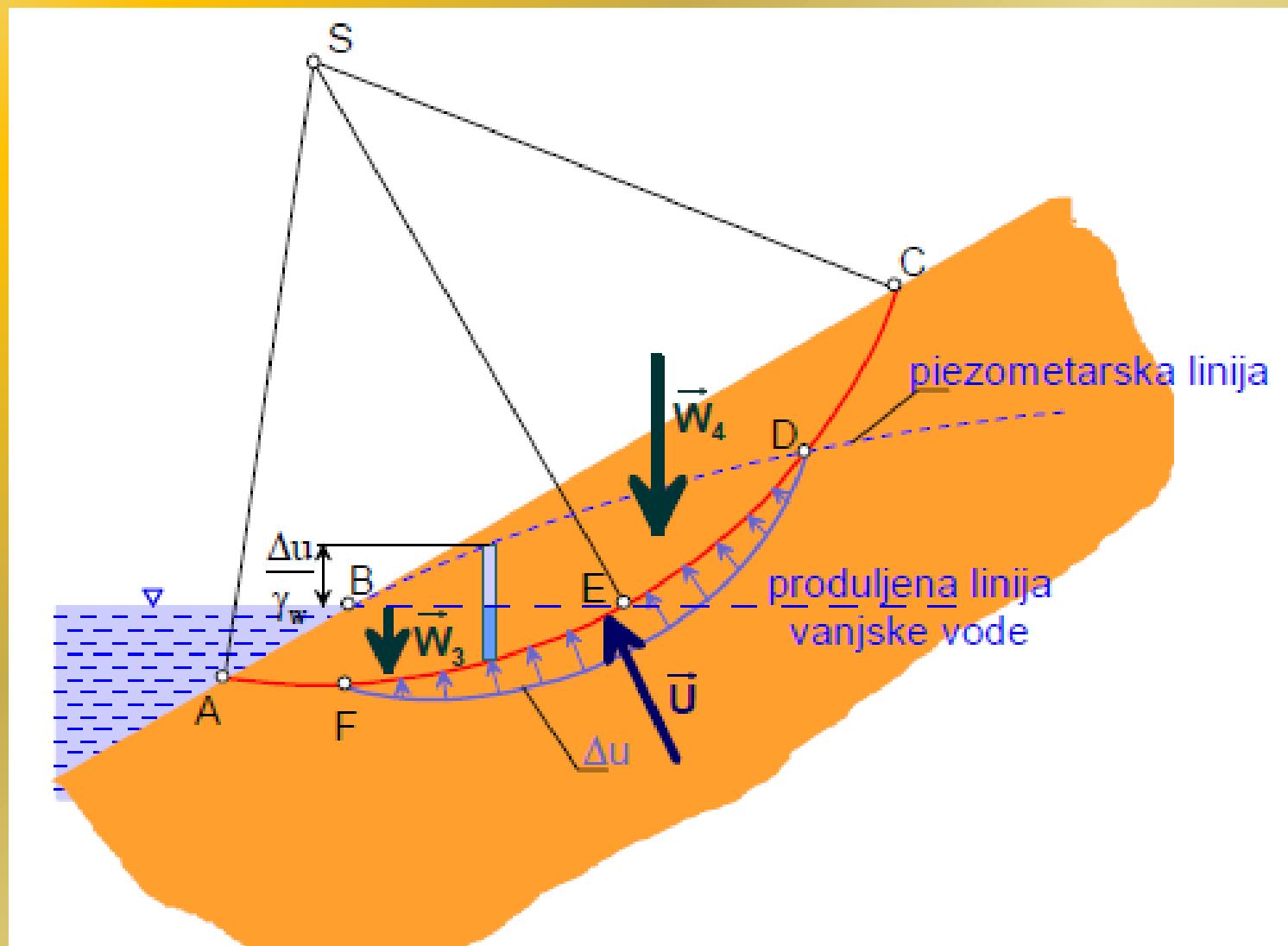


I ... ukupni strujni pritisak na **ABDA** (rezultanta svih strujnih pritisaka po strujnoj mreži),

W_1' ... potopljena težina dijela **ABDA**,

W_2 ... ukupna težina **BCDB**

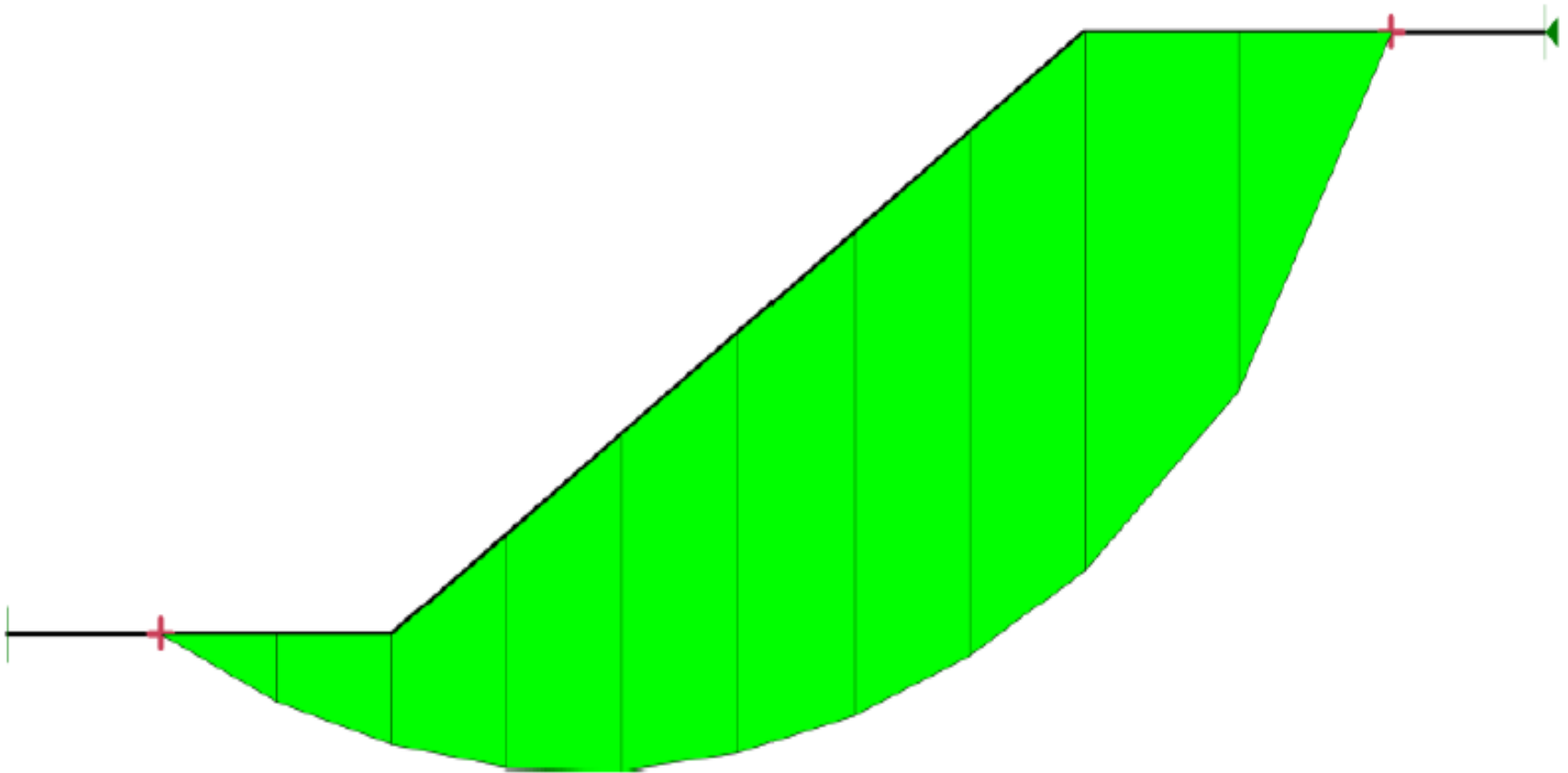
III Način: Određivanje djelovanja vode na stabilnost pokosa pomoću produžene linije vode



W_3 ... potopljena težina dijela **ABEFA**,

W_4 ... ukupna težina **BCDEB**.

U ... rezultanta od sila pornih nadpritisaka vode na kliznoj plohi



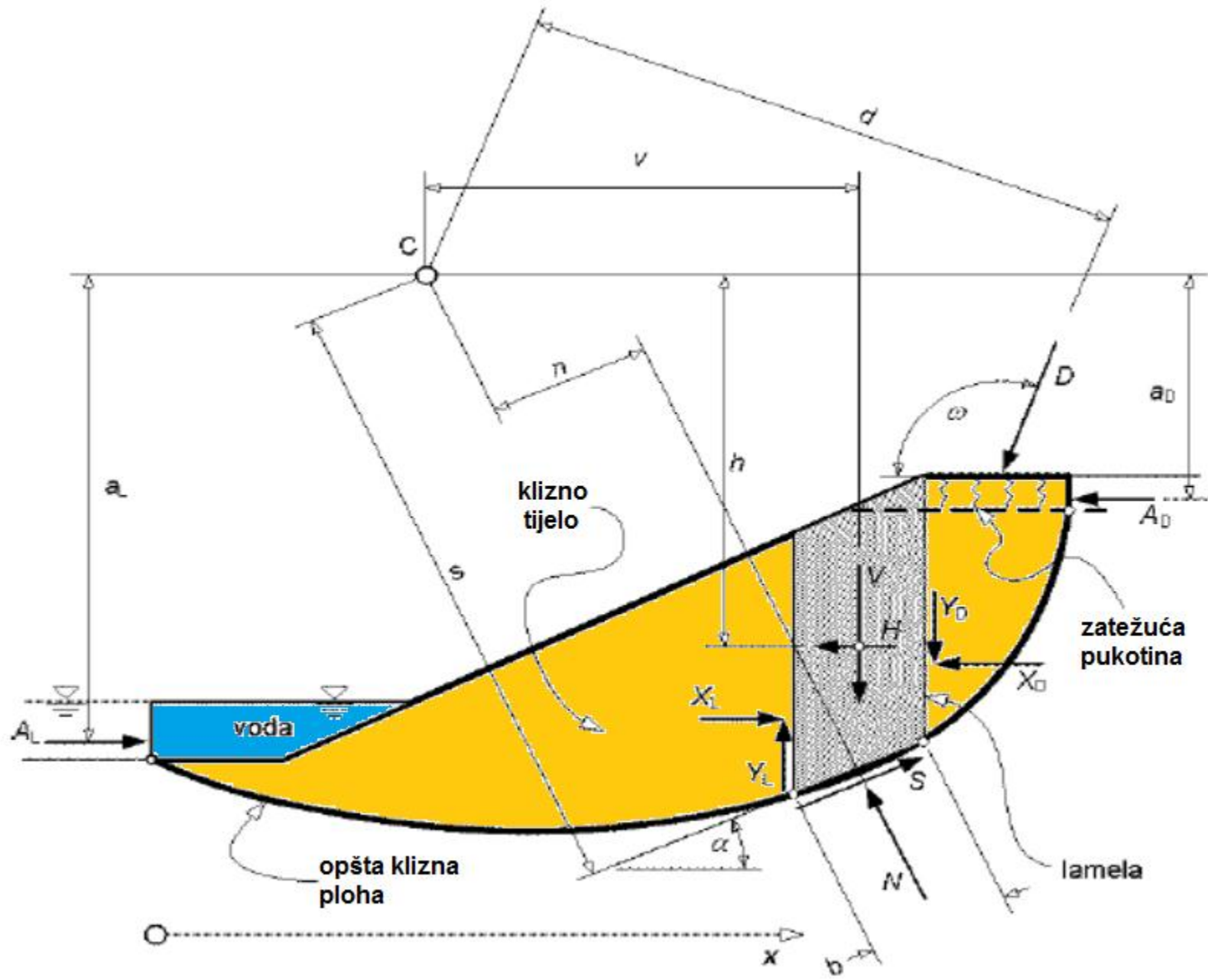
Klizno tijelo podijeljeno u vertikalne lamele za primjenu metode granične ravnoteže

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

(13.3)

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

(13.4)



Opšta klizna ploha i sile koje djeluju na tipičnu lamelu

Opis nepoznanice	oznaka	broj
Normalna sila na osnovici lamele (rezultanta normalnog naprezanja σ)	N	n
Hvatište sile N	-	n
Tangencijalna sila na osnovici lamele (rezultanta posmičnog naprezanja τ)	S	n
Normalna sila između dviju lamela	X	$n - 1$
Tangencijalna sila između dviju lamela	Y	$n - 1$
Hvatište sile X	-	$n - 1$
Ukupno nepoznanica		$6n - 3$

jednačine ravnoteže lamela	broj
Zbroj sila u horizontalnom smjeru	n
Zbroj sila u vertikalnom smjeru	n
Zbroj momenata sila obzirom a tačku C	n
ukupno jednačina ravnoteže	$3n$

Pretpostavka o jednakom faktoru sigurnosti, F , duž klizne plohe uvodi

$$S = C + (N - U) \tan \varphi' / F \quad (13.5)$$

gdje je $S = \tau b$, $C = c' b$, $N = \sigma b$, $U = ub$, ali i jednu novu nepoznanicu, faktor sigurnosti F .

$$\frac{Y}{x} = \lambda f(x) \quad (13.6)$$

Opis nepoznanice ili dodatne pretpostavke	oznaka	broj
Preostali višak nepoznanica	-	$3n - 3$
Faktor sigurnosti	F	1
Faktor λ	λ	1
Mohr-Coulombov zakon čvrstoće, izraz (13.5)	-	$-n$
Funkcija nagiba međulamelarnih sila	$f(x)$	$-(n - 1)$
Hvatište sila N na sredini osnovice lamele	-	$-n$
Ukupno višak nepoznanica nad brojem jednačina:		0

Jednačine ravnoteže i njihovo rješenje

$$F_x = \frac{\Sigma(C \cos \alpha + (N - U) \tan \varphi' \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha + \Sigma H - \Sigma D \cos \omega + A_L - A_D} \quad (13.7)$$

$$F_m = \frac{\Sigma(Cs + (N - U) \tan \varphi')}{\Sigma Vv - \Sigma Nn + \Sigma Hh + \Sigma Dd + A_L a_L - A_D a_D} \quad (13.8)$$

Za svaku lamelu sa slike , mogu se postaviti tri jednačine ravnoteže: vektorski zbir svih sila u horizontalnom smjeru, vektorski zbir svih sila u vertikalnom smjeru i zbir svih momenata sila obzirom na tačku C, moraju biti jednaki nuli

Iz globalne jednačine ravnoteže u horizontalnom smjeru (x), dobije se rješenje za faktor sigurnosti (oznaka suma, Σ , označava da se veličine iza oznake sabiraju preko svih lamela).

$$F_x = \frac{\Sigma(C \cos \alpha + (N - U) \tan \varphi' \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha + \Sigma H - \Sigma D \cos \omega + A_L - A_D} \quad (13.7)$$

Iz globalne jednačine momenata sila, dobije se rješenje za faktor sigurnosti

$$F_m = \frac{\Sigma(Cs + (N - U) \tan \varphi ')}{\Sigma Vv - \Sigma Nn + \Sigma Hh + \Sigma Dd + A_L a_L - A_D a_D} \quad (13.8)$$

U opštem slučaju, uz neku zadatu funkciju nagiba međulamelnih sila $f(x)$, postupak rješavanja nepoznanica navedenih jednačina provodi se iterativno u tri nivoa:

1. U prvom nivou odredi se početna vrijednost faktora sigurnosti, zanemarujući međulamelarne sile, dakle uz i ($\Delta X=0; \Delta Y=0; \Delta X=X_L-X_D; \Delta Y=Y_L-Y_D$). Za to može poslužiti izraz (13.8) za faktor sigurnosti iz ravnoteže momenata, u koji se za normalne sile na osnovicama lamela koristi izraz

$$N = V \cos \alpha - H \sin \alpha + D \cos(\omega - 90^\circ + \alpha) \quad (13.9)$$

Ova početna vrijednost faktora sigurnosti koristit će se za računanje izraza u sljedećem nivou iteracije.

