

**Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet**

Preddiplomski studij

GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

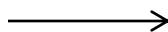
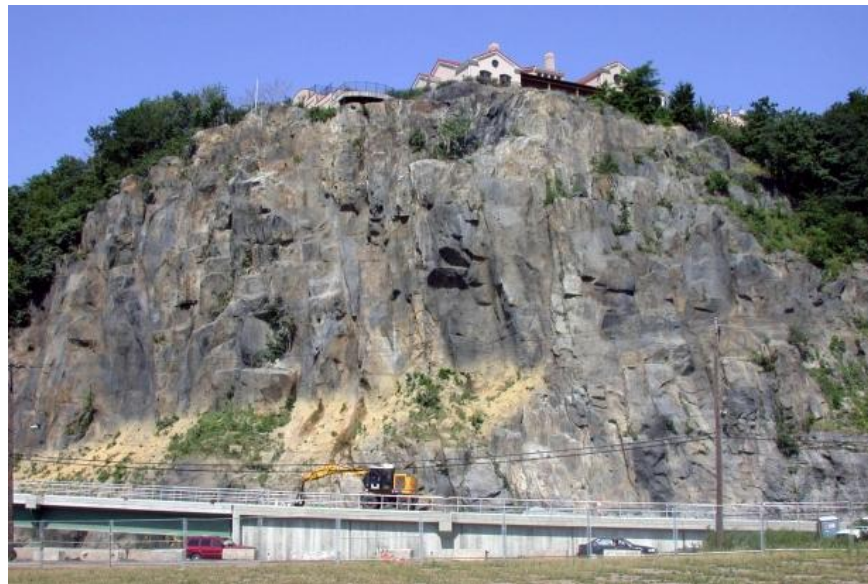
10. predavanje

Stabilnost stijenskih pokosa

- Problem stabilnosti prirodnih i umjetnih stijenskih pokosa predstavlja jedan od glavnih problema u geotehničkoj praksi.
- Koncept stabilnosti padine nije u potpunosti određen, jer niti za jednu padinu u stijenskoj masi ili tlu ne može se u potpunosti garantirati stabilnost tijekom njezinog korištenja u dužem vremenskom periodu.
- Osim u geotehničkoj praksi, stabilnost stijenskih pokosa je od ključne važnosti i u rudarstvu pri izvođenju otvorenih iskopa mineralnih sirovina.
- Bitna razlika kod stabilnosti pokosa u geotehnici ili rudarstvu je u činjenici da se u geotehnici zahtijeva veći stupanj pouzdanosti i da se potencijalni slomovi stijenske mase rijetko mogu tolerirati. Kod otvorenih iskopa, pomaci stijenske mase su dozvoljeni u slučaju da ne ometaju daljnji iskop rude.

- Nadalje, položaj zasjeka u otvorenim kopovima određen je položajem mineralne sirovine, dok se u građevinarstvu položaj zasjeka može ponekad i izmjestiti, na primjer pomicanjem trase prometnice u slučaju nepovoljnih uvjeta zasjecanja stijenske mase. Pri tome je jedini projektni parametar na koji se može utjecati nagib padine i nagib zasjecanja, a što rezultira ukupnom visinom zasjeka.
- S druge strane, vijek trajanja zasjeka u otvorenom kopu je znatno manji od traženog vijeka trajanja zasjeka kao sastavnog dijela inženjerske konstrukcije u građevinarstvu.
- Nadalje, ekonomičnost izvođenja zasjeka u rudarstvu znatnije je razvijena nego u građevinarstvu, što se pogotovo očituje u odabiru odgovarajuće geometrije zasjeka.

STIJENSKI POKOSI ZNAČAJNI
ZA STIJENSKO INŽENJERSTVO ←



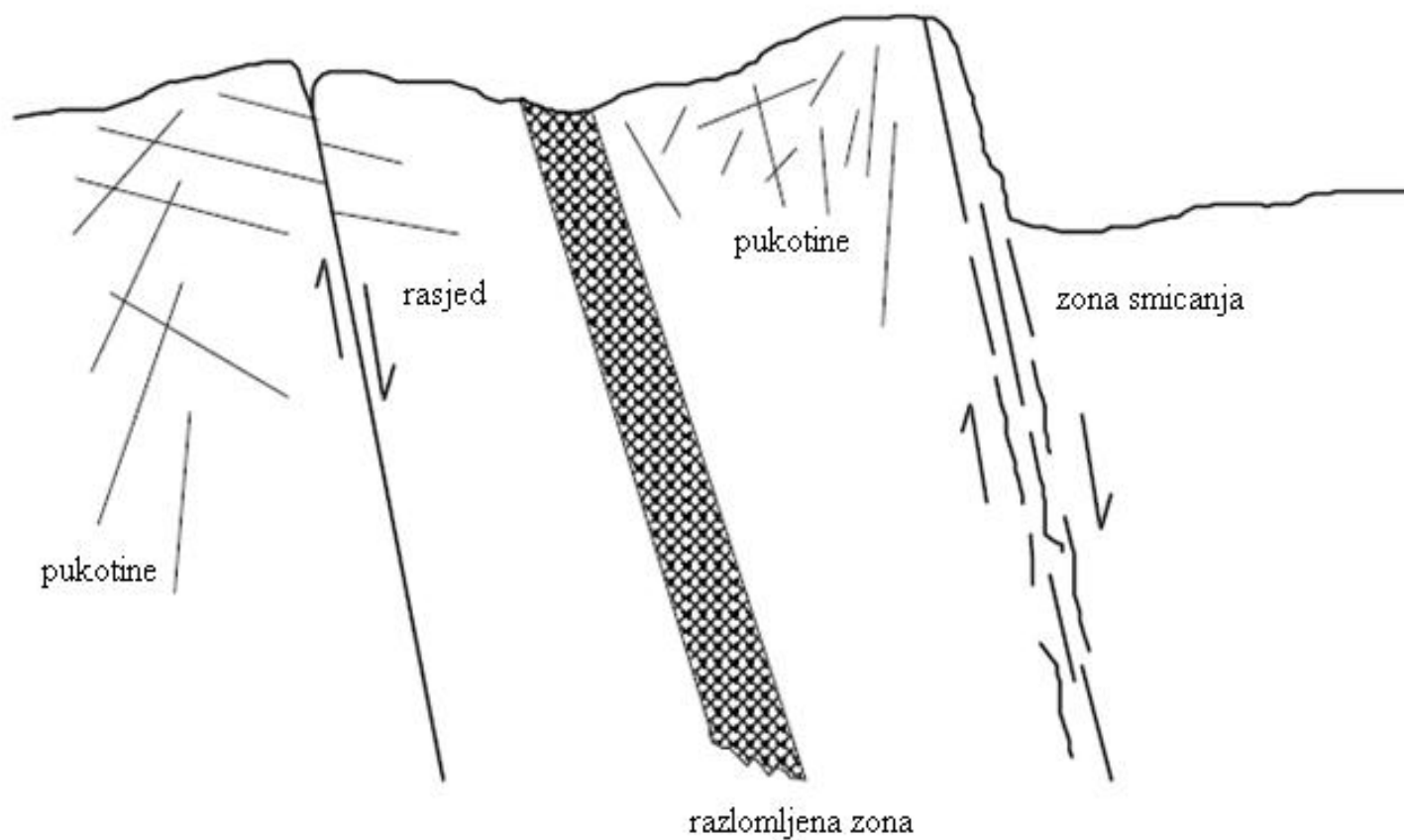
STIJENSKI POKOSI U
OTVORENIM
ISKOPIMA U RUDARSTVU

- Kada se stijenski pokosi promatraju s inženjerskog aspekta, dva su osnovna tipa inženjerskih problema vezanih na stabilnost pokosa:
1. Projektiranje umjetnih pokosa zasjecanjem ili nasipavanjem radi izvedbe novih građevina u stijenskoj masi i tlu. U slučaju zasijecanja, potrebno je razmotriti moguću pojavu sloma stijenskog pokosa u fazi izvođenja radova, kao i po završetku radova.
 2. Analize stabilnosti postojećih pokosa u stijenskoj masi ili tlu, pokosa koji su potencijalno nestabilni, pokosa koji su doživjeli slom ili pokosa na kojima je potrebno izvesti određene zahvate.

Elementi stijenskog pokosa o kojima ovisi nastanak potencijalne plohe sloma stijenske mase uključuju:

- Geološku strukturu
- Naprezanja u stijenskoj masi i uvjeti podzemne vode
- Čvrstoću diskontinuiteta i intaktne stijene
- Geometriju pokosa

GEOLOŠKA STRUKTURA



- Jedan od najvažnijih čimbenika koji utječu na stabilnost jest geološka struktura stijenske mase.
- Pod terminom geološke strukture podrazumijeva se tip stijenske mase koji izgrađuje padinu kao i sustavi diskontinuiteta koji ispresijecaju stijensku masu. Pri tom se razmatraju diskontinuiteti reda veličine od mikropukotina kraćih od 1 cm do rasjeda dužine veće od 1000 km.
- Upravo su nepravilnosti u geološkoj strukturi (rasjedi, pukotine, razlomljene zone, itd.) uzrok pojave slomova u stijenskoj masi.
- Važno je geološki mapirati takve nepravilnosti, tj. diskontinuitete, jer oni izravno utječu na stabilnost stijenskog pokosa.

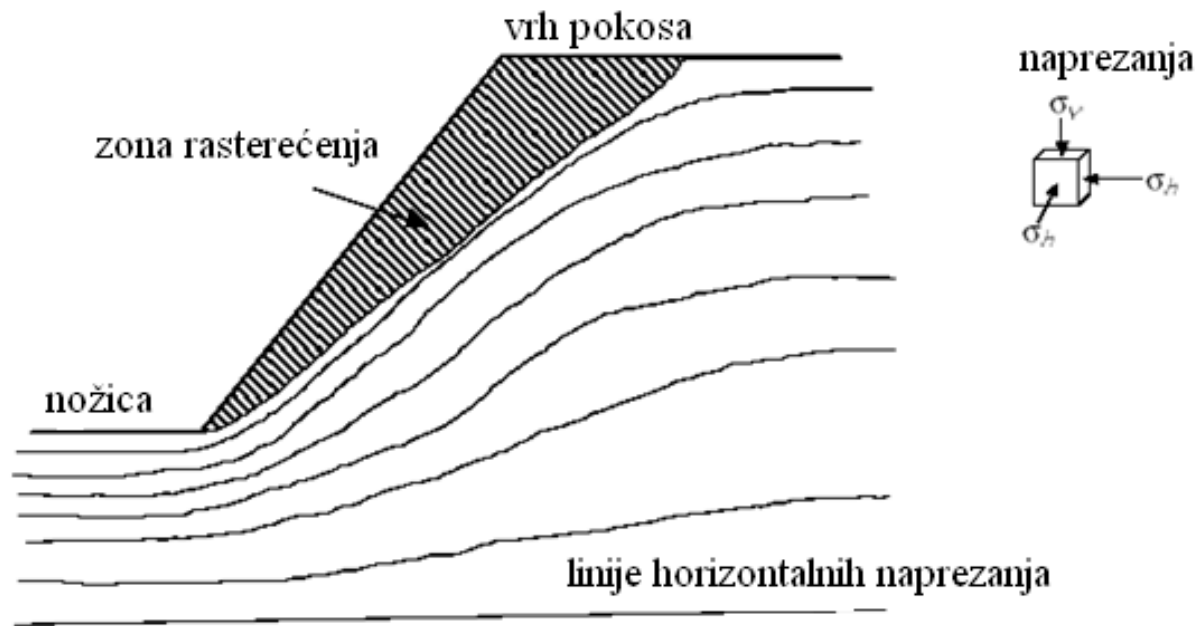
- Podaci o geološkoj strukturi dobiveni inženjersko-geološkim mapiranjem su pouzdaniji nego što su podaci dobiveni istražnim bušenjima i uzimanjem uzoraka.
- Razlog za navedeno je u činjenici da izdanci stijene ili vidljivo lice pokosa prikazuju diskontinuitete u većem razmjeru i u neporemećenim in-situ uvjetima u usporedbi s malim volumenima stijenskih uzoraka. Također, orijentacija diskontinuiteta, kao parametar koji najviše utječe na stabilnost pokosa se ne može pouzdano odrediti iz bušotinskih radova.

- Ako se planira zasijecanje stijenske mase, osim inženjersko-geološkog mapiranja, za identifikaciju sustava diskontinuiteta vrlo dobro mogu ‘poslužiti’ i već otvoreni pokosi koji se nalaze u blizini na kojima se mogu registrirati diskontinuiteti.
- Takav sustav diskontinuiteta i ponašanje postojećih pokosa se mogu ekstrapolirati na pokos koji se planira izvesti.
- U slučaju da postoji malo iskustva o stabilnosti lokalnih pokosa, potrebno je na lokaciji izvođenja radova provesti opsežna istraživanja koja uključuju inženjersko-geološko mapiranje, bušotinske radova i laboratorijska ispitivanja.

NAPREZANJA I UVJETI PODZEMNE VODE

- Naprezanja koji djeluju na stijensku strukturu u odnosu na čvrstoću stijenske strukture određuju stabilnost predmetne stijenske strukture.
- Početno stanje naprezanja u stijenskoj masi padine prije iskopa, u većini je slučajeva tlačne prirode, i predstavlja kombinaciju naprezanja kao posljedicu gravitacijskih sila dosegnutih težinom nadsloja stijenske mase, naprezanja uvjetovanih vanjskim tektonskim silama i mogućim rezidualnim naprezanjima.
- Veličina početnog stanja vertikalnih naprezanja u stijenskoj masi uobičajeno se zamjenjuje težinom nadsloja stijenskog materijala. Početno stanje horizontalnih naprezanja teže je odrediti, pogotovo ukoliko postoji utjecaj tektonskih sila.

- Zasjecanjem stijenske padine mijenja se početno stanje naprezanja u stijenskoj masi, pri čemu se naprezanja preraspodjeljuju na stijensku masu oko izvršenog iskopa



- Horizontalna naprezanja se povećavaju u dnu iskopa uz koncentracije napreznja u nožici, a rasterećuju se pokosi zasjeka.
- Vertikalna naprezanja nakon iskopa u pravilu se usklađuju s opterećenjem uzrokovanim gravitacijskim silama – težinom nadsloja.
- Koncentracija tlačnih naprezanja u nožici zasjeka padine izaziva slom stijenske mase u tom području, koje je također i zona porasta posmičnih naprezanja.
- U području pokosa zasjeka nastupa rasterećenje, glavna naprezanja su manja od početnih naprezanja u tom dijelu zasjeka. To rezultira otvaranjem pukotina u stijenskoj masi i posmičnim slomom duž postojećih diskontinuiteta u stijenskoj masi uslijed smanjenja normalnih naprezanja.

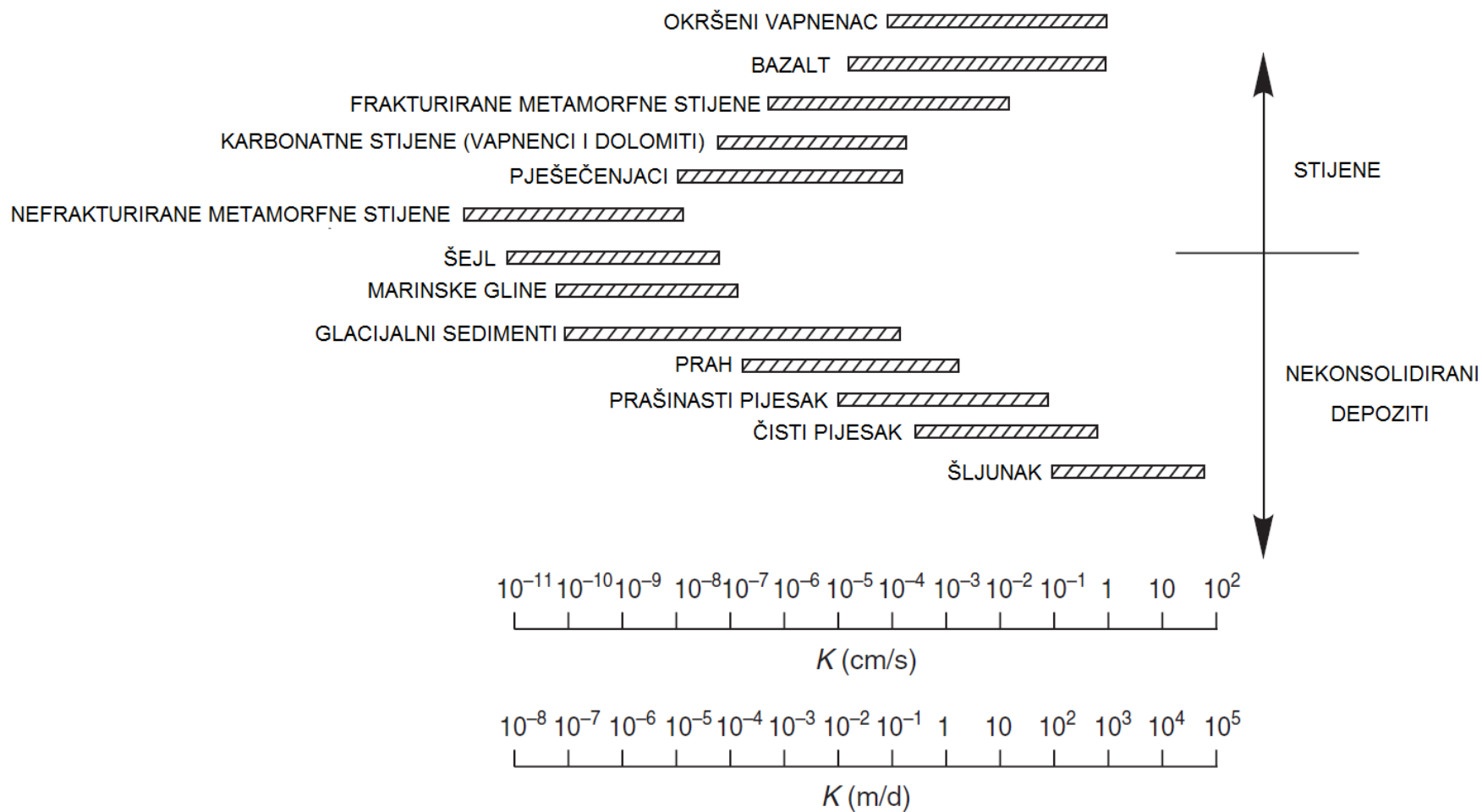
- Stanje naprezanja u stijenskoj masi ovisi o uvjetima podzemne vode i pritiscima vode na stijensku masu.
- Razina podzemne vode (prije iskopa) ovisi o infiltraciji oborina i otopljenog snijega, topografije okoliša, obližnjih jezera i rijeka te hidrogeoloških karakteristika stijenske mase.
- Zasijecanjem stijenske mase početna razina podzemne vode smanjuje se zbog dotoka vode u područje iskopa.

➤Prilikom razmatranja uvjeta podzemne vode u stijenskoj masi, bitno je razlikovati dvije vrste vodopropusnosti:

- a) primarna vodopropusnost
- b) sekundarna vodopropusnost

➤**Primarna vodopropusnost** se odnosi na tečenje vode kroz intaktnu stijenu, te je koeficijent primarne vodopropusnosti K_{PRIMARNO} kod većine stijena popriva male vrijednosti. Na primjer, za intaktni granit $K_{\text{PRIMARNO}} = 10^{-10}$ cm/sec. Međutim kod nekih stijena kao što su određeni pješčenjaci, koeficijenti primarne vodopropusnosti mogu poprimiti vrijednosti i do $K_{\text{PRIMARNO}} = 10^{-4}$ cm/sec.

- **Sekundarna vodopropusnost** se odnosi na tečenje vode kroz stijensku masu, čime uključuje tečenje i kroz intaktni dio i kroz prisutne diskontinuitete. Pri tome neprekinutost diskontinuiteta, njihova širina i ispuna imaju najveći utjecaj na veličinu koeficijenta sekundarne vodopropusnosti – $K_{\text{SEKUNDARNO}}$.
- Tipični rasponi sekundarnih vodopropusnosti za razne vrste stijena (ali i za nekonsolidirane depozite), su prikazani na sljedećoj slici. Vidljivo je da koeficijenti vodopropusnosti za različite materijale pokrivaju čak 13 redova veličina, dok za pojedinu stijenu raspon može biti i do 4 reda veličina. Ovim je jasno naznačena problematika prilikom predviđanja količina tečenja vode i izračuna pritisaka unutar pokosa.



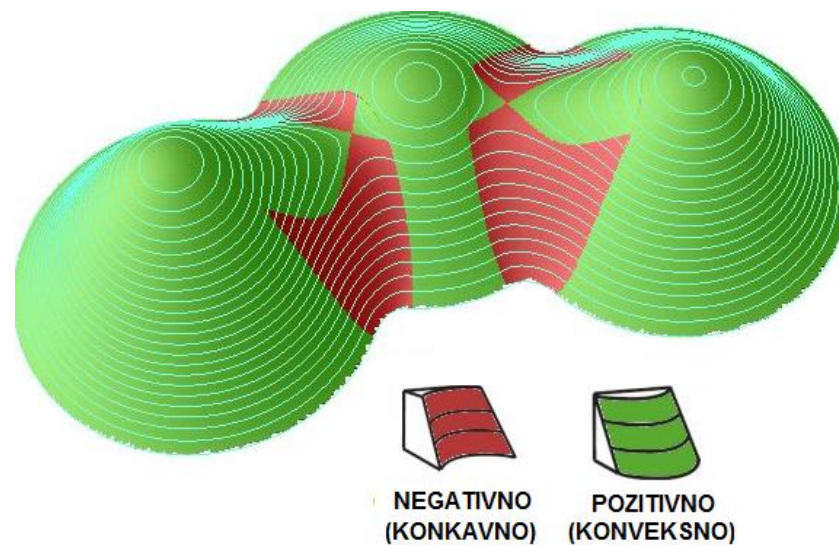
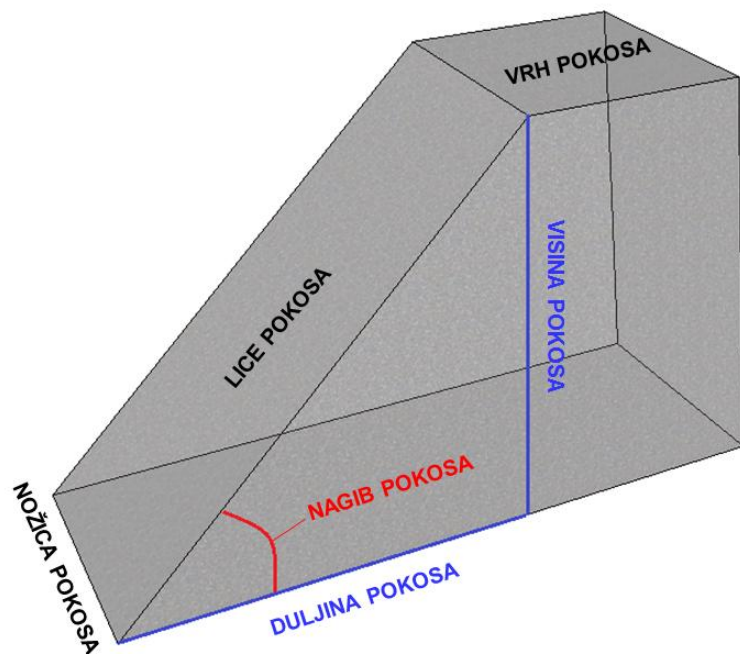
ČVRSTOĆA DISKONTINUITETA I INTAKTNE STIJENE

➤ Čvrstoća ravninskih diskontinuiteta može se dobro opisati Bartonovim kriterijem čvrstoće koji uzima u obzir hrapavost zidova diskontinuiteta te njihovu čvrstoću (JRC i JCS).