2. Drugi nivo iteracije ponavlja se za svaku proizvoljnu vrijednost varijable λ , s tim da je neposredno nakon prvog nivoa, obično $\lambda=0$. Za izabranu se vrijednost λ kao i za vrijednost faktora sigurnosti iz prethodne iteracije izračunaju nove vrijednosti faktora sigurnosti F_x i F_m iz izraza (13.7) i (13.8), s tim da se normalna sila na osnovici lamela računa iz izraza

$$N = \frac{V - \Delta Y - \frac{\sin \alpha}{F} (C - U \tan \varphi ') + D \sin \omega}{m_\alpha} \quad (13.10)$$

gdje je: 

$$m_{\alpha} = \cos \alpha + \frac{1}{F} \sin \alpha \tan \varphi' \quad (13.11)$$

U izrazu (13.10), nepoznata je veličina razlike vertikalnih međulamelarnih sila ΔX . Nove veličine međulamelarnih sila, u svakom se koraku ovog nivoa iteracije računaju iz vektorskog zbira svih sila u horizontalnom smjeru

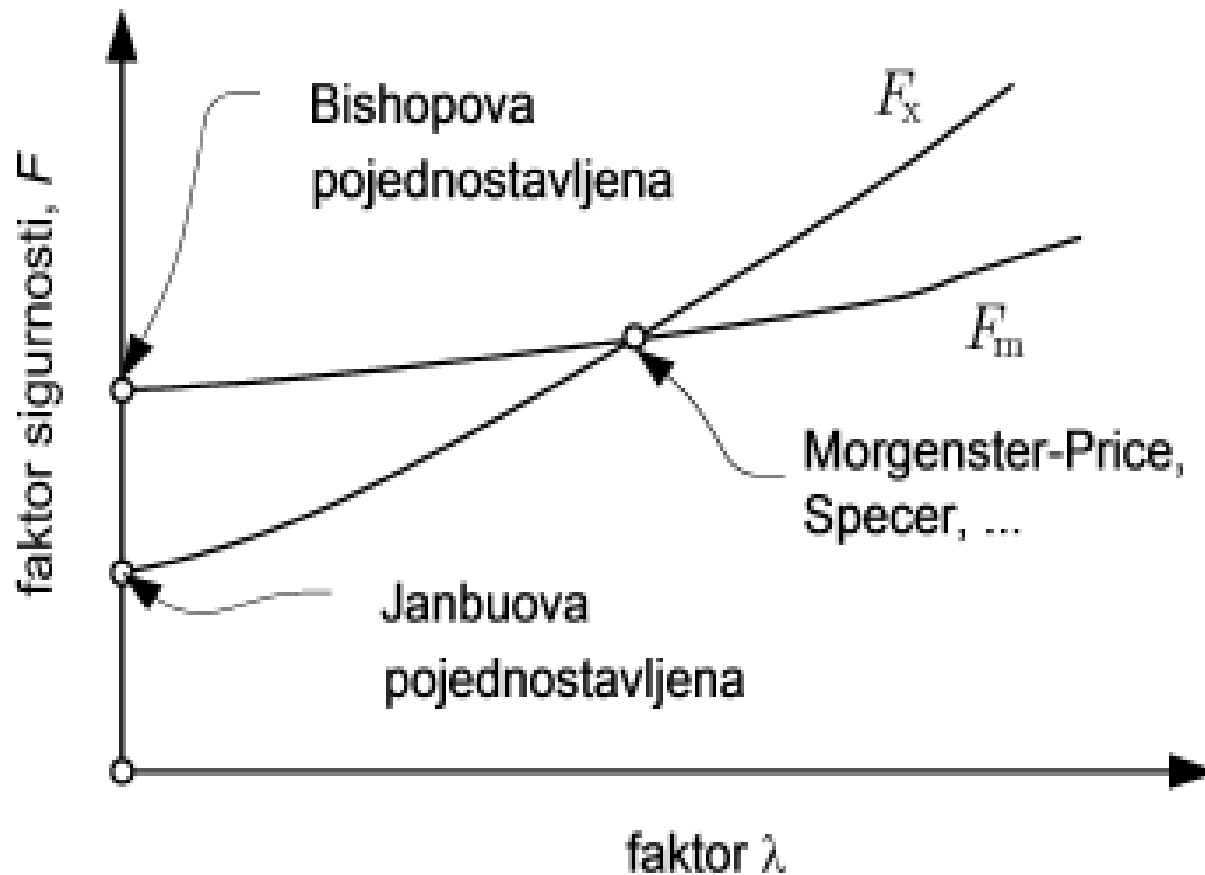
$$\Delta X - N \sin \alpha + S \cos \alpha - H + D \cos \omega = 0 \quad (13.12)$$

Iz izraza (13.12) i (13.5) slijedi:

$$X_D = X_L + \frac{1}{F} (C - U \tan \varphi') \cos \alpha + N \left(\frac{1}{F} \tan \varphi' \cos \alpha - \sin \alpha \right) - H + D \cos \omega \quad (13.13)$$

Odgovarajuće vertikalne međulamelarne sile Y , izračunaju se iz izraza (13.6). Nakon nekoliko koraka iteracije, veličine faktora sigurnosti F_x i F_m dviju uzastopnih iteracija bit će gotovo jednake i tada je iteracija završena.

3. U trećem nivou iteracije mijenja se veličina varijable λ tako dugo dok se ne postigne $F_x \approx F_m$ (slika).

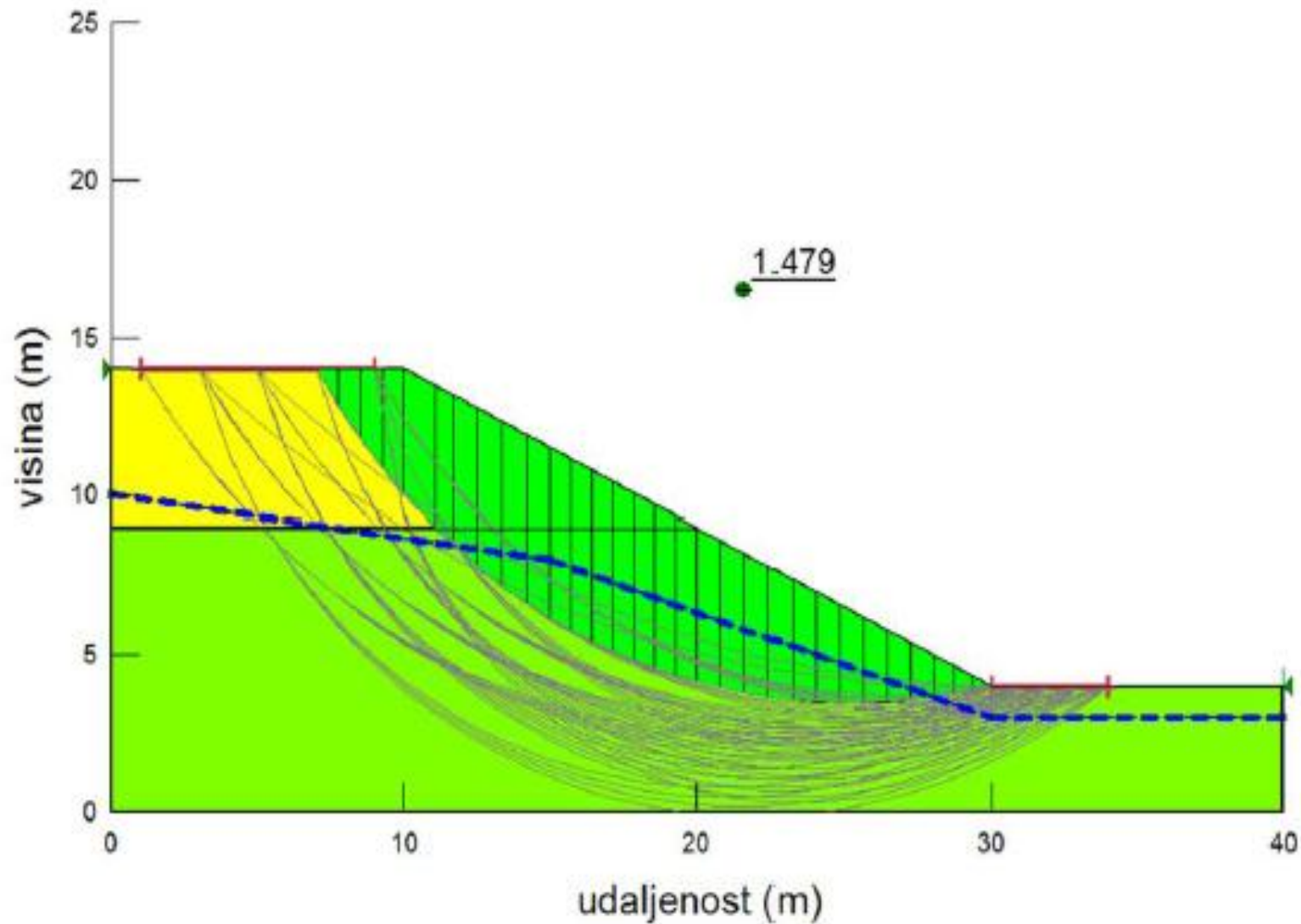


Provođenje prikazanog opšteg iterativnog postupka rješavanja sistema nelinearnih jednačina praktički je neizvediva bez pomoći računara.

Postupak je i razvijen kad je dostupnost računara omogućila njegovu primjenu.

Prije pojave računara koristile su se pojednostavljene varijante postupka.

Kritična klizna ploha



Pritisak vode u porama tla i koeficijent pornog pritiska r_u

$$h_p = \frac{u}{\gamma_w}$$

$$u = r_u \gamma h_L \quad (13.14)$$

gdje je h_L visina lamele. Za suho tlo $r_u=0$,

a za vodu na vrhu lamele

$$r_u = \frac{\gamma_w}{\gamma}$$

To znači da se koeficijent pornog pritiska kreće u granicama od nule do oko 0,5

Posebne varijante metode granične ravnoteže

Naziv varijante	klizna ploha	jednadžbe ravnoteže		sile među lamelama		funkcija nagiba sila među lamelama $f(\mathbf{x})$
		$\Sigma_x = 0$	$\Sigma_m = 0$	ΔX	ΔY	
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
Morgenstem-Priceova (Morgenstem i Price, 1965)	opća	Da	Da	$\neq 0$	$\neq 0$	zadaje korisnik
Spencerova (Spencer, 1967)	opća	Da	Da	$\neq 0$	$\neq 0$	= 1

Napomene: $\Sigma_x = 0$... jednačina ravnoteže u horizontalnom smjeru
 $\Sigma_m = 0$... jednačina ravnoteže momenata sila

Obična metoda (metoda Felleniusa ili švedska metoda)

$$F = \frac{\Sigma c' b + \Sigma (V \cos \alpha - ub) \tan \varphi'}{\Sigma V \sin \alpha} \quad (13.15)$$

$$F = \frac{\Sigma c_u b}{\Sigma V \sin \alpha} \quad (13.16)$$

Bishopova pojednostavljena metoda

$$N = \frac{V - \frac{\sin \alpha}{F} (C - U \tan \varphi') + D \sin \omega}{m_\alpha} \quad (13.18)$$

Iz uslova ravnoteže momenata sila, uvažavajući da je

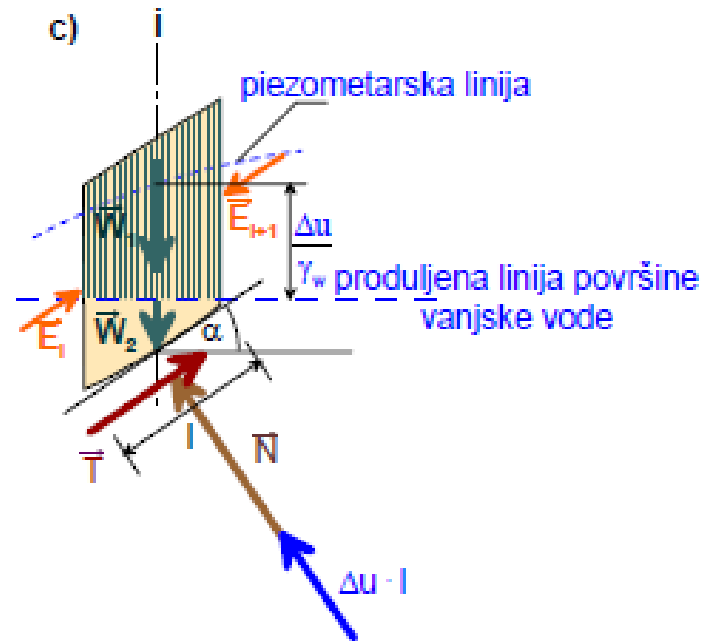
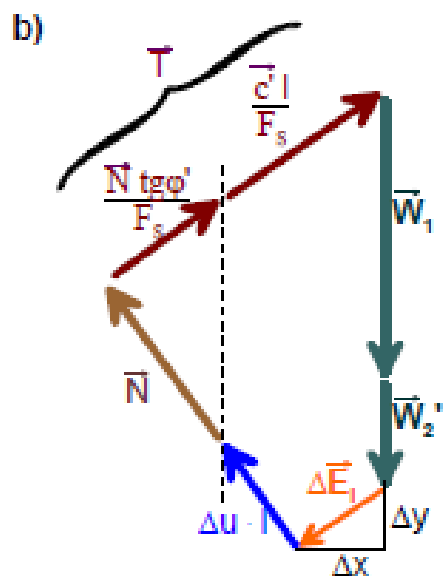
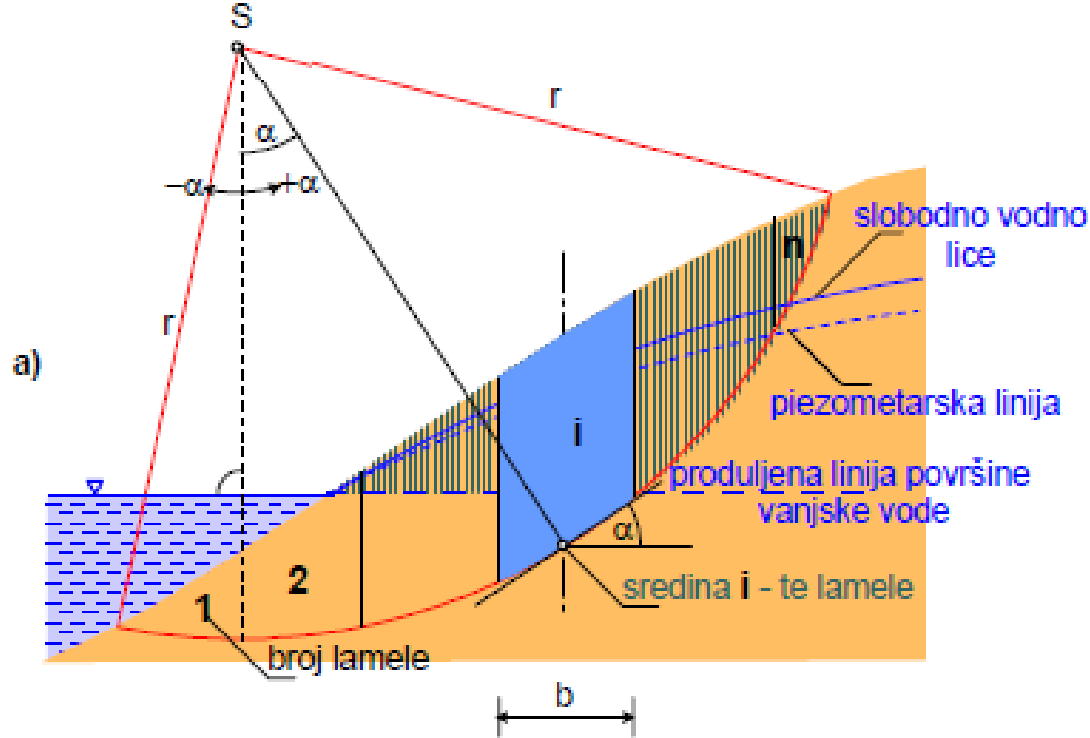
$$\frac{1}{F} \sin \alpha \tan \varphi' = m_\alpha - \cos \alpha$$

a širina lamele:

$$b_x = b \cos \alpha$$

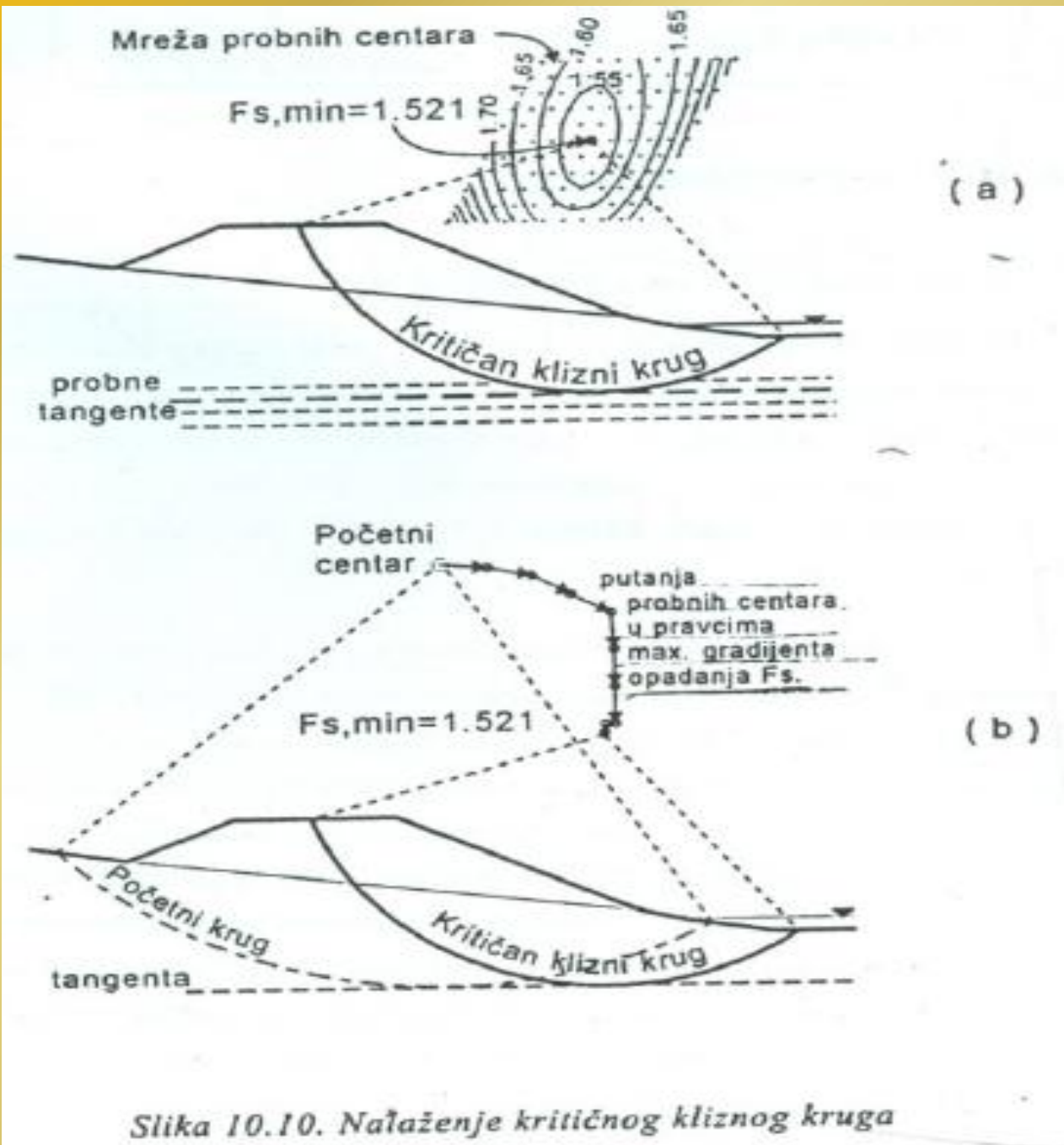
$$F = \frac{\Sigma \frac{c' b_x + (V - ub_x) \tan \varphi'}{m_\alpha}}{\Sigma V \sin \alpha + \frac{1}{R} (\Sigma H h + \Sigma D d + A_L a_L - A_D a_D)} \quad (13.19)$$

Bishopova pojednostavljena metoda



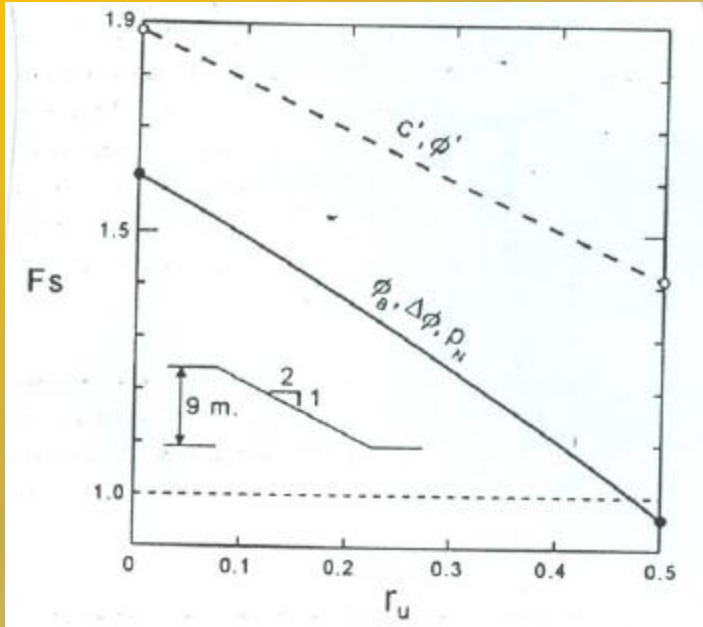
U analizi stabilnosti treba naći onu kliznu površ koja daje minimalnu vrijednost faktora sigurnosti.

Radi sistematizovanijeg nalaženja minimuma obično je pogodno privremeno fiksirati neki horizontalni nivo ili tačku koji za različite položaje centra određuju veličinu poluprečnika R , tako da se nalazi lokalni minimum za dvije promjenljive (x_c, y_c), a zatim se nivo tangiranja ili prolazna tačka za sve krugove mijenja kako bi se odredio apsolutni minimum.

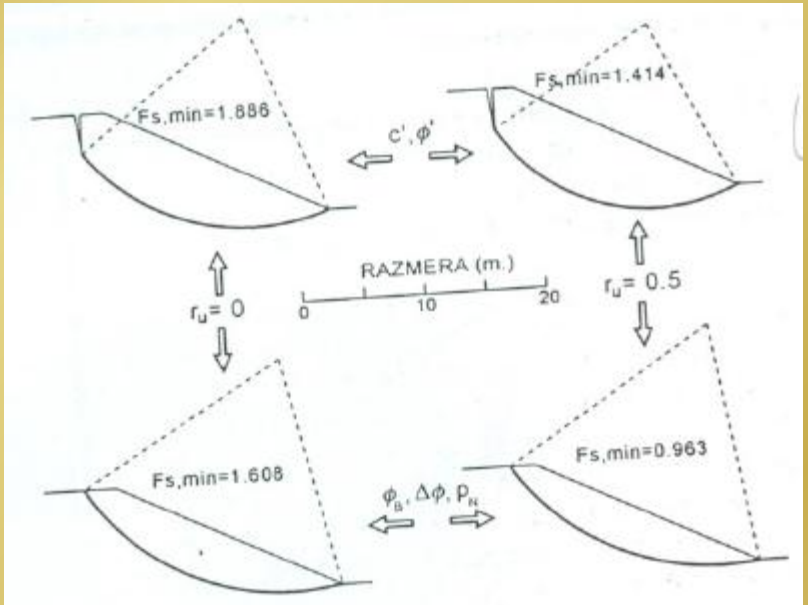


Značaj nelinearne anvelope

Uticaj zakrivljenosti anvelope napona loma na faktor sigurnosti može biti značajan ukoliko područje normalnih napona na kritičnoj kliznoj površi nije na najbolji mogući način aproksimirano linearnom anvelopom, bez obzira koji je oblik klizne površi kritičan.



Slika 10.12. Zavisnost faktora sigurnosti od pornog pritiska za primer na Slici 10.11



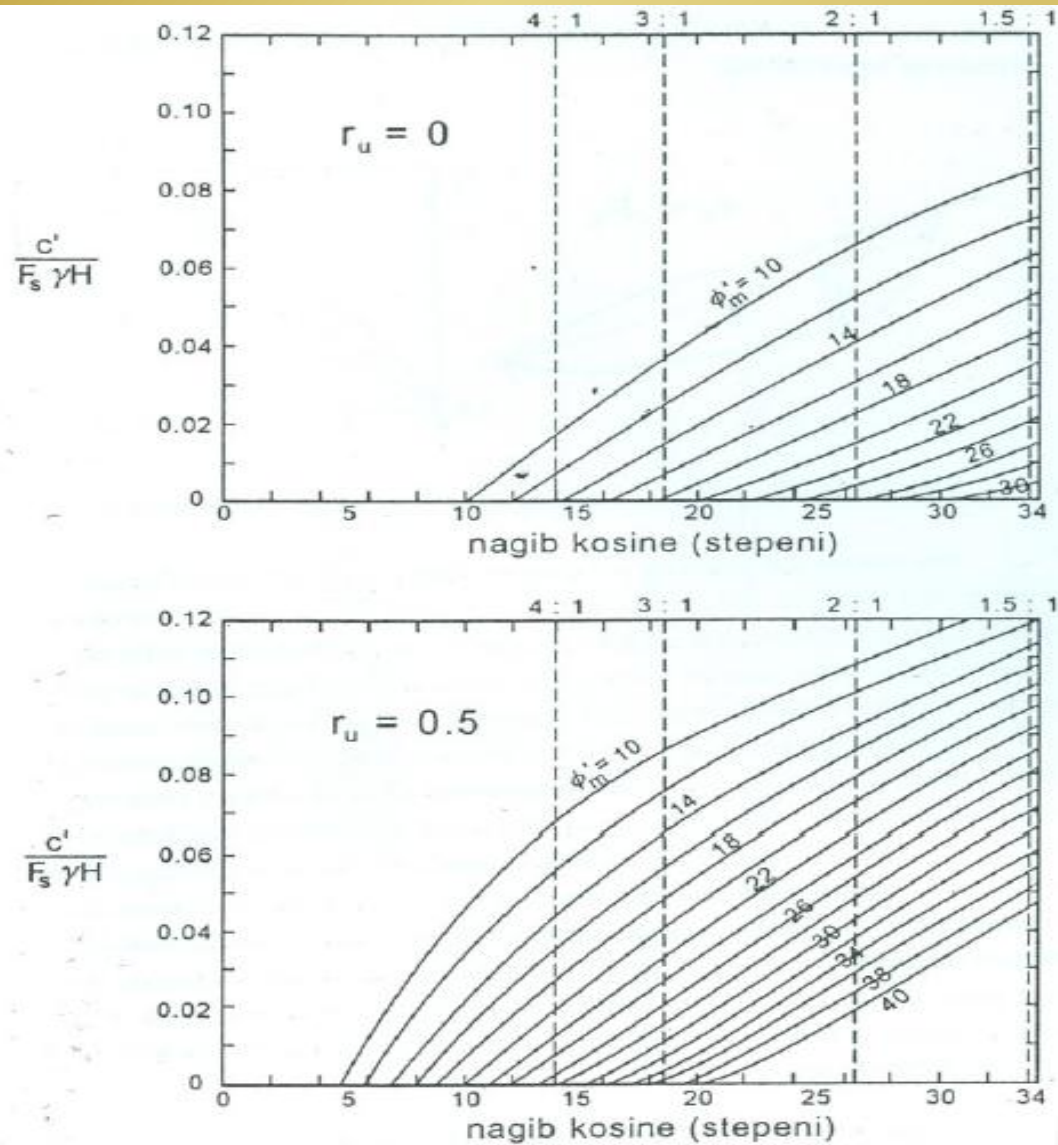
Slika 10.11. Komparativni proračuni stabilnosti

Mnoga rušenja kosina nakon intenzivnih padavina, neposredno poslije poplava ili topljenja snijega, mogu se objasniti jedino nepostojanjem prividne kohezije za efektivne napone, odnosno zakrivljenošću anvelope napona loma.