➤ U stijenskoj masi intaktna stijena djeluje kao veza između diskontinuiteta. Čvrstoća intaktne stijene dobro je proučena, dok je djelovanje intaktne stijene među diskontinuitetima nešto slabije. Ipak, pokazuje se da do loma intaktne stijene koja djeluje kao veza između diskontinuiteta najčešće dolazi u obliku vlačnog sloma.

GEOMETRIJA POKOSA

- Geometrija pokosa uključuje nagib pokosa i zakrivljenost pokosa.



Uzroci nastanka pojedinih mehanizama sloma stijenskih pokosa uključuju:

- Tektonske procese
 - Gravitacijske, seizmičke i hidrodinamičke sile
- } GEOLOŠKI UVJETI

- Iskope i nasipavanja
 - Opterećenja građevina
 - Promjene režima podzemnih voda
 - Promjene namjene zemljišta
 - Vibracije uslijed miniranja
- } ANTROPOLOŠKI UVJETI

➤ Klimatske uvjete

➤ Vrijeme



- Termin ‘slom stijenskog pokosa’ odnosi se na svaku pojavu nestabilnosti pokosa uslijed promjene uvjeta u pokosu nastalih kao rezultat prethodno definiranih uzroka. Slom na pokosu nastupa **kad se prekorači posmična čvrstoća materijala na kliznoj plohi** (čvrstoća tla, stijenske mase ili diskontinuiteta).
- Na temelju utvrđene geološke strukture stijenske mase u kosini i stanja naprezanja u stijenskoj masi, pouzdano je moguće utvrditi moguće mehanizme sloma koji se javljaju češće u odnosu na ostale pojave sloma u pokosu.
- Mehanizam sloma predstavlja opis fizičkog procesa u stijenskoj masi pri kojem je došlo do porasta opterećenja i pojave sloma te razvoja sloma u padini.



Mehanizmi sloma dijele se na:

- Planarni slom
- Klinasti slom
- Rotacijski slom
- Složeni slomovi
- Blokovsko klizanje i slom prevrtanjem (toppling)
- Lomljenje i izbacivanje sloja



PLANARNI SLOM

➤ Planarni slom u stijenskoj masi se pojavljuje duž određenog geološkog diskontinuiteta, a opći uvjeti za nastanak planarnog sloma uključuju sljedeće:

a) ravnina diskontinuiteta po kojem se dogodio slom se mora pružati paralelno ili približno paraleleno (cca +/- 20°) s licem pokosa

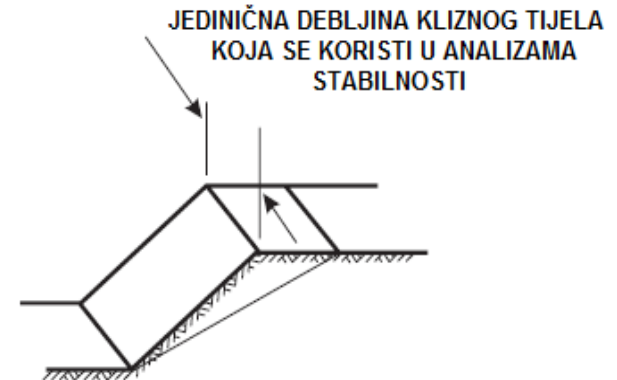
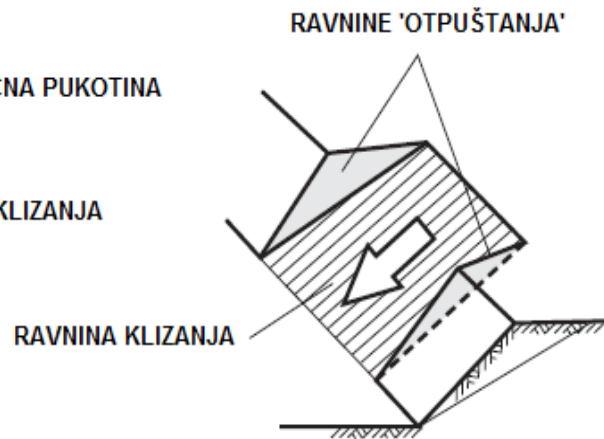
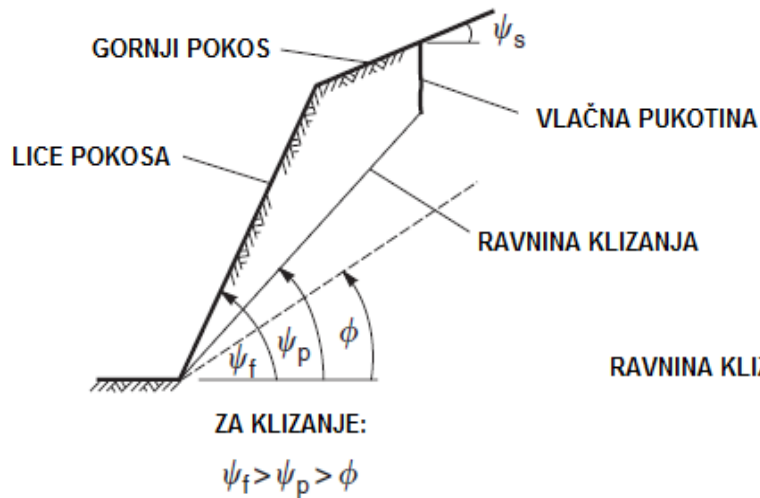
b) nagib ravnine po kojoj se dogodio slom mora biti manji od nagiba lica pokosa -

$$\psi_f > \psi_p$$

c) nagib ravnine po kojoj se dogodio slom mora biti veći od kuta unutarnjeg trenja stijenske mase -

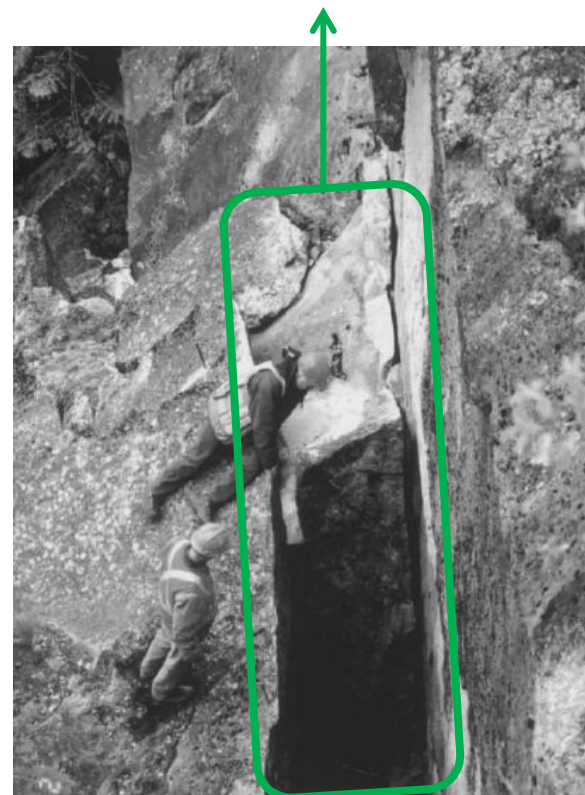
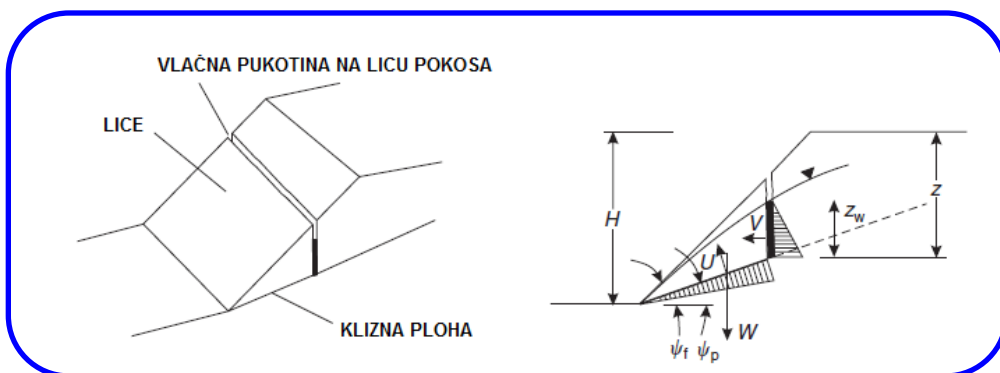
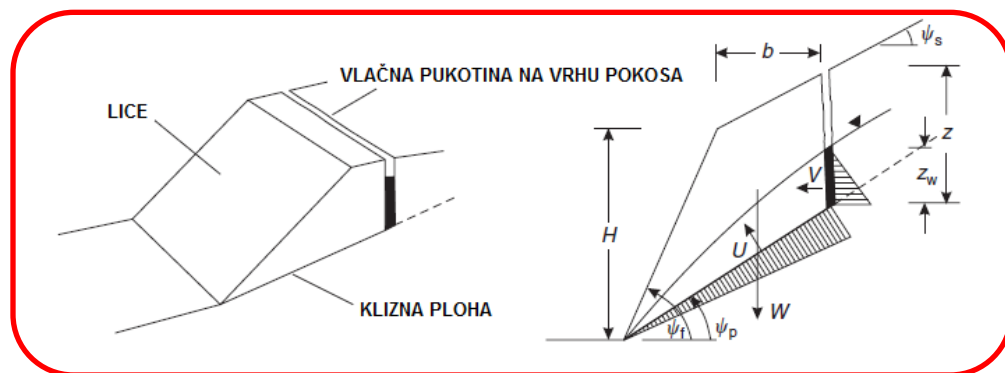
$$\phi < \psi_p$$

d) tzv. 'ravnine otpuštanja' koje pružaju neznatnu otpornost klizanju, moraju biti vidljive u cilju određivanja bočnih granica kliznog tijela



- Važnu ulogu u ostvarivanju planarnog sloma imaju vlačne pukotine u stijeni, koje se javljaju iz razloga neznatne vlačne čvrstoće stijene na tom dijelu. Mogu se pojaviti na **vrhu pokosa** ili na **licu pokosa**. Nakon što se ispune vodom (površinski pritok) stvara se novi pritisak na potencijalno klizno tijelo.