Neka rješenja za jednostavne kosine

Veoma često se problemi stabilnosti kosina mogu svesti na relativno jednostavne slučajeve, uz pretpostavku o linearnom zakonu loma, za koje je dat veći broj rješenja (Gibson i Morgenstern 1963, Hunter i Šuster 1968).

Tabele i dijagrami za proračun stabilnosti zemljanih masa mogu se upotrijebiti u onim slučajevima kada se aproksimacija realnog problema može pouzdano izvesti na takav način da su zadovoljeni uslovi za koje je rješenje dato.



Slika 10.13. Spenserovi dijagrami za proračun stabilnosti kosina

4.2. Proračunske situacije

4.2.1. Stabilnost tokom i neposredno nakon izgradnje

U projektantskoj se praksi mogu provjeriti granični slučajevi provođenjem analiza za potpuno drenirane i za idealno nedrenirane uslove.

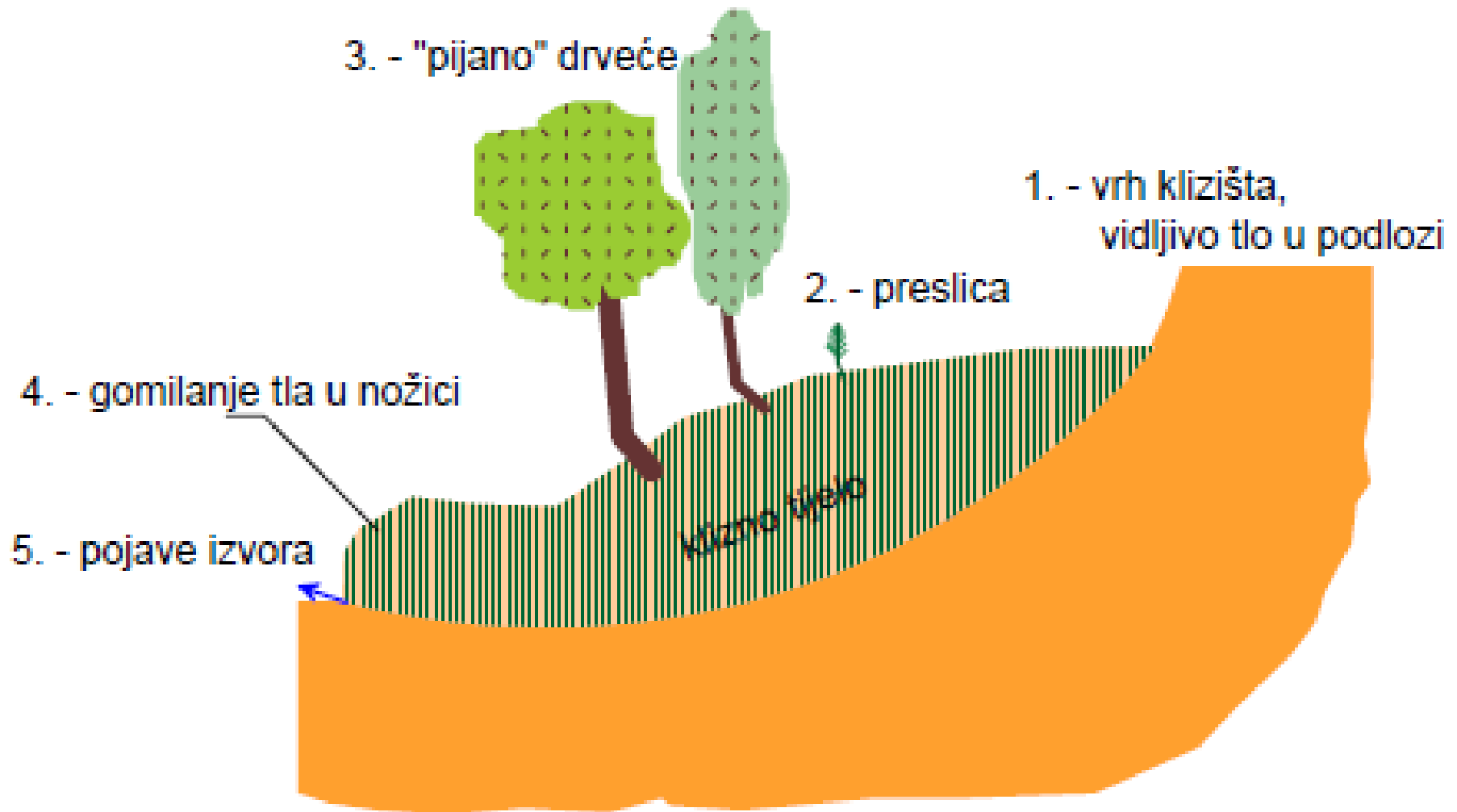
4.2.2. Stabilnost u dugotrajnim (stacionarnim) uslovima

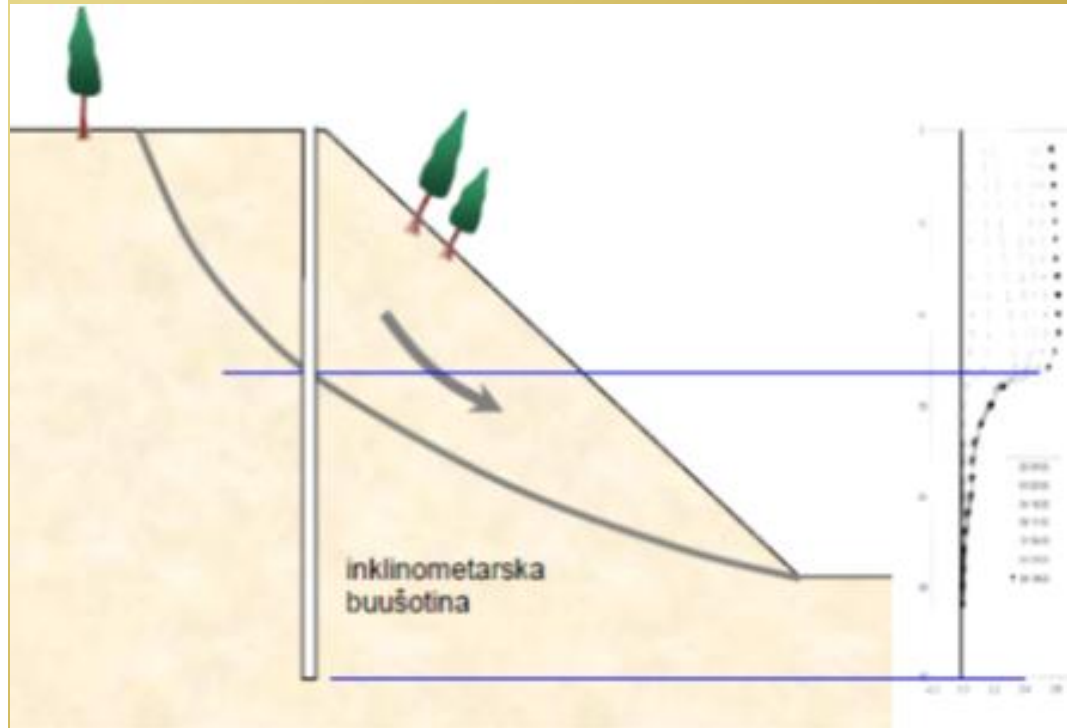
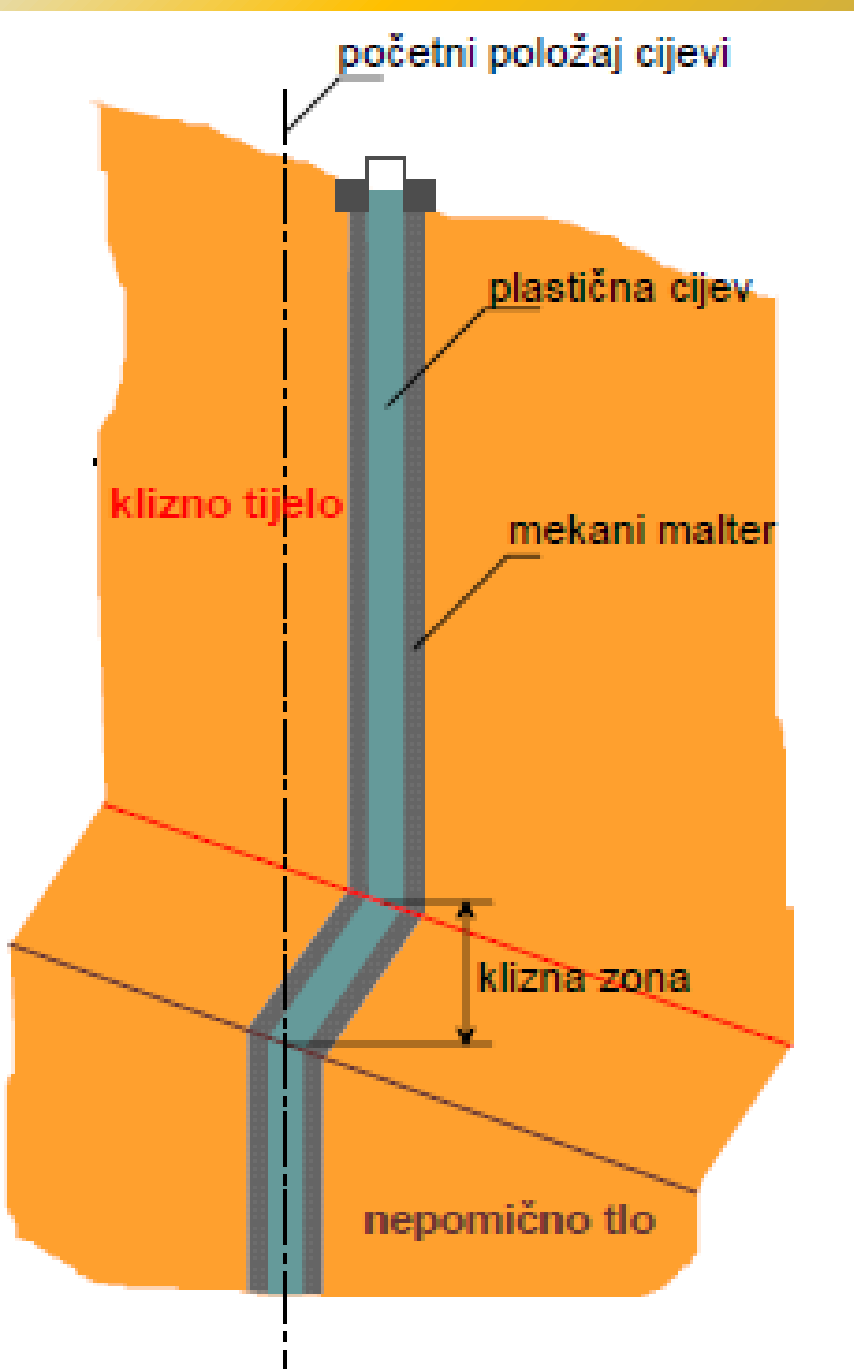
Stabilnost u dugotrajnim stacionarnim uslovima najčešća je proračunska situacija u praksi.

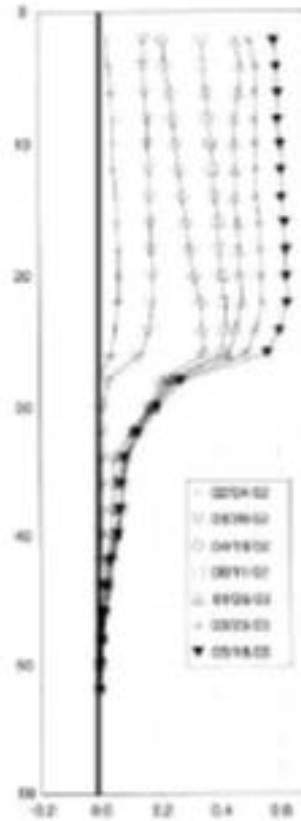
4.2.3. Naglo sniženje podzemne vode

5. Metode stabilizacije kosina

Opažanja i istraživanja na klizištu







ZA SMIRENJE NASTALOG KLIZIŠTA PRIMJENJUJU SE MJERE:

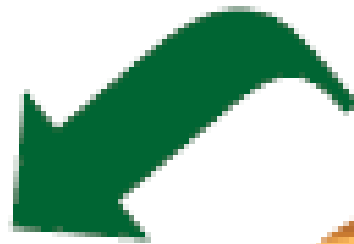
A/ Smanjenje posmičnih naprezanja u kosini:

- Povoljnim skretanjem strujnog pritiska pomoću dreniranja (kopani ili bušeni drenovi)
- Snižanjem nivoa podzemne vode u kosini
- Rasterećenje gornjeg, aktivnog dijela klizišta
- Opterećenje donjeg, pasivnog dijela klizišta
- (potpornim konstrukcijama)
- (ugradnjom pilota(šipova) velikog promjera)

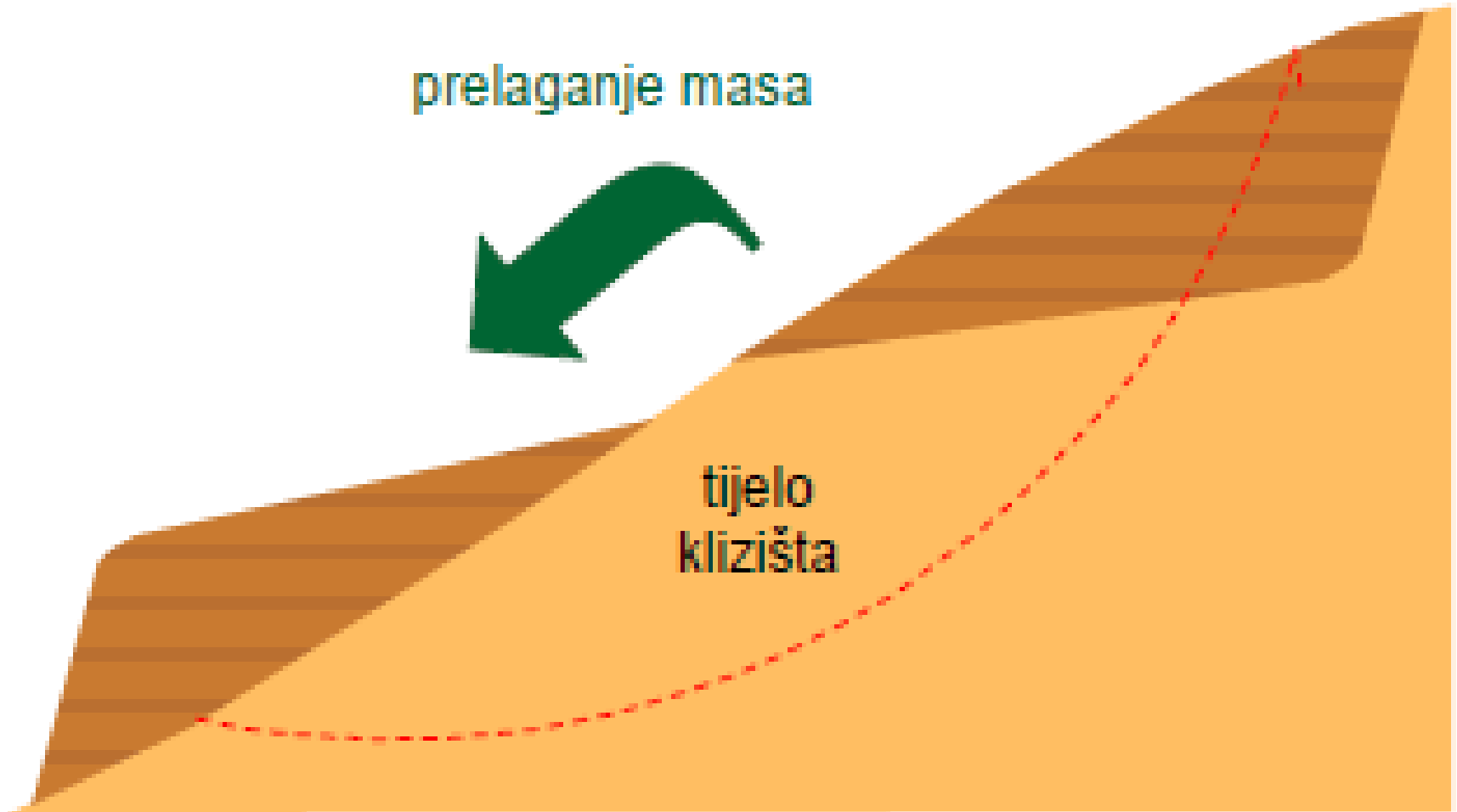
B/ Povećanje čvrstoće materijala u zoni klizišta:

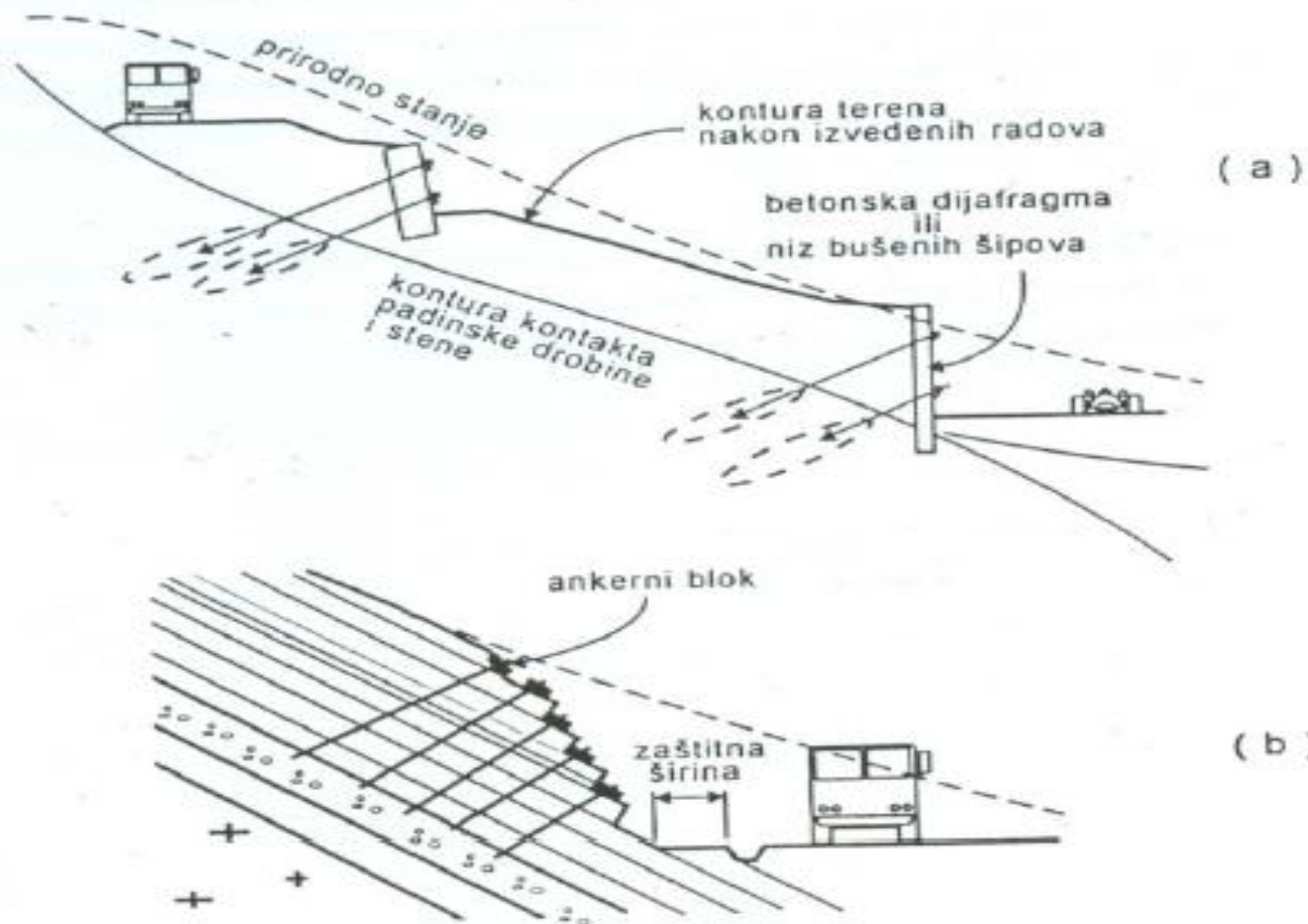
- opterećenje donjeg, pasivnog dijela klizišta
- povećanje efektivnih naprezanja
- posebni postupci (injektiranje, elektrohemijski postupci, termički postupci i sl.)

prelaganje masa

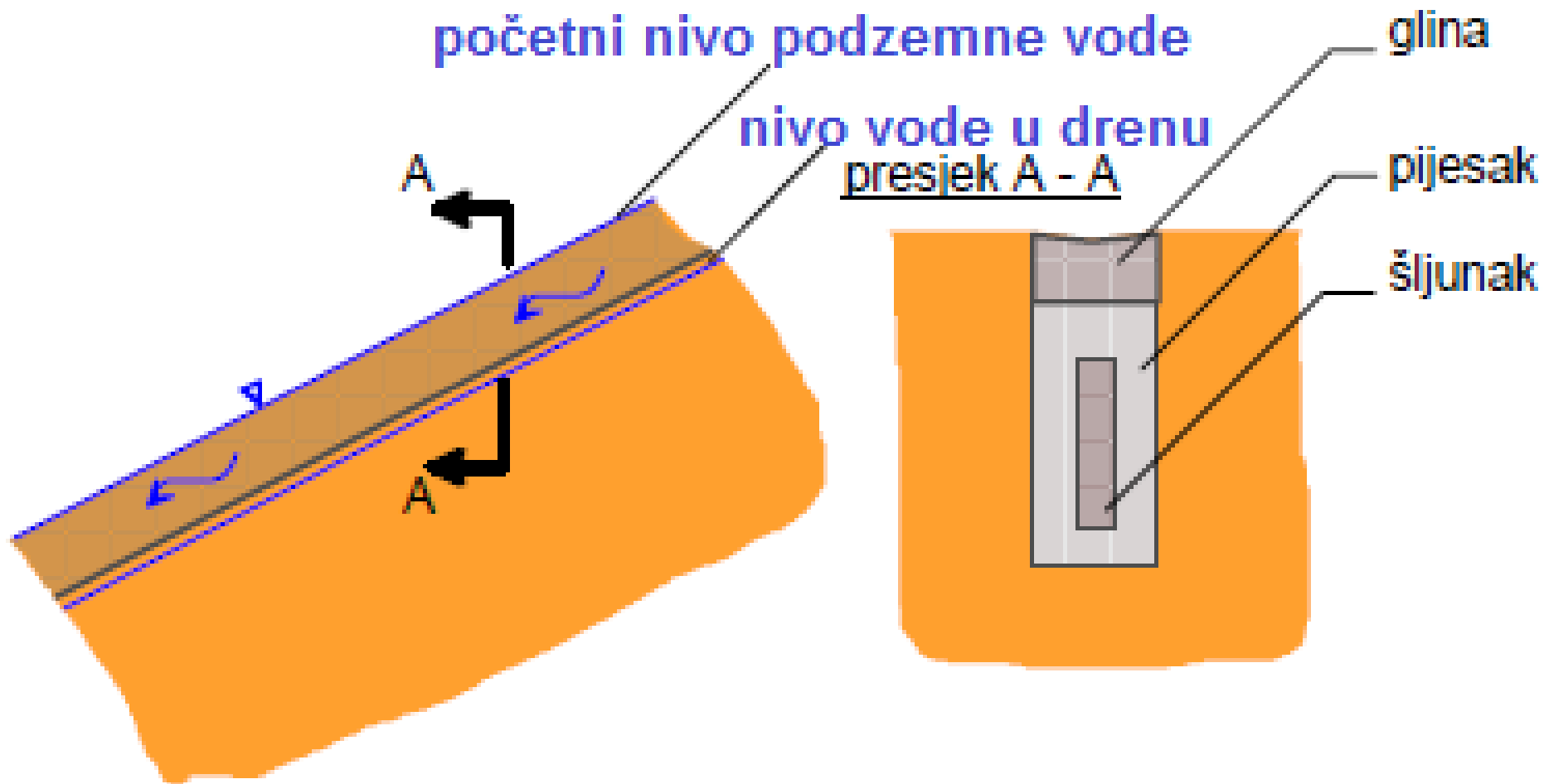


tijelo
klizišta

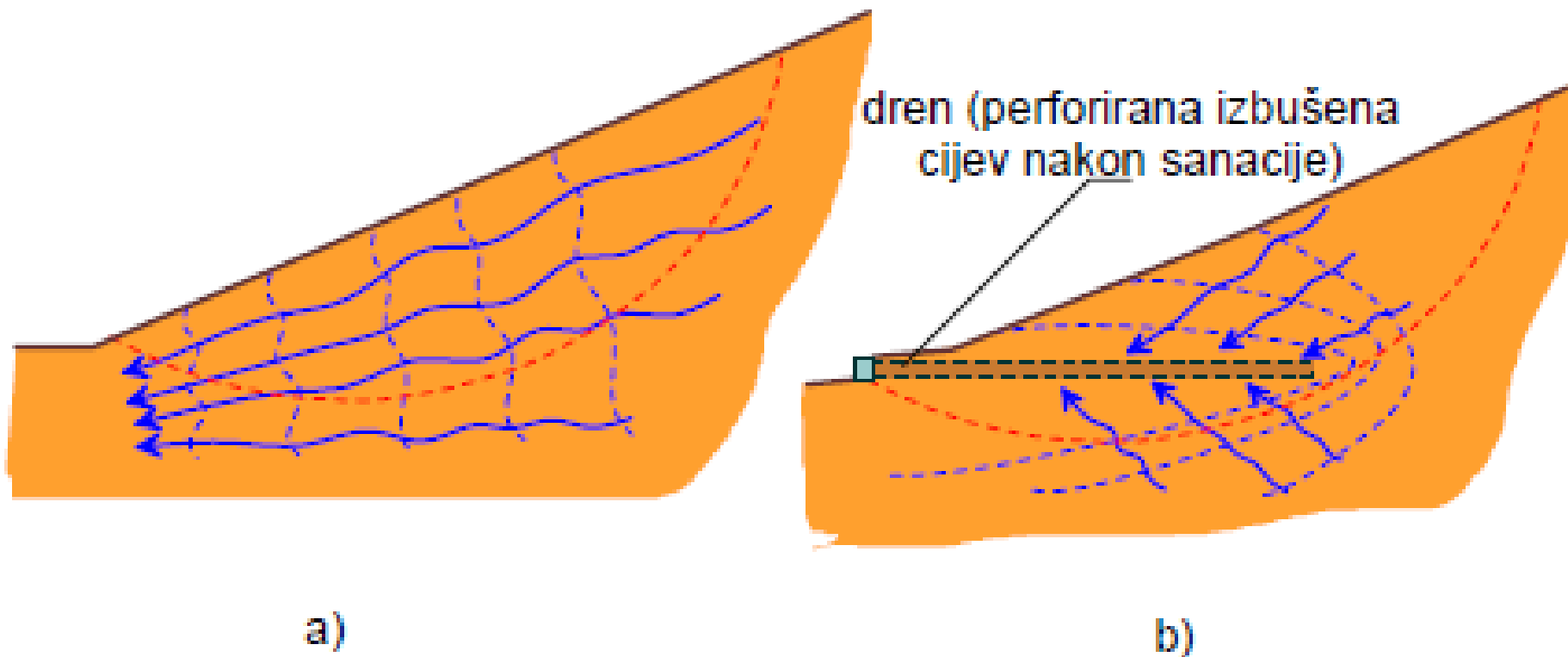




Slika 10.29. Sidrene potporne konstrukcije



Sanacija klizišta drenažnim usjecima



Sanacija klizišta horizontalnim drenažnim bušotinama

Kriterijumi stabilnosti

Prihvatljiv faktor sigurnosti zavisi od većeg broja faktora, u koje treba, osim pouzdanosti rezultata proračuna, ubrojati rizik, hazard i ekonomske posljedice.