VLAČNA PUKOTINA





RAVNINA PLANARNOG SLOMA

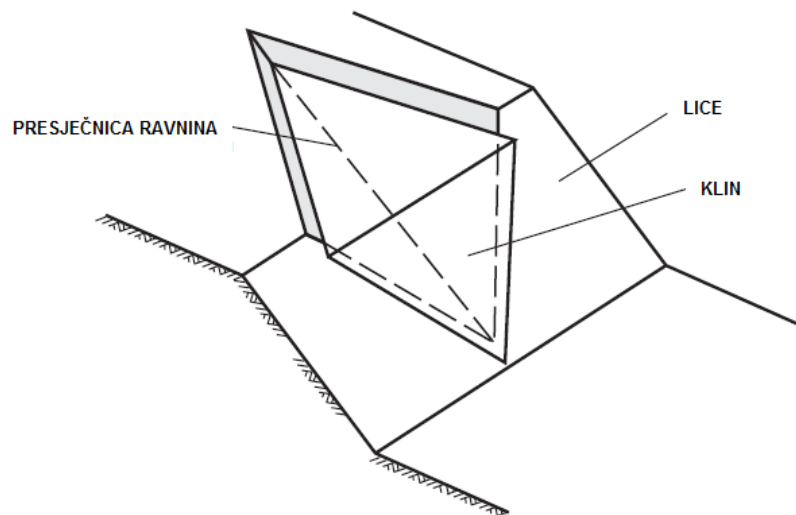


RAVNINE PLANARNIH SLOMOVA

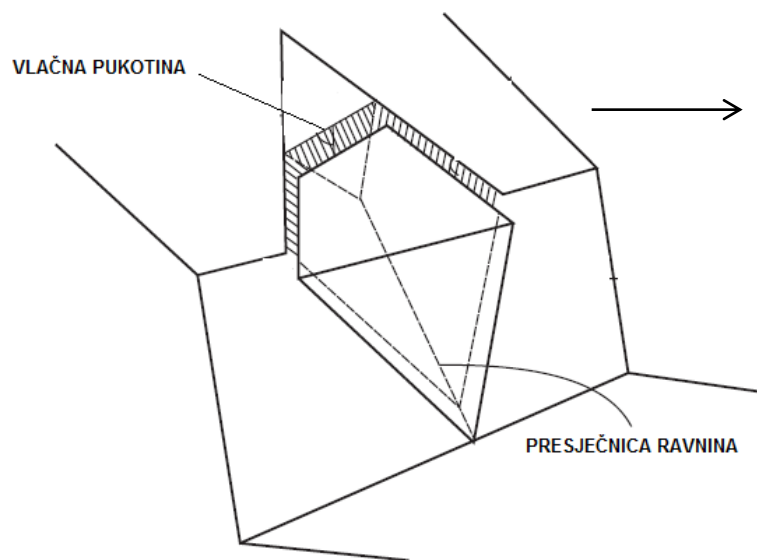


KLINASTI SLOM

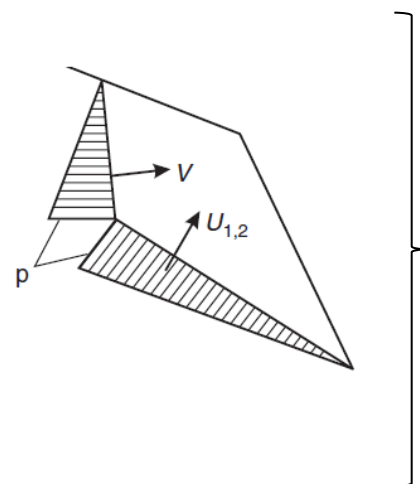
- Klinasti slom u stijenskoj masi se pojavljuje u stijenskoj masi duž dva diskontinuiteta koji se nalaze pod određenim kutom u odnosu na lice pokosa, te formirano klizno dijelo klizi prema iskopu po presječnici ravnina tih diskontinuiteta.
- Klinasti slom se događa pri puno većem opsegu geoloških i geometrijskih uvjeta, nego što je to slučaj s planarnim slomom.
- Slom se može pojaviti bez prisutstva vlačne pukotine ili uz prisutstvo vlačne pukotine.



→ KLINASTI SLOM BEZ VLAČNE PUKOTINE

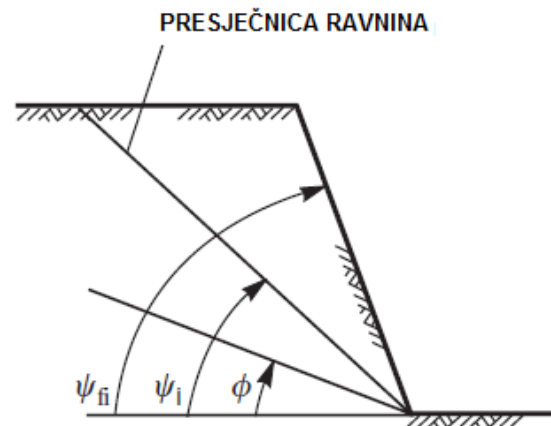


→ KLINASTI SLOM S VLAČNOM PUKOTINOM

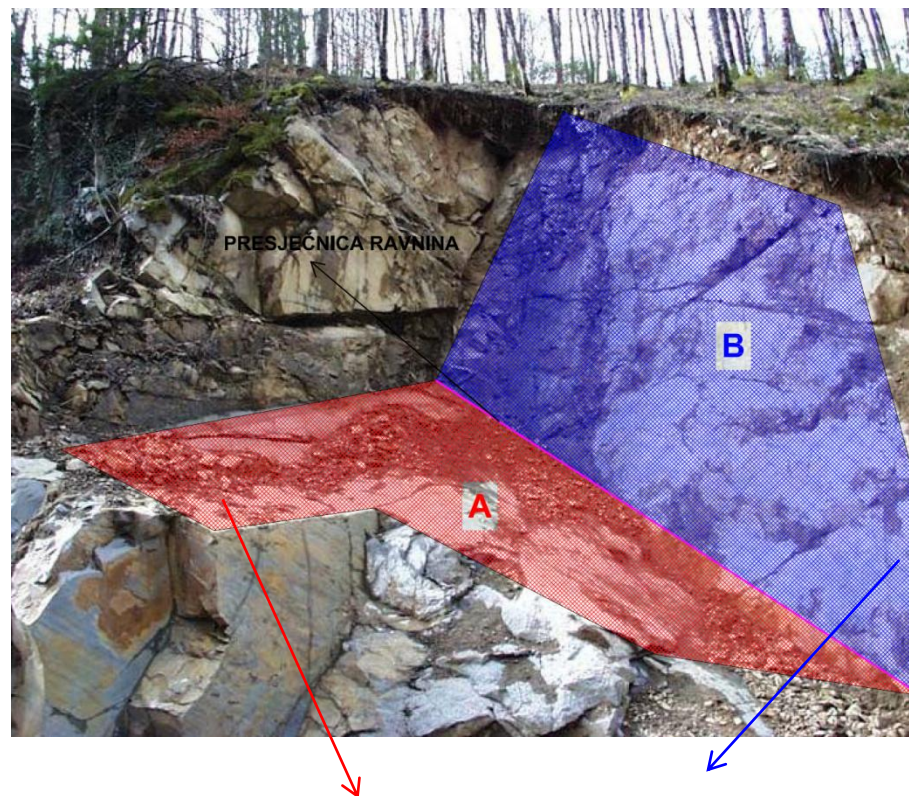


HIDROSTATSKI PRITISAK
U VLAČNOJ PUKOTINI I
NA RAZINI PRESJEČNICE
RAVNINA

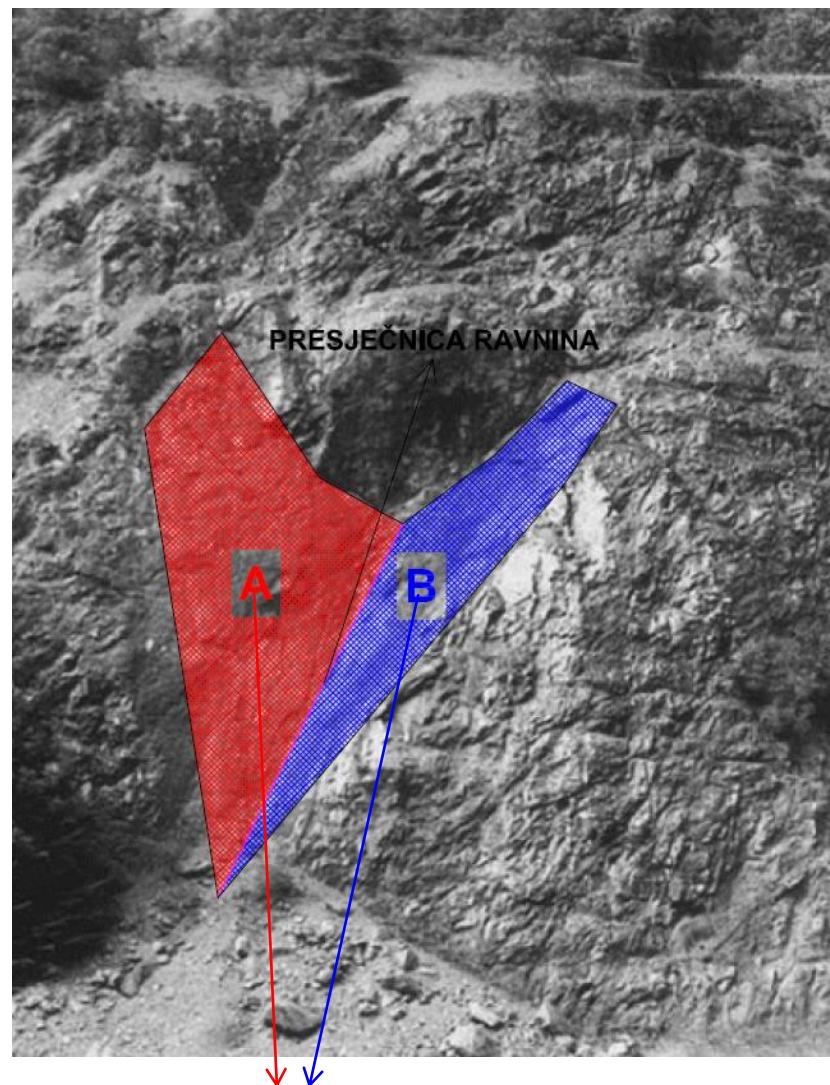
- Nagib linije presječnice dviju kliznih ravnina mora biti manji od nagiba lica pokosa – $\psi_i > \psi_{fi}$
- Nagib linije presječnice dviju kliznih ravnina mora biti veći od ‘prosječnog’ kuta unutrašnjeg trenja stijenske mase - $\psi_i > \phi$
(prosječni kut trenja označava srednju vrijednost kuta trenja dobivenu iz kuteva trenja stijenske mase na mjestu pojedine klizne plohe)



→ PRESJEK KROZ KLIN



RAVNINE KLINASTOG SLOMA



RAVNINE KLINASTOG SLOMA



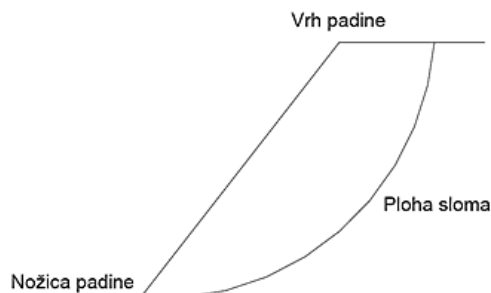
ROTACIJSKI SLOM

➤ Rotacijski slom odgovara kružnom slomu prema kojem se slom kroz stijensku masu odvija po kružnoj plohi sloma. Pojam kružne treba shvatiti samo okvirno budući se misli na sve klizne plohe zakrivljenog oblika.

➤ Javlja se na pokosima na kojima ne postoje jasno izraženi diskontinuiteti ili slabije zone stijenske mase koje određuju pojavu sloma drugačijeg tipa ili mehanizma sloma.

➤ Rotacijski slom karakterističan je za jako raspucalu stijensku masu bez dominantnih diskontinuiteta nepovoljnog položaja u odnosu na pokos ili za pokose velikog razmjera u odnosu na sustav diskontinuiteta.

- Osim rotacijskog sloma bez formiranja vlačne pukotine, moguća je i pojava rotacijske nestabilnosti stijenske mase uslijed formiranja vlačne pukotine.

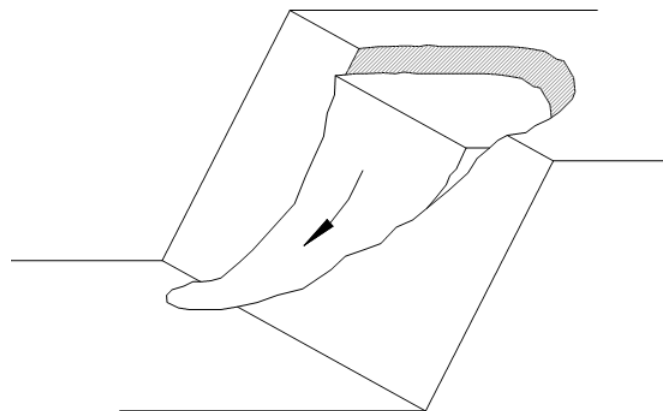


Rotacijski slom



Rotacijski slom s vlačnom pukotinom

- Rotacijski slom se prikazuje kao dvodimenzionalni slom, dok je u stvarnosti trodimenzionalna pojava.