Rezultati nekih metoda statističke analize, primjenjene na probleme stabilnosti zemljanih masa u geotehničkom inženjerstvu sugerišu da je vjerovatnoća rušenja ili loma značajniji i pogodniji pokazatelj od faktora sigurnosti F_s .

Izuzetnu važnost treba dati iskustvenim i sistematizovanim saznanjima u pojedinim lokalitetima.

Neki korisni koncepti

Sa praktične i teorijske tačke gledišta korisni su sljedeći koncepti:

- Koncept ekvivalentnog bloka
- Otpornosna anvelopa smičuće čvrstoće
- Metoda povratne analize
- Teorija neutralne linije
- Kritično seizmičko ubrzanje

Ekvivalentni blok

Koncept ekvivalentnog bloka podrazumjeva da je metodom granične ravnoteže određen raspored normalnih napona i mobilisanih smičućih napona po konturi kliznog tijela koje je opterećeno i eventualnim spoljnim opterećenjem i inercijalnim seizmičkim silama.

Uslovi ravnoteže za klizno tijelo ograničeno proizvoljnom linijom klizanja u ravni se mogu napisati u vektorskom obliku:

$$W + U + N' + T + Q + Z = 0$$

gdje je: W ukupna težina hipotetičkog kliznog tijela, U rezultanta pornih pritisaka,

N' rezultanta efektivnih normalnih napona na kliznoj površi,

T rezultanta smičućih napona na kliznoj površi, Q rezultanta spoljnih opterećenja,

Z rezultanta seizmičkih sila koje djeluju na klizno tijelo.

Aproksimativna veličina ugla nagiba kose ravni statički ekvivalentnog bloka, sa dovoljnom tačnošću za praktičke potrebe, se može izraziti u obliku:

$$\beta = \arctg(T / N) = \arctg(N' / T)$$

Prosječni efektivni normalni napon na kliznoj površi je jednostavno srednja vrijednost integrala izražena u numeričkom obliku po lamelama:

$$\sigma'_{n,sr} = \sum_n (\sigma'_n l) / L$$

a prosječan smičući napon je:

$$\tau_{sr} = \sum_m (\tau_m l) / L$$

gdje je $L = \sum l$ dužina luka klizne površi.

Otpornosna anvelopa

Jedna od odlika ovog koncepta je da se po njemu može provesti analiza stabilnosti bez unaprijed poznatih parametara smičuće čvrstoće tla homogene kosine, ali se osim geometrije presjeka, mora znati respodjela pornih pritisaka, ukoliko se želi izvršiti analiza u efektivnim naponima.

To znači da za datu kosinu i raspodjelu pornih pritisaka postoji jedinstvena otpornosna anvelopa u (σ', τ) dijagramu za efektivne napone i (σ, τ) za totalne napone, koja ne zavisi od stvarnih parametara smičuće čvrstoće, tako da se otpornosna anvelopa može koristiti za analizu posljedica primjene kako linearne, tako i nelinearne anvelope napona loma tla.

Tabela. 10.1 Uobičajene projektne vrđnosti minimalnih faktora sigurnosti pri visokoj pouzdanosti parametara.

Slučaj	Parametri	$F_S(\text{min})$
Nasip na čvrstoj i malo deformabilnoj podlozi	ϕ', c' ili $\phi'_B, \Delta\phi', p_N$	1.4
Nasip na slabo-nosivom zasićenom tlu	ϕ', c' ili $\phi'_B, \Delta\phi', p_N$ c_u	1.4 1.4-2.0 +
Usek u zasićenim glinama	ϕ', c' ili $\phi'_B, \Delta\phi', p_N$ c_u	1.4 1.4-2.0
Usek u krupnozrnom tlu	ϕ' ili $\phi'_B, \Delta\phi', p_N$	1.2
Prirodno nestabilna padina	$\phi'_r, c'_r \approx 0$ ili $\phi'_w, \Delta\phi'_r, p_{N,r}$	1.1*
Uzvodna i nizvodna kosina nasute brane, puna akumulacija	ϕ', c' ili $\phi'_B, \Delta\phi', p_N$	1.5
Uzvodna kosina nasute brane brzo spuđtanje nivoa vode	ϕ', c' ili $\phi'_B, \Delta\phi', p_N$	1.3-1.4

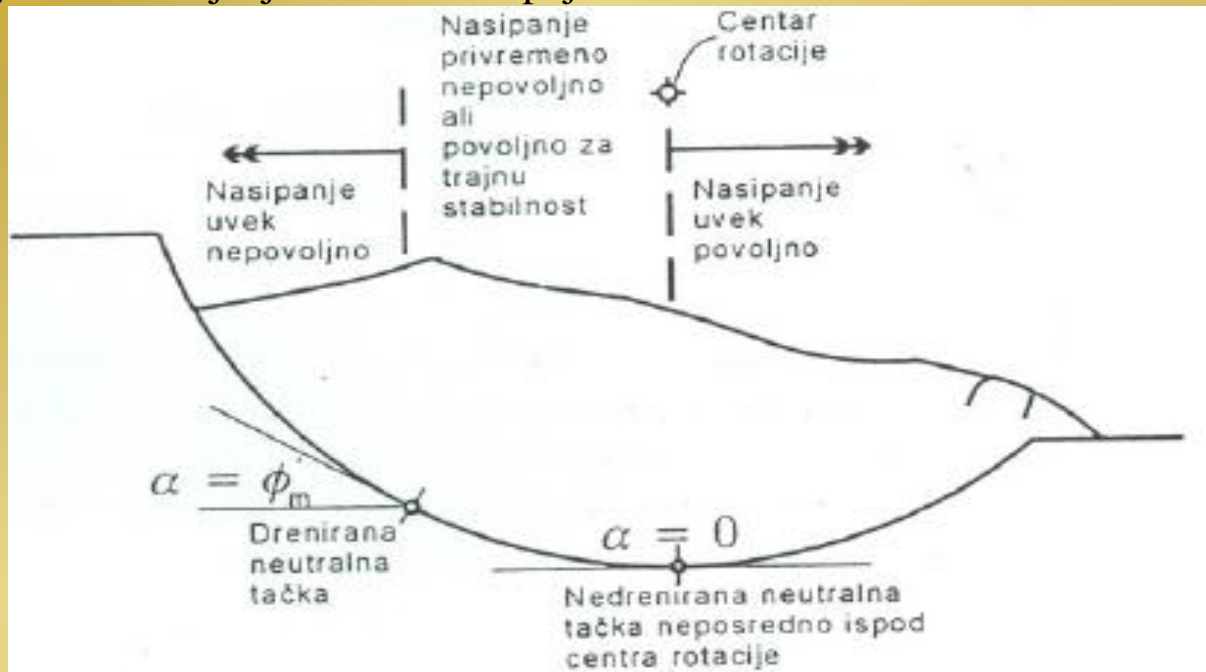
Povratna analiza

Analiza stabilnosti se ne vrši samo da bi se dobio faktor sigurnosti za poznate parametre tla, već i radi određivanja parametara čvrstoće pri lomu ukoliko je došlo do pojave nestabilnosti mase tla, kako bi se na racionalan način projektovali i izveli stabilizacioni radovi.

Ako je poznato da je pri rušenju $F_S = 1$, traže se parametri koji odgovaraju ovoj realno konstatovanoj situaciji.

Teorija neutralne linije

Ovaj koncept je koristan za procjenu efekata stabilizacionih mjera pri promjeni konture presjeka nestabilne mase tla nasipanjem ili uklanjanjem mase tla u pojedinim zonama.



Slika 10.20. Neutralne linije za kružno cilindričnu kliznu površ

Za svaki presjek kliznog tijela mogu se definisati dvije tačke, koje razgraničavaju pozitivne od negativnih efekata nasipanja ili usijecanja kosine po stabilnost kliznog tijela za nedrenirane i drenirane uslove. Ako se može naći niz takvih tačaka u presjecima, njihovim spajanjem u planu, dobijaju se odgovarajuće neutralne linije.

Kritično ubrzanje

Neki autori smatraju da je za uslove seizmičkog opterećenja, veličina horizontalnog seizmičkog ubrzanja, tzv. kritično ubrzanje k_c , koje daje veličinu faktora sigurnosti $F_S = 1$, bolji pokazatelj stabilnosti od veličine faktora sigurnosti za neko dato seizmičko ubrzanje.

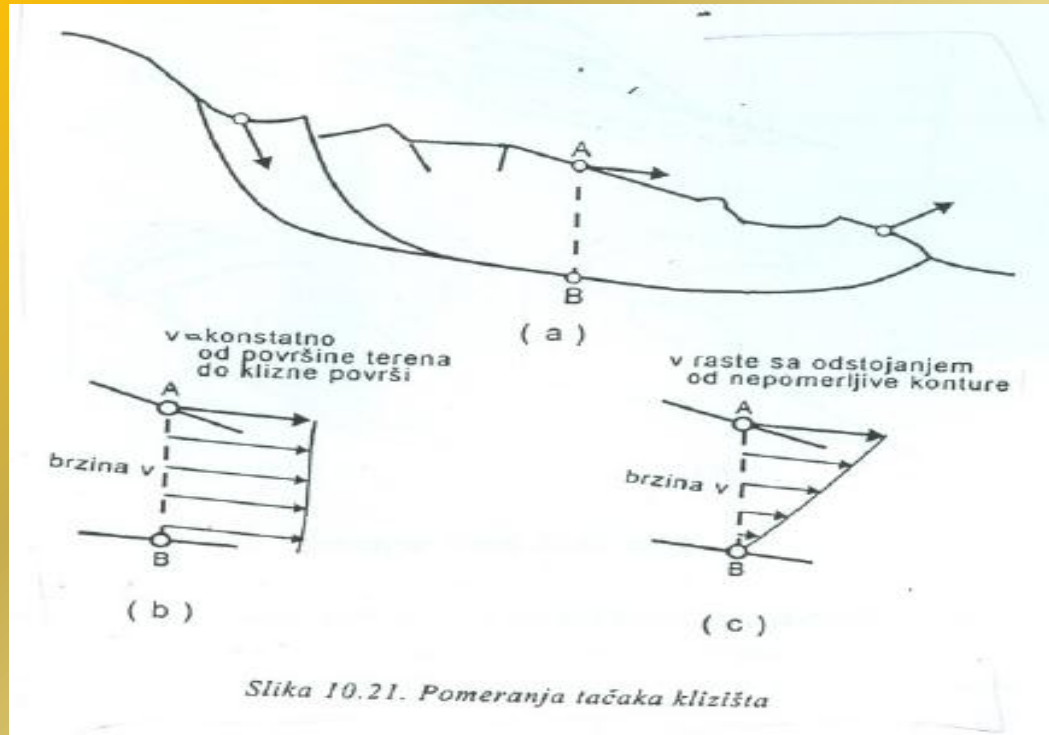
Karakteristični slučajevi (ne)stabilnosti kosina

Stabilnost prirodnih padina

Mnogo je padina u prirodi koje su u stanju bliskom graničnoj ravnoteži. Neravnoteža sila u masi tla na prirodnoj padini može nastati usljed jednog ili više istovremenih faktora.

U toku planiranja različitih građevinskih radova na padinama mora se provjeriti uticaj planiranih zahvata na stabilnost prirodne padine.

Duboka puzanja starih klizišta



Stabilnost se analizira u efektivnim naponima i parametrima čija je veličina bliska karakterističnim vrijednostima rezidualne smičuće čvrstoće.

Stabilizovanje kosina često ne znači i potpuno zaustavljanje kretanja mase tla; često se efekat stabilizacionih mjera ogleda samo u smanjenju brzina pomjeranja na manje ili više prihvatljivu mjeru u konkretnim okolnostima.

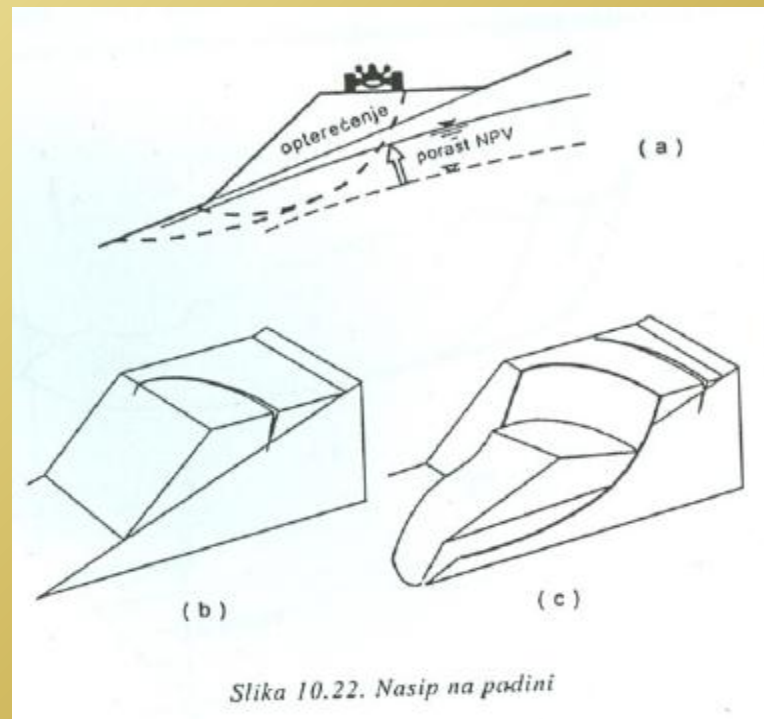
Nasipi saobraćajnica

Kolovozna konstrukcija ili željeznička pruga može se neželjeno deformisati i iznad prihvatljivih tolerancija zbog nedopustivih pomjeranja podloge na kojoj je izvedena.

Razlozi za štetne pojave ove vrste mogu biti dvojaki – ili neadekvatnost posteljice neposredno ispod kolovozne konstrukcije, odnosno zastora, ili nestabilnost većih zapremina tla u području saobraćajnice i temeljnog tla.

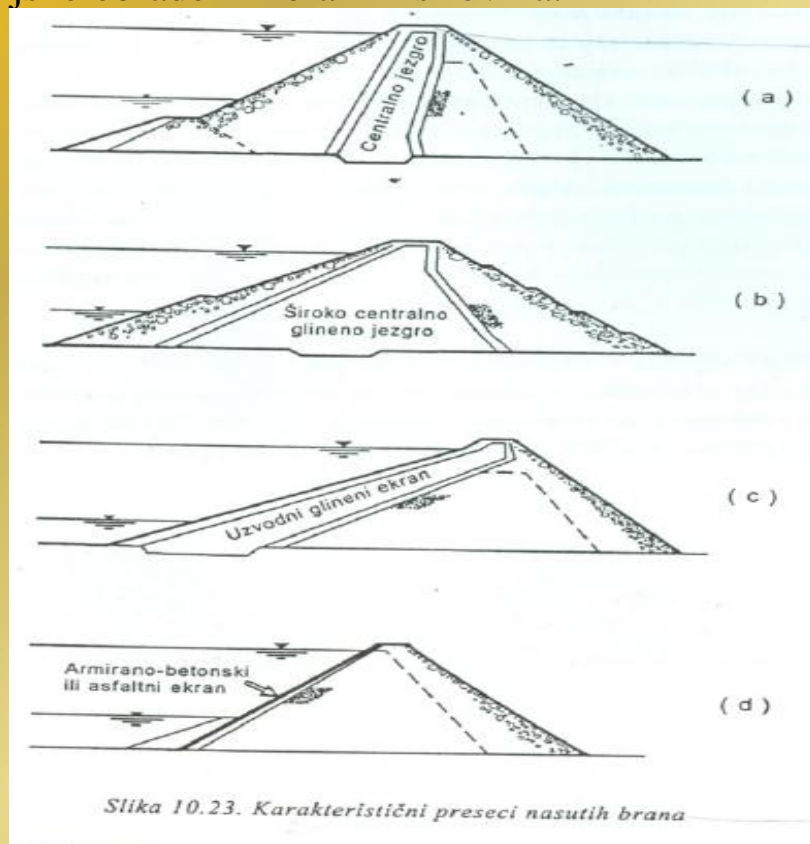
Nasip na padini

Uslovi nestabilnosti se pojavljuju iz najmanje dva razloga – usljed povećanja opterećenja prirodne padine novim opterećenjem od tijela nasipa i usljed izmjenjenih uslova deniranja i evaporacije vlage iz padine, što može izazvati povećanje pornih pritisaka.



Nasute brane i hidrotehnički nasipi

se grade od lokalnih sitnozrnih i krupnozrnih materijala, uključujući i kameni nabačaj, radi privremenig ili trajnog formiranja uspora vode ili žitkih hidraulički transportovanih materijala nastalih u procesu sagorjevanja uglja ili flotacijske obrade mineralnih sirovina.



Svaka nasuta brana je jedinstven inženjerski projekat koji je, primjenom raspoloživih materijala, u najvećoj mogućoj mjeri prilagođen lokalnim uslovima uz ispunjevanje odgovarajućih projektnih kriterijuma.

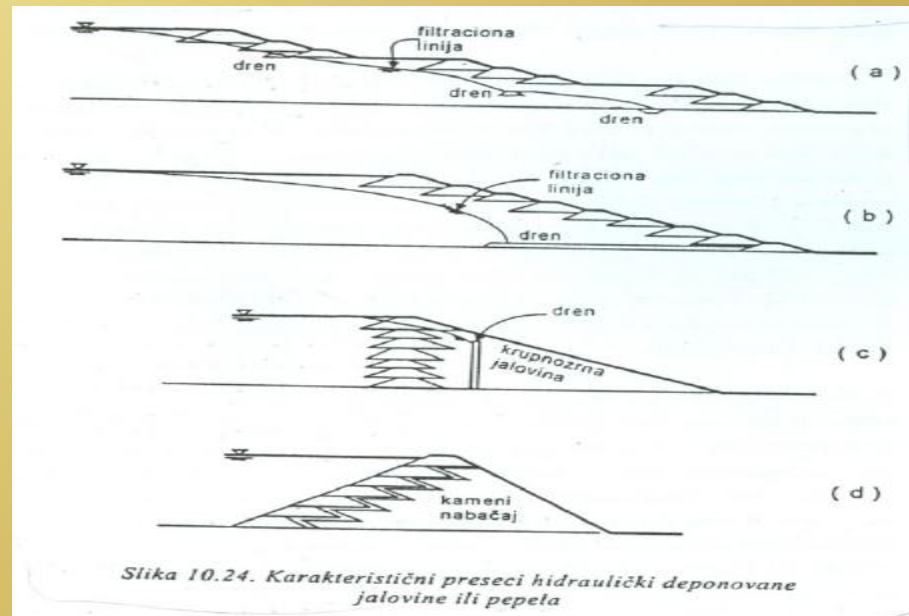
Osim filtracione stabilnosti, koja se zadovoljava odgovarajućim zaptivnim i drenažnim mjerama, i potrebne zaštitne visine krune brane iznad maksimalnog nivoa uspora, koja obezbjeđuje nasutu branu od preliivanja i proističe iz

hidroloških analiza, za kosine nasutih brana se u načelu vrše proračuni stabilnosti za tri karakteristična stanja:

- Stabilnost u toku i na kraju građenja.
- Stabilnost uzvodne kosine pri brzom spuštanju nivoa vode u akumulaciji može biti kritična ukoliko je uzvodni, prethodno zasićen dio brane, izgrađen od manje vodopropusnog materijala, tako da zaostala voda ostaje pod izvjesnim porem pritiskom.
- U uslovima pune akumulacije ispituje se uzvodna i nizvodna kosina.

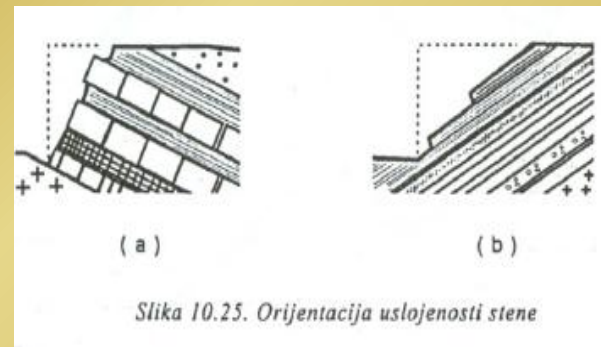
Odlagališta pepela i flotacijske jalovine

su specifični objekti, često veoma velikih dimenzija u osnovi i znatne visine, nastali hidrauličkim odlaganjem otpadnih materijala pri sagorjevanju uglja u termoelektranama, odnosno flotacijskim postrojenjima za izdvajanje metala iz rude.



Kosine usjeka u stijenskim materijalima

Stabilnost kosine usjeka u stijeni zavisi od orijentacije diskontinuiteta u odnosu na lice kosine, parametara čvrstoće stijene i diskontinuiteta, visine kosine i prisustva vode.



Stabilnost kosina u stijeni dokazuje se posebnim analizama i proračunima po metodama mehanike stijene, koje su potpuno analogne metodi granične ravnoteže u mehanici tla, kada minimalni dopušteni faktor sigurnosti iznosi tipično $F_S = 1.5$.

U načelu, smičuća čvrstoća stijenske mase se opisuje sljedećim izrazom:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \operatorname{tg}(\varphi'_B + \delta\varphi')$$

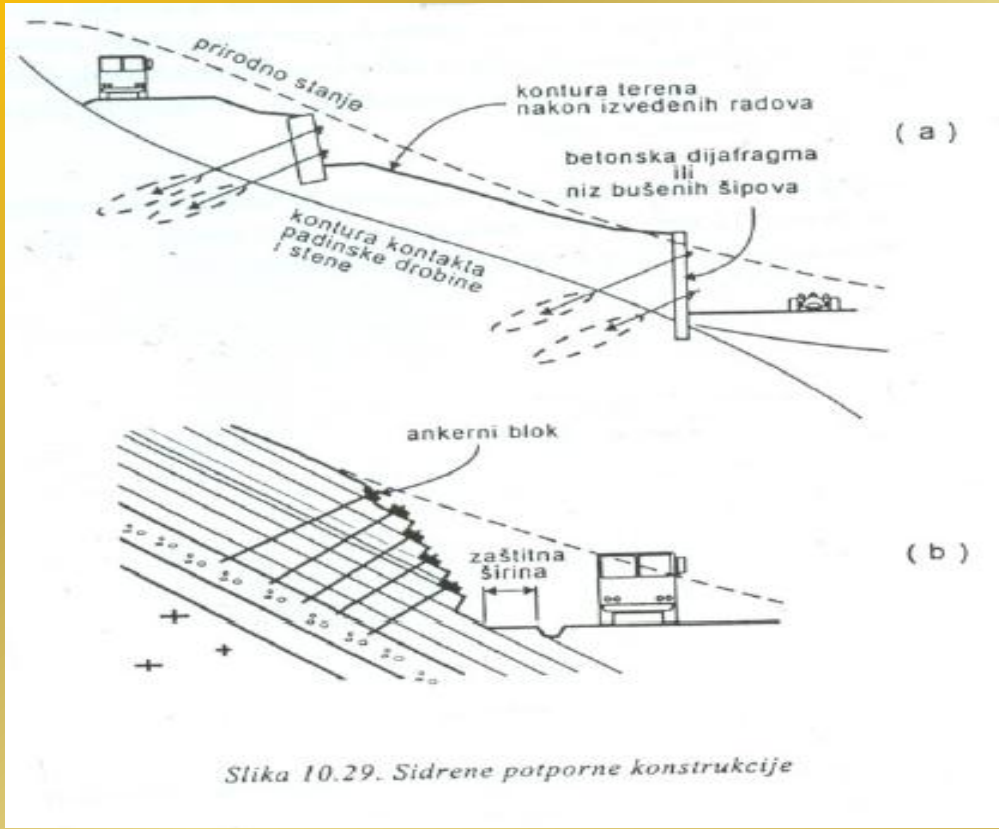
gdje je:

c' kohezija koja je veća od nule u slučaju intaktnog uzorka stijene i zavisi u najvećoj mjeri od pritisne čvrstoće. Računska vrijednost može imati pozitivnu vrijednost i u slučaju ispucalih stijenskih masa sa haotično orijentisanim diskontinuitetima. Ova veličina je jednaka nuli za ravno smicanje po diskontinuitetima;

φ'_B bazni ugao trenja koji zavisi od vrste stijene, odnosno od vrste ispune u diskontinuitetima, i može se kretati u

granicama od oko 5° do 35° ;

- Primjena šipova;



Slika 10.29. Sidrene potporne konstrukcije

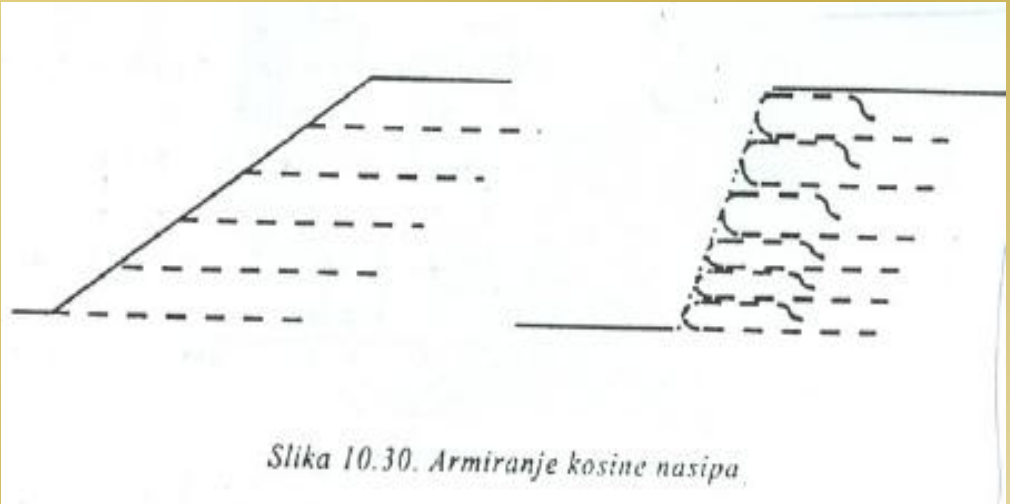
- Obložne konstrukcije;

- Ojačavanje mase tla vještačkim materijalima;

- Tretiranje tla;

- Elektro-osmoza;

- Pasivne mjere



Slika 10.30. Armiranje kosine nasipa

Izbor računskih parametara

Različite metode za stabilizovanje kosina se mogu istovremeno primjenjivati i kombinovati na takav način da se u svakom konkretnom slučaju postignu optimalna rješenja.

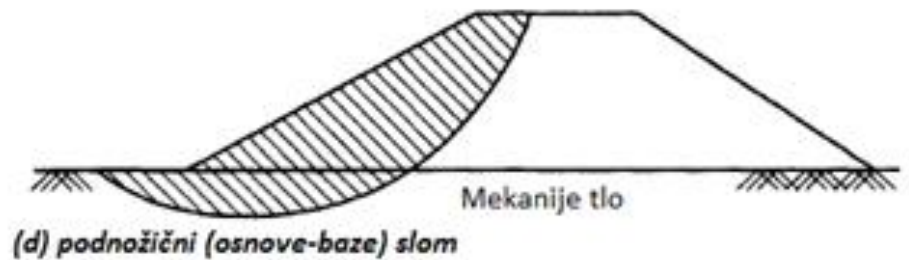
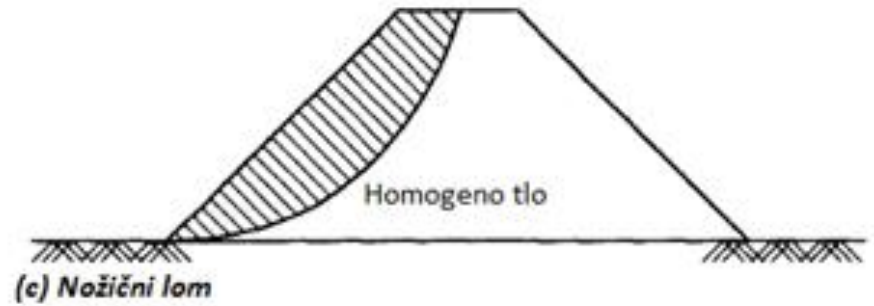
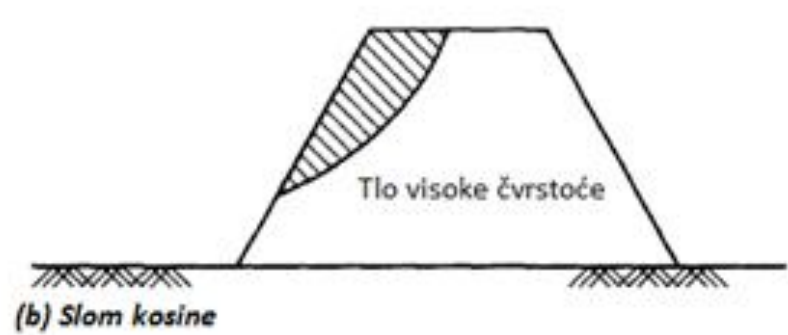
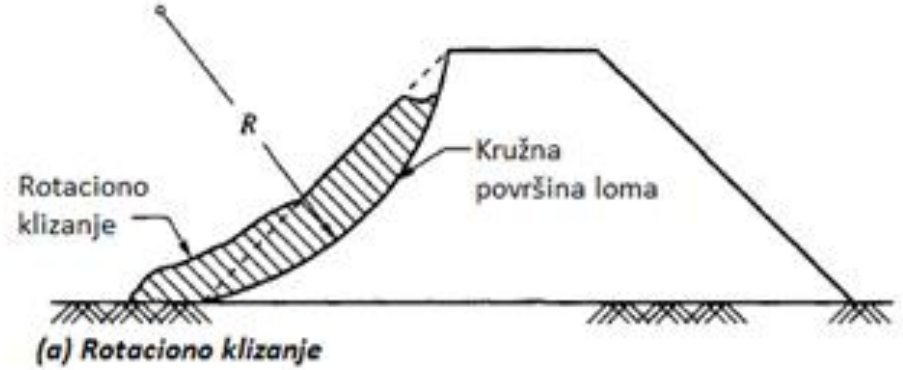
Prije preduzimanja mjera stabilizacije usvajaju se projektni kriterijumi i parametri, a zatim se svaka od primjenjenih mjera, sama ili u kombinaciji sa drugim mjerama, prvo vrednuje po tehničkim pokazateljima a zatim po ekonomskim.