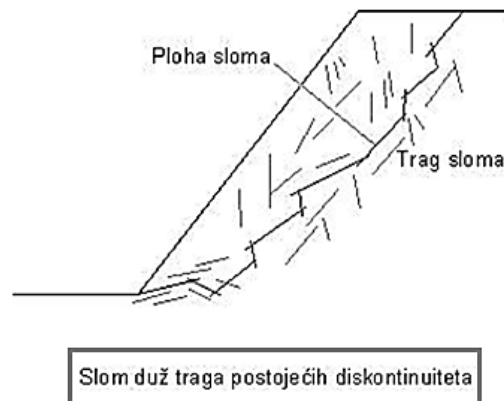




**POKRENUTA STIJENSKA MASA
USLIJED ROTACIJSKOG SLOMA**

SLOŽENI SLOMOVI

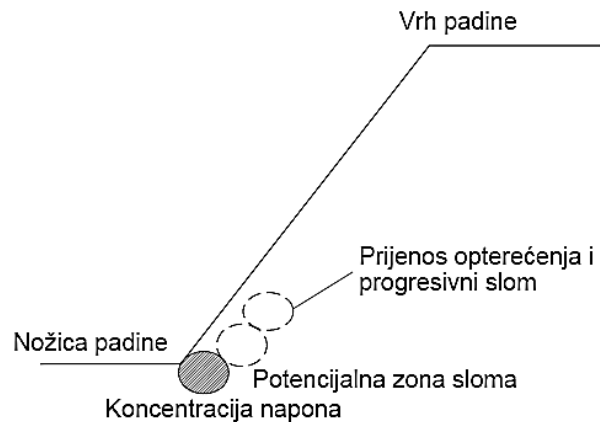
- Osim navedenih vrsta slomova, mogući su i složeni slomovi stijenske mase, a neki primjeri složenih slomova su prikazani na donjoj slici.



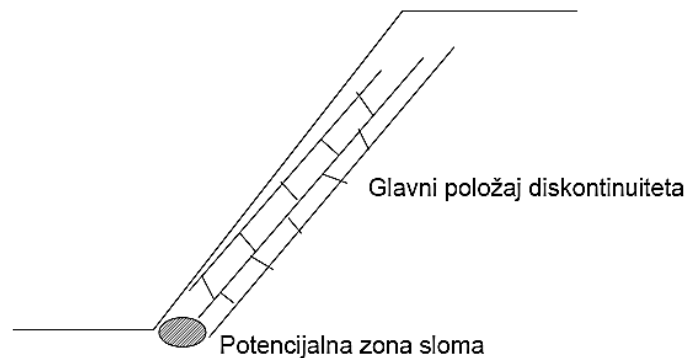


BLOKOVSKO KLIZANJE I SLOM PREVRTANJEM (TOPPLING)

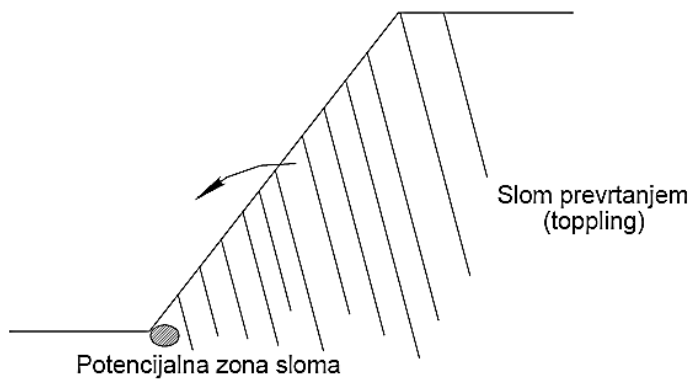
- Blokovsko klizanje nastaje nakon sloma u nožici pokosa, nakon čega nastaje pojava progresivnog sloma uz pokos. Pri tom je slom uvjetovan položajem diskontinuiteta nagnutih približno okomito na nagib pokosa. Nakon sloma stijenske mase u nožici padine javlja se slom po diskontinuitetima, uslijed čega dolazi do odvaljivanja, odnosno klizanja blokova po formiranoj plohi sloma.
- Slom prevrtanjem nastaje uslijed sloma slojeva stijenske mase nagnutih u kosinu po diskontinuitetima subhorizontalnog položaja u odnosu na položaj slojeva. Razlikuje se primarno prevrtanje uzrokovano gravitacijom i naprezanjima u stijenskoj masi te sekundarno prevrtanje uzrokovano drugim faktorima.



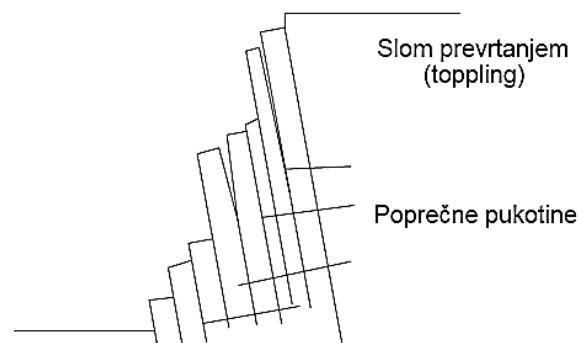
Mehanizam nastanka blokovskog klizanja



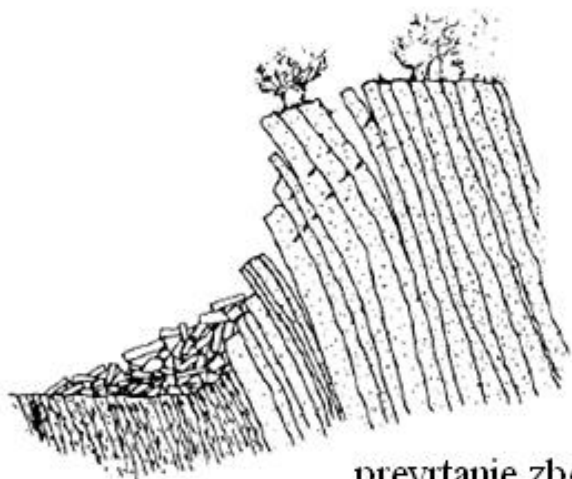
Blokovsko klizanje i ravninski slom



Slom prevrtanjem uslijed sloma u nožici



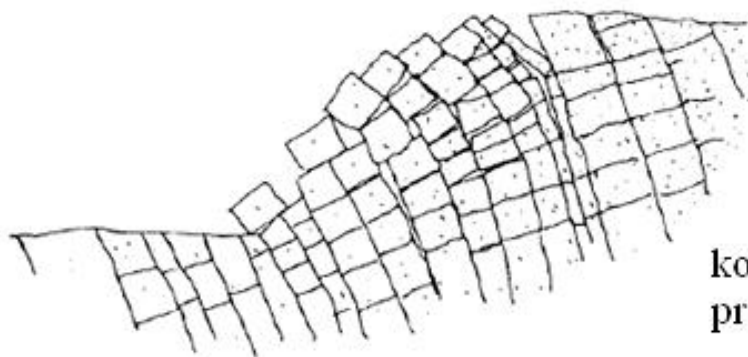
Primarni slom prevrtanjem



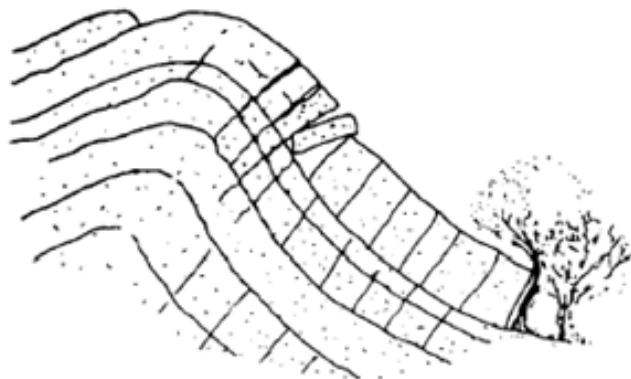
prevrtanje zbog
savijanja



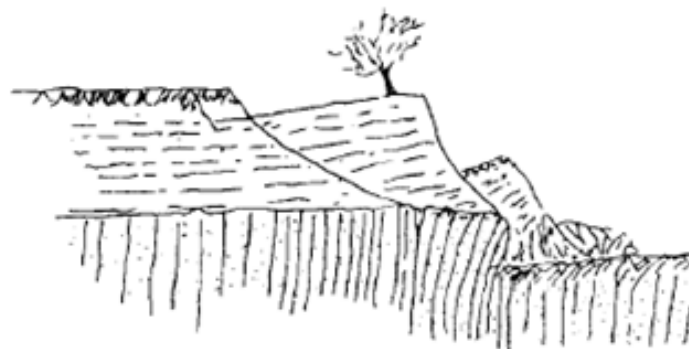
prevrtanje
blokova



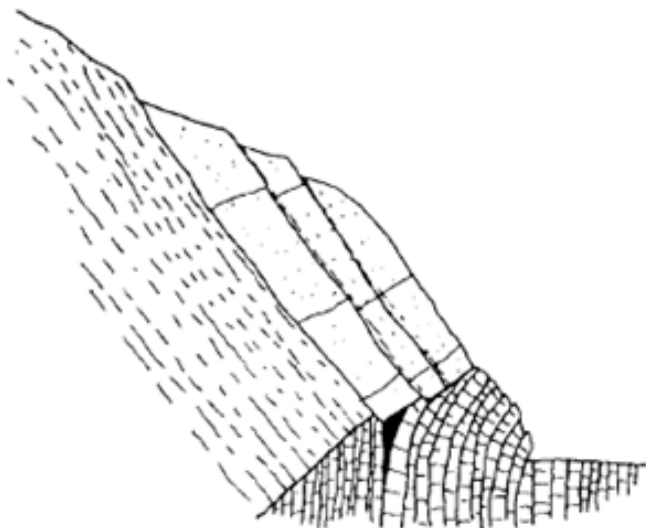
kombinacija blokovskog
prevrtanja i savijanja



klizanje vrha pokosa



klizanje zbog prevrtanja
temeljne stijene u nožici



prevrtanje nožice pokosa



prevrtanje iza vlačne pukotine



MEHANIZMI SLOMA STIJENSKIH POKOSA

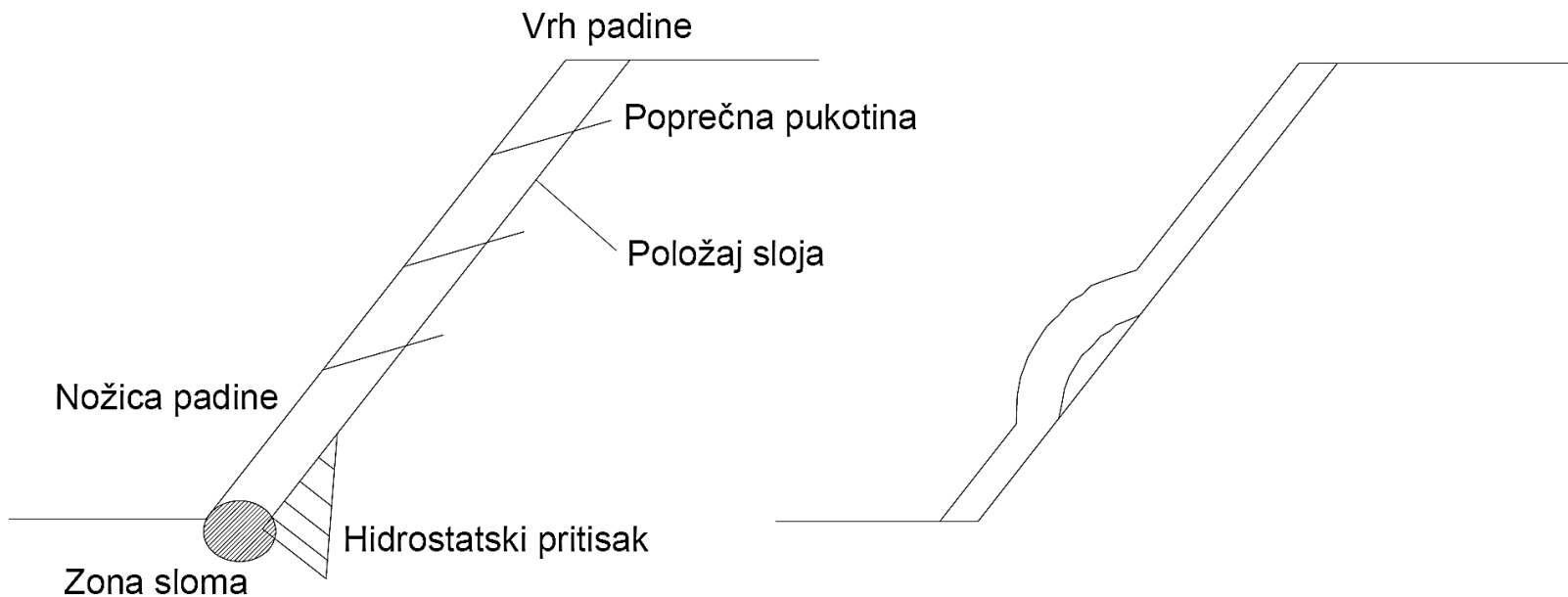
ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU





LOMLJENJE I IZBACIVANJE SLOJA

- U ovu kategoriju pripada slom tanko uslojenih stijenskih masa koji uključuje i izbacivanje pojedinih slojeva stijene uslijed prekoračenja naprezanja.
- Javljaju se u pokosima s kontinuiranim diskontinuitetima ili slojevima u stijenskoj masi u slučajevima kada je položaj diskontinuiteta ili sloja paralelan s površinom padine.
- Slom po slojevima stijenske mase nastupa uslijed sloma u nožici ili kao ravni slom duž poprečne pukotine.
- Pri tome značajan utjecaj može imati i prirast hidrostatskog pritiska uzrokovan porastom razine podzemne vode u padini.



Slom unutar sloja uslijed sloma u nožici
ili sloma po poprečnim pukotinama

Izbacivanje sloja

- Projektiranje pokosa u stijenskoj masi podrazumijeva odabir stabilne geometrije i/ili potrebnih odgovarajućih mjera podgrađivanja.
- Na temelju terenskih i laboratorijskih istražnih radova, kao i na temelju klasifikacija stijenske mase, dobivaju se parametri čvrstoće i deformabilnosti na temelju kojih se izrađuju geotehnički modeli potrebni za provođenje analiza stabilnosti.
- Analize stabilnosti provode se prema jednoj od odgovarajućih metoda uz prethodno utvrđene moguće mehanizme sloma. Rezultat analiza stabilnosti je **faktor sigurnosti**. Ukoliko se takvim analizama ne dobiju zadovoljavajući faktori sigurnosti, u geotehnički model uvode se efekti upotrebe odabarnih podgradnih sustava kojima se osigurava tražena stabilnost pokosa iskazana traženim faktorom sigurnosti.



- Osim što se provode za utvrđivanje moguće pojave sloma u prirodnom ili umjetnom pokosu, analize stabilnosti se provode i u cilju utvrđivanja parametara čvrstoće materijala u pokosima u kojima je slom nastupio (povratne analize).
- Zajedničko većini metoda analiza stabilnosti pokosa je koncept podjele pokosa u odvojene projektne geotehničke cjeline. Projektna geotehnička cjelina predstavlja dio pokosa u kojem su parametri (litologija, diskontinuiteti, značajke stijenske mase, geometrija iskopa, faktori koji proizlaze iz tehnologije izvođenja radova) koji mogu utjecati na stabilnost pokosa konstantni.



➤ Podjela metoda analiza stabilnosti pokosa:

- a) Metode granične analize
- b) Metode analize granične ravnoteže
- c) Numeričke metode
- d) Probabilističke metode
- e) Empirijski pristup
- f) Fizički modeli



a) METODE GRANIČNE ANALIZE

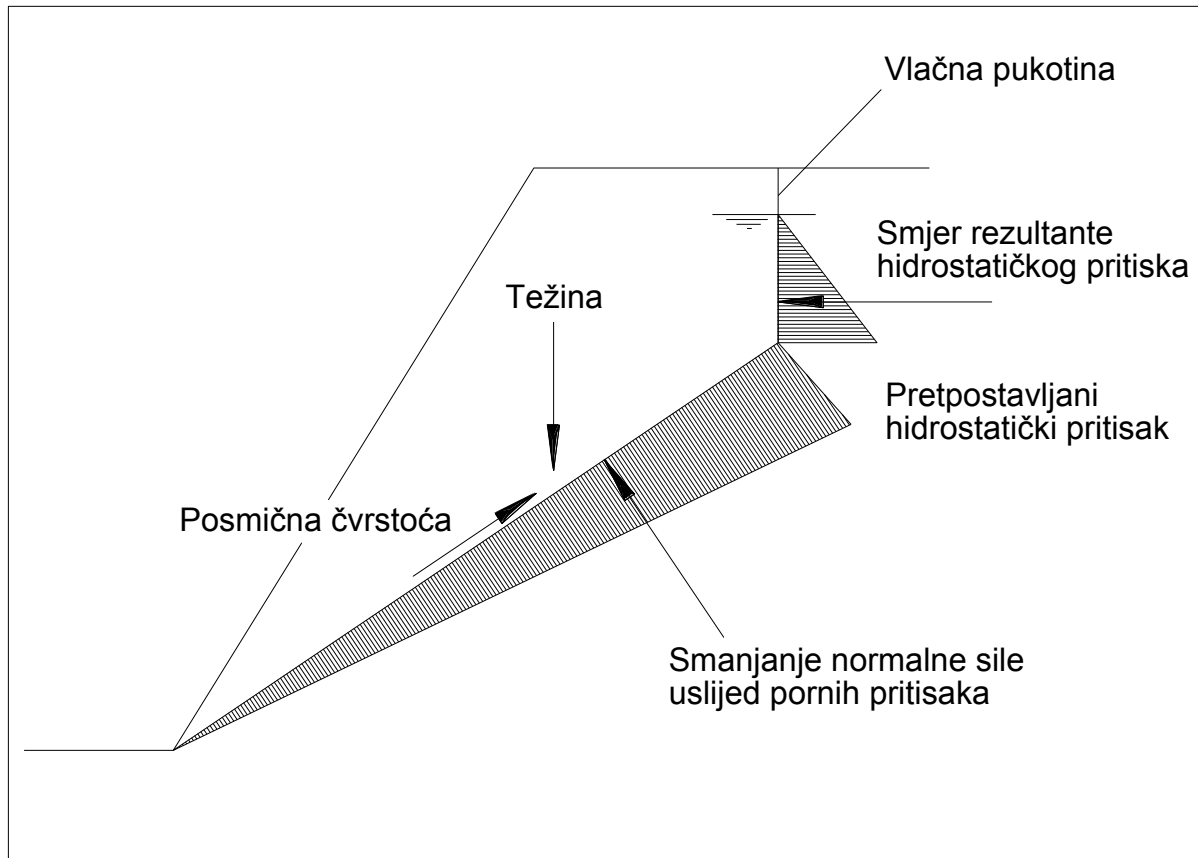
- Granične analize stabilnosti podrazumijevaju **egzaktno rješenje problema** stabilnosti stijenskog pokosa čije je ponašanje definirano metodama mehanike kontinuuma.
- Egzaktno rješenje podrazumijeva potpuno zadovoljenje uvjeta ravnoteže i kompatibilnosti pokosa u svim točkama pokosa. To uključuje zadovoljenje diferencijalnih jednačbi ravnoteže, jednačbi kompatibilnosti pomaka, konstitutivnih jednačbi ponašanja materijala, kao i zadovoljenja rubnih uvjeta postavljenog problema.
- Zatvoreno rješenje za naprezanja i pomake u stijenskom pokosu moguće je dobiti jedino za vrlo jednostavne geometrije i konstitutivne modele, stoga problem treba pojednostaviti.



b) METODE ANALIZE GRANIČNE RAVNOTEŽE

- Analiza granične ravnoteže je najčešće korišteni pristup u projektiranju stabilnosti pokosa nastao kao posljedica analiziranja graničnih sila otpora potrebnih za održavanje ravnoteže sa silama koje uzrokuju pojavu klizne plohe.
- U metodama analize granične ravnoteže nije u potpunosti zadovoljena niti jedna od osnovnih jednažbi mehanike kontinuuma koja opisuje ravnotežu, deformacije i konstitutivno ponašanje materijala na pokosu.
- Deformacije se pri tom uopće ne uzimaju u razmatranje, a uvjeti ravnoteže zadovoljeni su jedino za sile koje djeluju u pokosu. Usvaja se **postojanje plohe sloma**, a čvrstoća materijala na plohi sloma opisuje se **usvojenim kriterijem čvrstoće**.

- U najjednostavnijem obliku analize granične ravnoteže, zadovoljena je jedino ravnoteža sila. Faktor sigurnosti određen je kao odnos sila mogućeg otpora i aktivnih sila koje djeluju na padinu.



$$F_s = \frac{\sum (\text{SILE OTPORA})}{\sum (\text{AKTIVNE SILE})}$$



- Faktor sigurnosti može se izraziti kao:
 1. Odnos sila mogućeg otpora i aktivnih sila.
 2. Odnos naprezanja na plohi sloma i čvrstoće materijala.
 3. Odnos parametara čvrstoće u kosini i parametara čvrstoće potrebnih za održanje stabilnosti kosine.
 4. Odnos momenata otpora i momenata aktivnih sila na plohi sloma.
- U slučaju da je dobivena vrijednost faktora sigurnosti manja ili jednaka 1.0, moguća je pojava sloma u padini.
- Ukoliko je moguća pojava više različitih modela sloma ili različitih ploha sloma, a za sve je izračunata vrijednost faktora sigurnosti manja od 1.0, postoji mogućnost pojave svake od analiziranih pojava sloma.

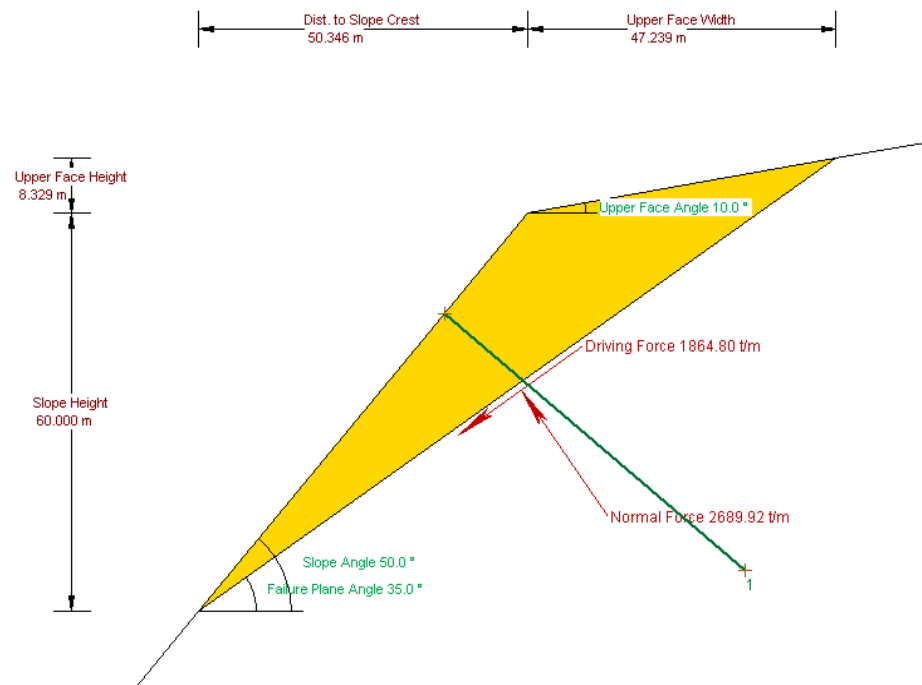
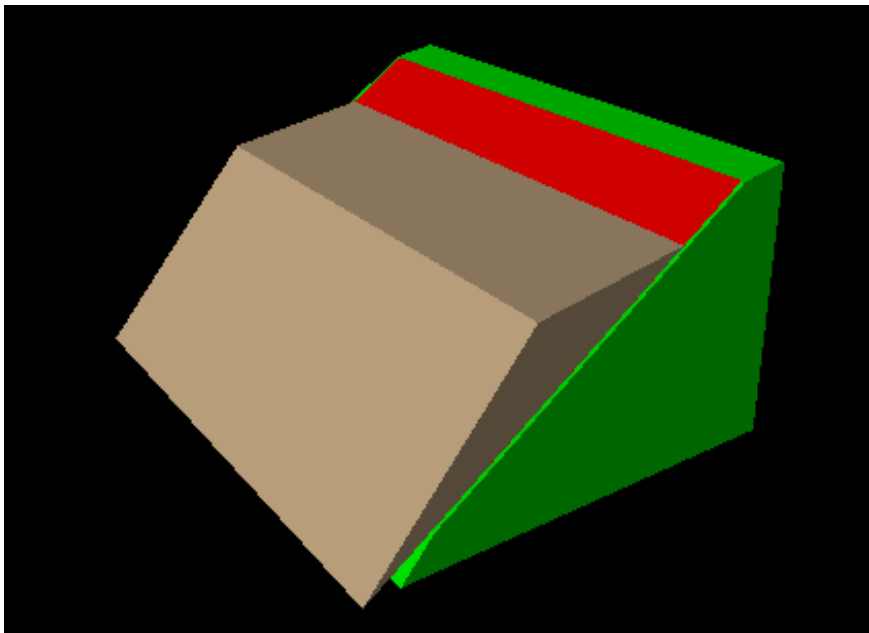