Optimalna varijanta je ona koja postavljene kriterijume zadovoljava sa minimalnom cijenom.

Ograničenja

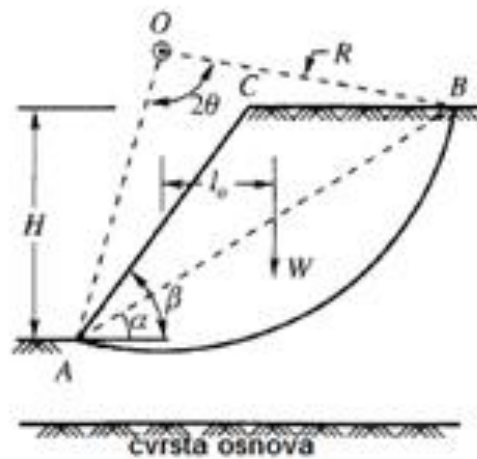
Ovdje je prikazana praktična metoda granične analize za određivanje mjere stabilnosti kosina. Osim takvog prilaza problemu, koriste se i metode naponsko-deformacione analize, od kojih metode konačnih elemenata imaju širu primjenu u građevinarstvu i tehnici uopšte.

DODATAK

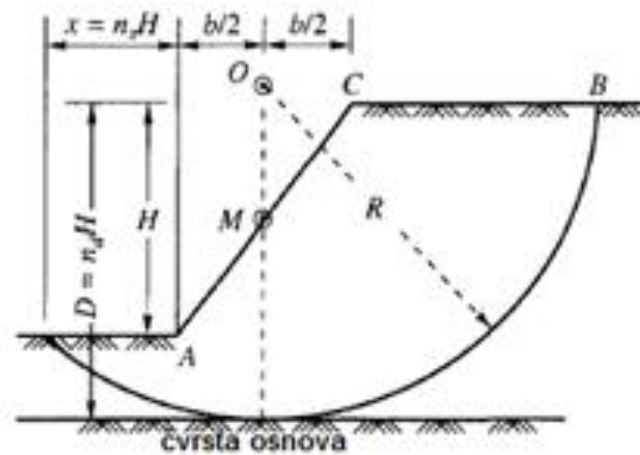


Slika: Tipovi loma zemljanih brana

NEDRENIRANI USLOVI

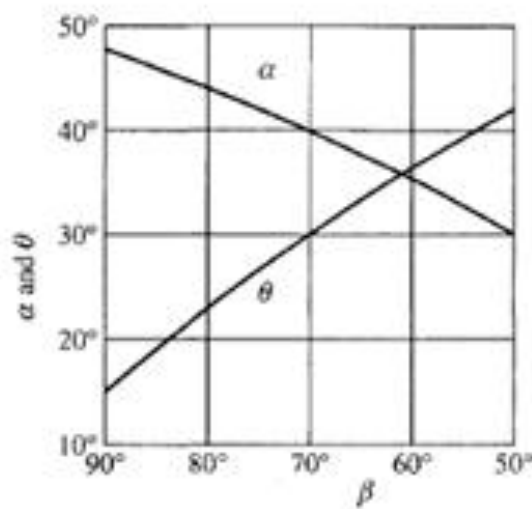


(a) Nožični lom

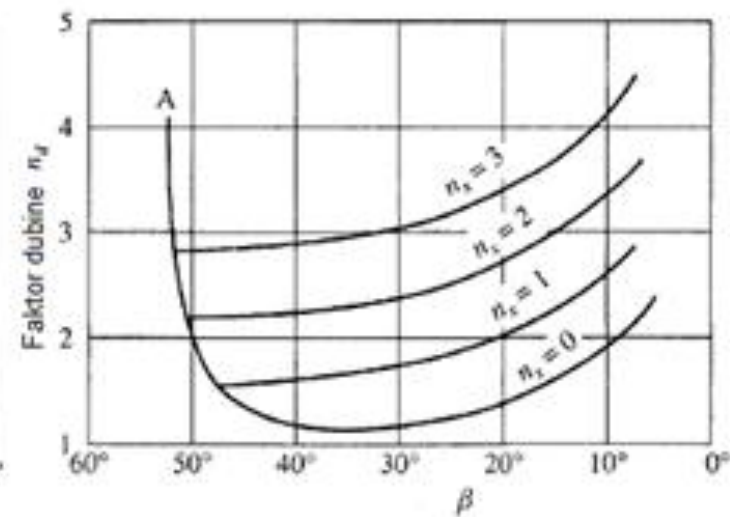


(b) Podnožični lom

Pozicija kritičnih krugova loma

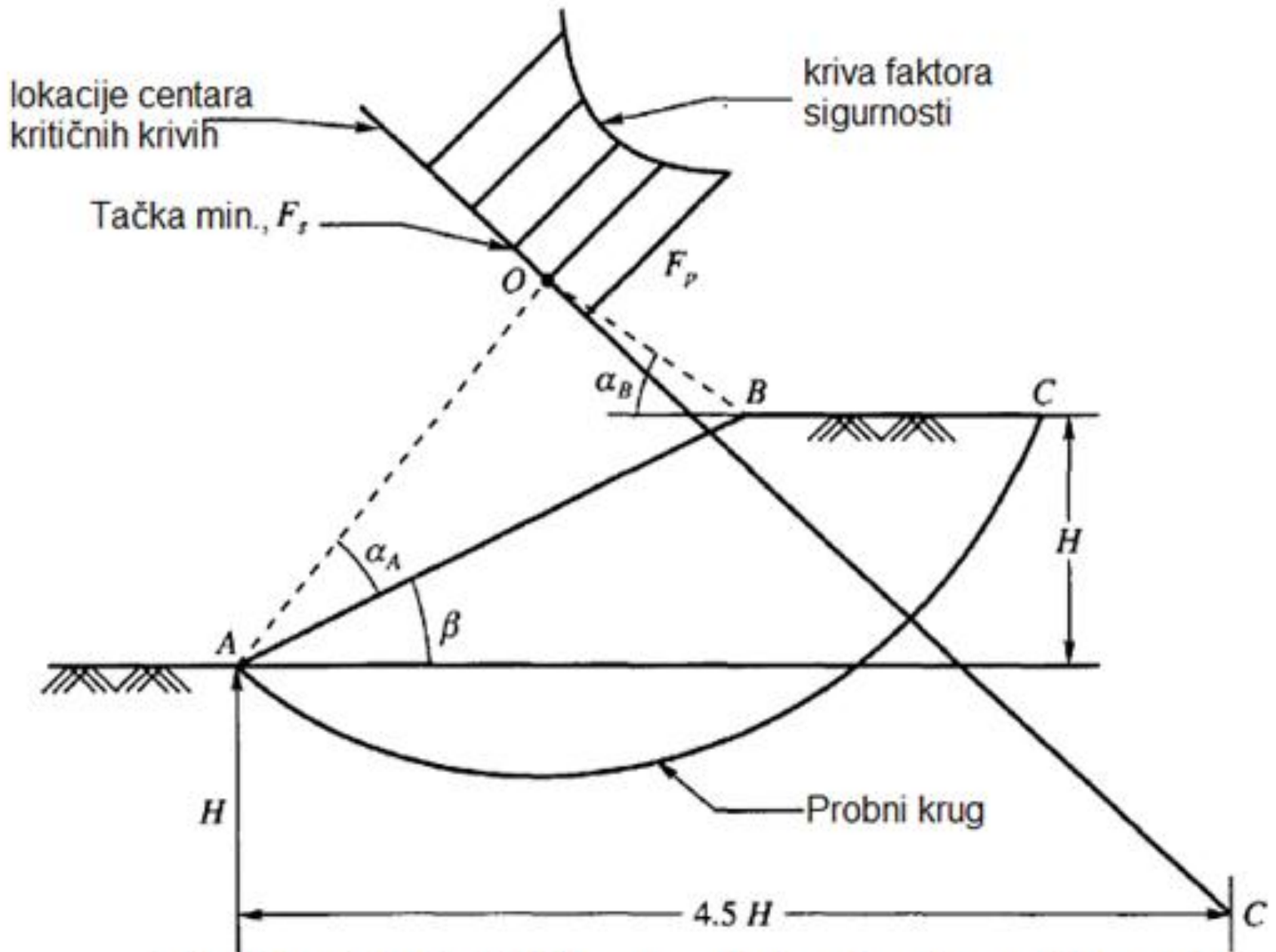


(a)

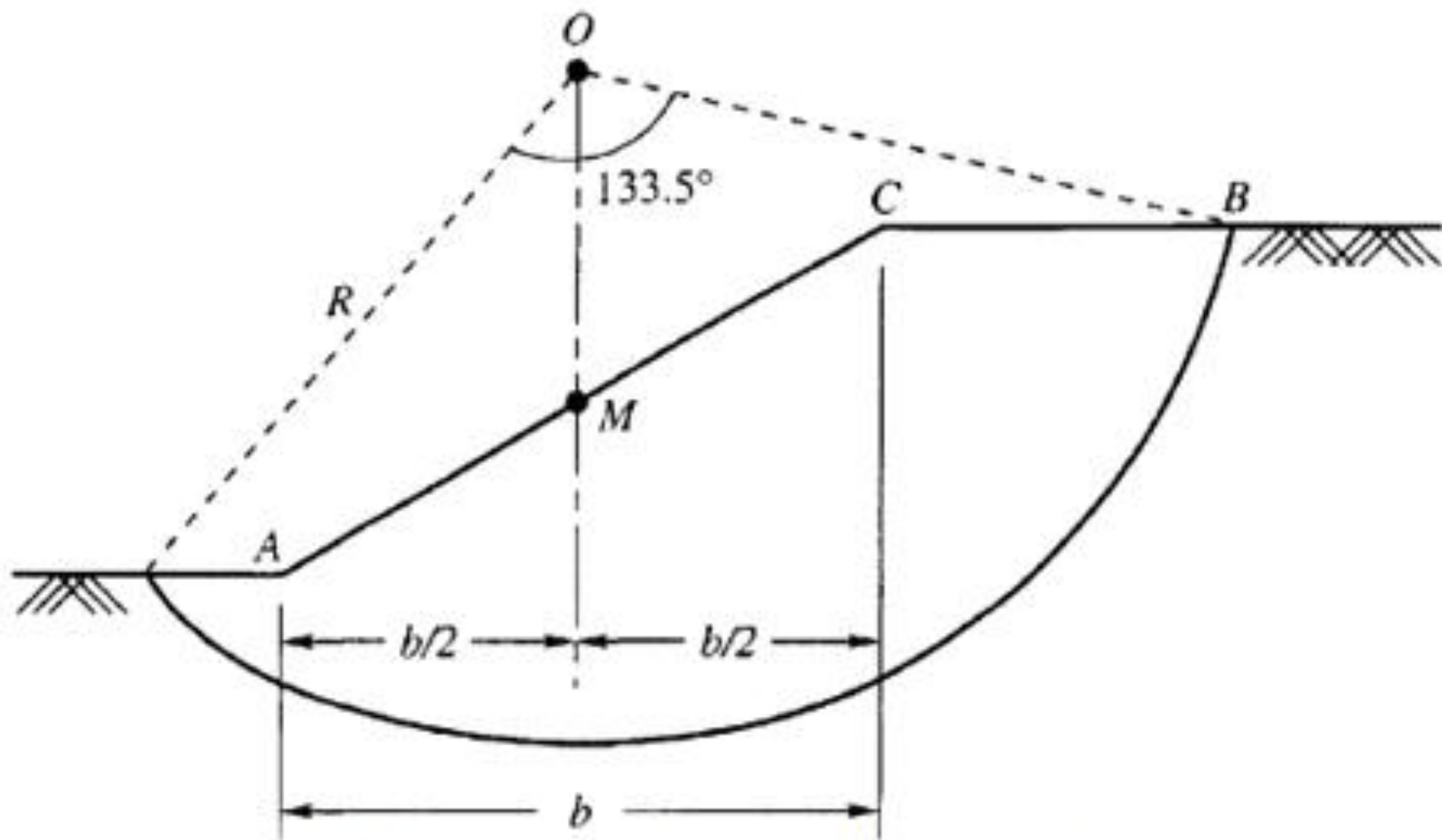


(b)

$$F_s = \frac{c_m}{c_m} \quad c_m = \frac{W l_o}{L_o R}$$



Lokacija centara kritičnih krugova koji prolaze kroz nožicu nasipa



Centri probnih krivina podnožičnog(baznog) loma

Uglovi smjera α°_A i α°_B za centre kritičnih krugova

kosina	ugao kosine β	uglovi smjera	
		α°_A	α°_B
0.6 : 1	60	29	40
1 : 1	45	28	37
1.5 : 1	33.8	26	35
2 : 1	26.6	25	35
3 : 1	18.3	25	35
5 : 1	11.3	25	37