- Posmična čvrstoća duž plohe sloma ne mora biti u potpunosti dosegnuta, ali uvjeti stanja ravnoteže podrazumijevaju da je rezultanta sila otpora jednaka ili manja suprotnoj aktivnoj rezultatnoj sili.
- Granična čvrstoća na plohi sloma u tom slučaju može biti veća od rezultante sila otpora, što znači da će pri povratnim analizama padine u kojoj se dogodio slom, koristeći metode granične ravnoteže izračunata posmična čvrstoća materijala padine predstavljati donju granicu stvarne čvrstoće.

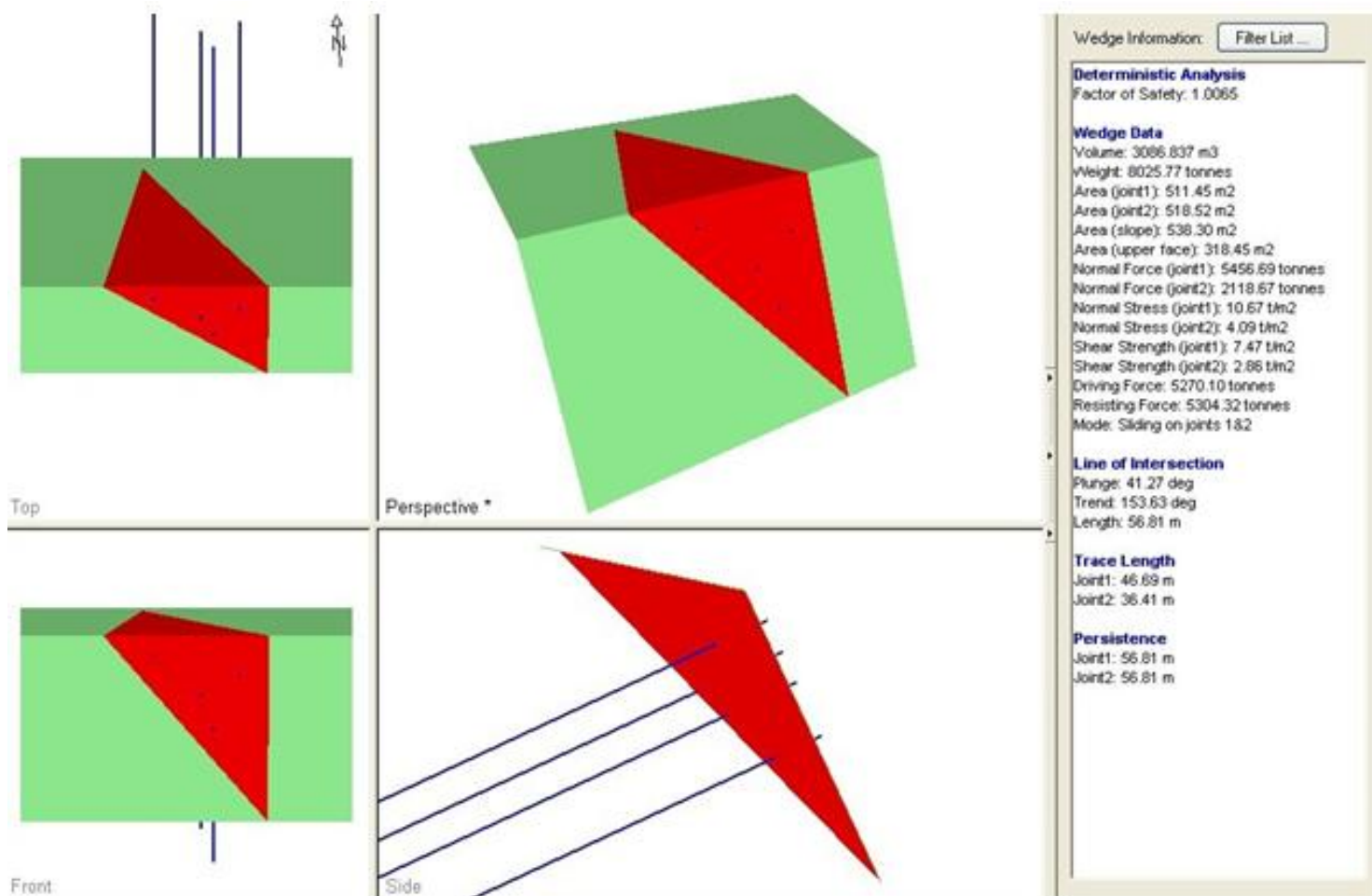


- Na raspolaganju su različite metode analize granične ravnoteže ovisno o mehanizmu sloma koji se promatra (npr. planarni ili rotacijski) te o pretpostavkama koje se usvajaju kako bi se dobilo egzaktno rješenje.
- Posljednjih godina razvijen je niz komercijalnih računalnih programa koji se temelje na analizi granične ravnoteže (Swedge-Rocscience, Rocplane-Rocscience, Slope/W-Geostudio)

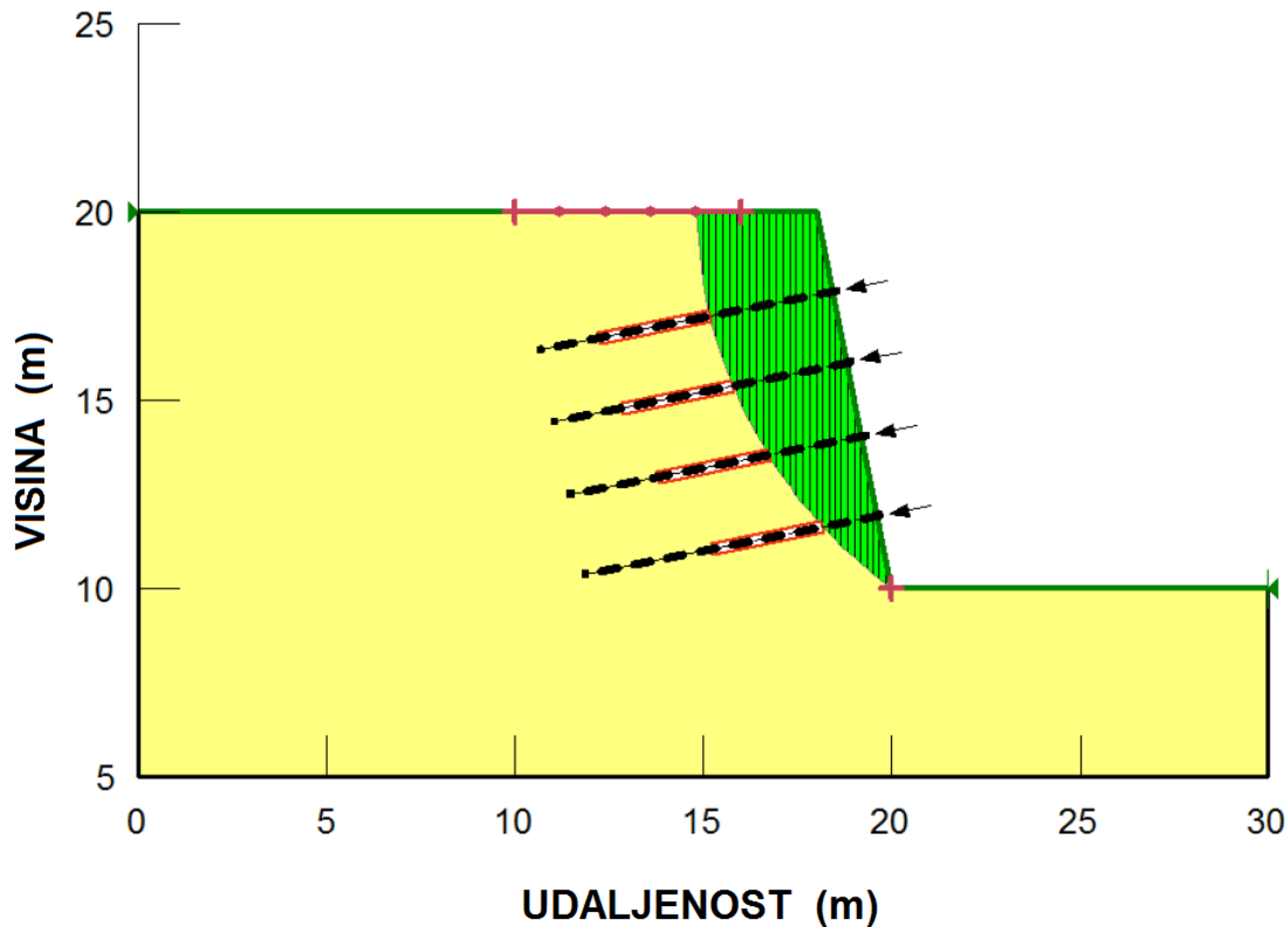
Ravni slom - RocPlane



Klinasti slom - Swedge



Rotacijski slom – GeoSlope

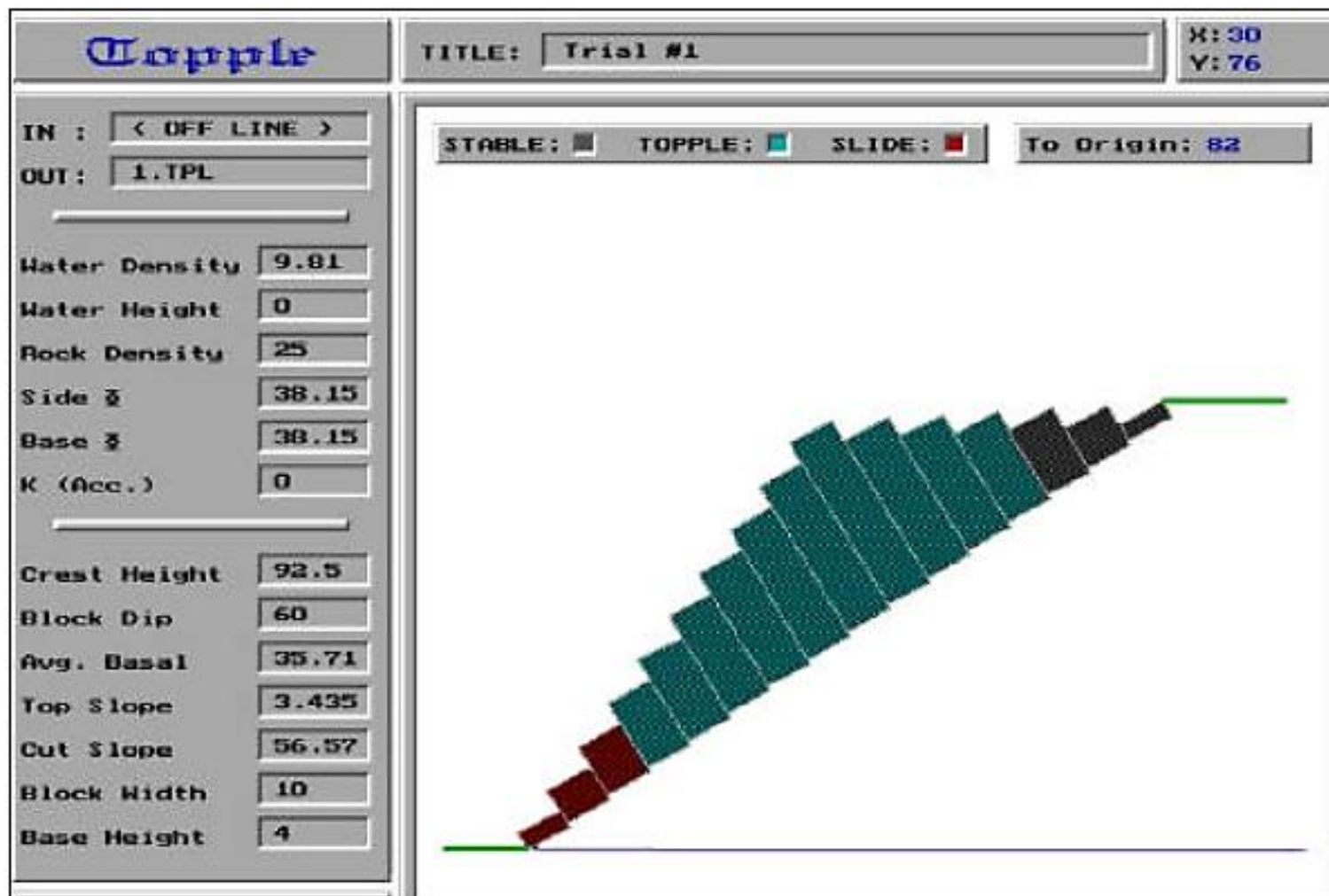




ANALIZE STABILNOSTI STIJENSKIH POKOSA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

Slom prevrtanjem - Topple





c) NUMERIČKE METODE

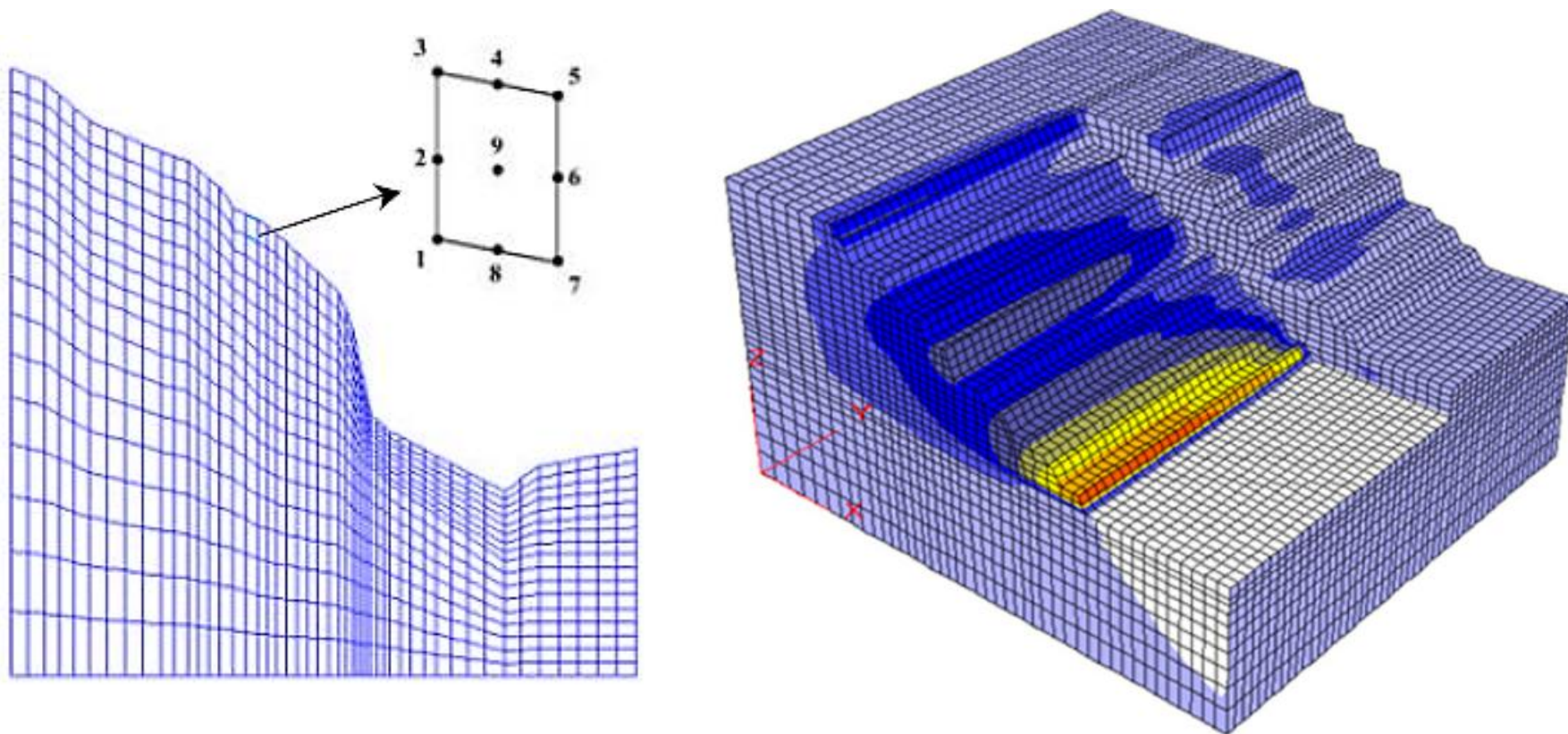
➤ Naziv numeričke metode u analizama stabilnosti pokosa koristi se kao termin koji opisuje numerička modeliranja stanja u pokosu i numeričke postupke kojima se isto stanje određuje.

➤ Numeričkim analizama potrebno je zadovoljiti rubne uvjete uspostavljenog numeričkog modela, diferencijalne jednačbe ravnoteže, konstitutivne jednačbe materijala te odgovarajuće jednačbe pomaka.

➤ Kao rezultat analiza u numeričkim modelima dobivaju se vrijednosti stanja naprezanja i deformacija u elementima modela izloženog vanjskim opterećenjima i ograničenog rubnim uvjetima.



- U usvojenom modelu mogu se koristiti različiti konstitutivni odnosi odnosi ponašanja materijala i praktično neograničeni broj različitih vrsta materijala, što ovoj metodi daje veliku prednost jer se znatno bolje mogu opisati složeni uvjeti u geometriji pokosa u odnosu na metode granične ravnoteže.
- U numeričkim analizama uglavnom se koriste numeričke metode kontinuuma kao što su metoda konačnih elemenata, metoda rubnih elemenata, metoda konačnih razlika te metoda diskretnih elemenata koja za razliku od prethodnih opisuje ponašanje diskontinuuma.
- Numeričkim metodama nije moguće eksplicitno odrediti faktor sigurnosti pojedinog pokosa. Mogu se koristiti kao prvi korak u analizi stabilnosti pokosa u kojem se utvrđuje stanje naprezanja duž plohe sloma. U drugom koraku koriste se analize granične ravnoteže u kojem se utvrđuje kritična ploha sloma te odgovarajući faktor sigurnosti.





d) PROBABILISTIČKE METODE

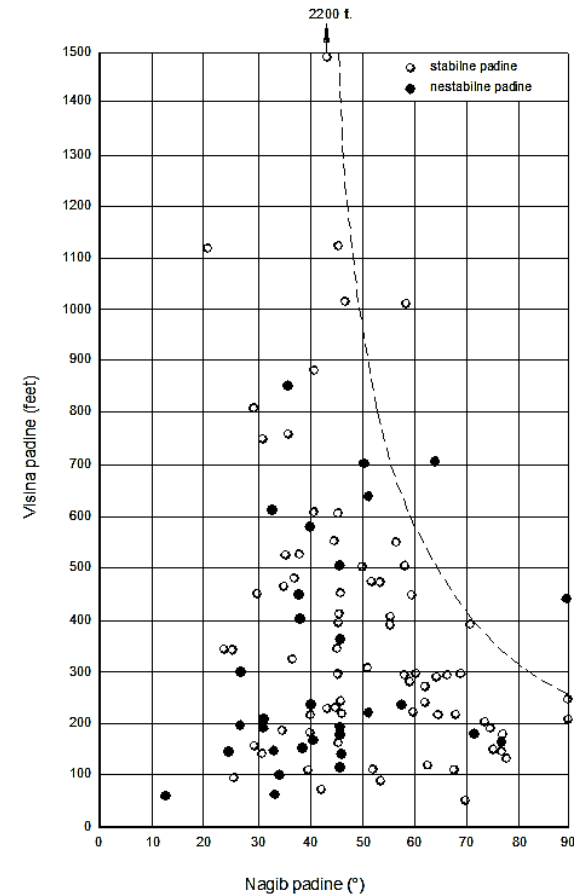
➤ Probabilističke metode polaze od pristupa da su faktori koji utječu na stabilnost pokosa podložni određenim prirodnim varijacijama koje se u idealnim uvjetima mogu uključiti u analize.

➤ Za svaki od faktora određuje se funkcija distribucije vjerojatnosti s kojima se ulazi u usvojeni tip analize. Funkcijom distribucije mogu se prikazati vrijednosti parametara čvrstoće, razine podzemne vode, nagib diskontinuiteta i zapreminske težine stijenske mase.

➤ Analiza se provodi odabirom vrijednosti za svaku odabranu funkciju distribucije metodom slučajnih odabira na osnovi čega se određuje faktor sigurnosti za vrlo veliki broj provedenih analiza.

e) EMPIRIJSKI PRISTUP

- Empirijski pristup zasniva se na iskustvima stečenim promatranjem ponašanja pokosa tijekom izvedbe.
- Za razliku od prethodno opisanih metoda koje se zasnivaju na teoriji mehanike kontinuuma, empirijski pristup koristi dostupne podatke izvedenih pokosa prikazane bazom podataka, pri čemu se analiziraju svi dostupni podaci izvedenih pokosa u različitim uvjetima prikazani u odnosu visine i nagiba izvedenog pokosa.



f) FIZIČKI MODELI

➤ Fizički modeli služe za simulaciju uvjeta ponašanja pokosa u kontroliranom okruženju pri čemu se uvjeti koji utječu na stabilnost pokosa mogu lako varirati.

➤ Također postoji mogućnost ispitivanja i utvrđivanja stanja pokosa pri kojem se javlja slom u kosini, a koji može biti odgovarajući pojavi sloma na terenu.

➤ Fizički modeli omogućuju prepoznavanje mehanizama sloma u pokosu, a također služe i za potvrdu ponašanja materijala utvrđenu odgovarajućim numeričkim modelima.

➤ Tri osnovna tipa modelskih ispitivanja:

- Umanjeni model kosina
- Modeli ponašanja u konvencionalnoj laboratorijskoj opremi
- Modeli ponašanja ispitivani centrifugom



- Metode stabiliziranja stijenskih pokosa se mogu podijeliti na:
 - a) metode koje eliminiraju ili reduciraju aktivne (napadne) sile
(kao što je npr. dreniranje podzemne vode ili iskopi)
 - b) metode koje povećavaju sile otpora
(npr. instalacija potpornih sustava)
- U nastavku će se navedene metode detaljnije prikazati.



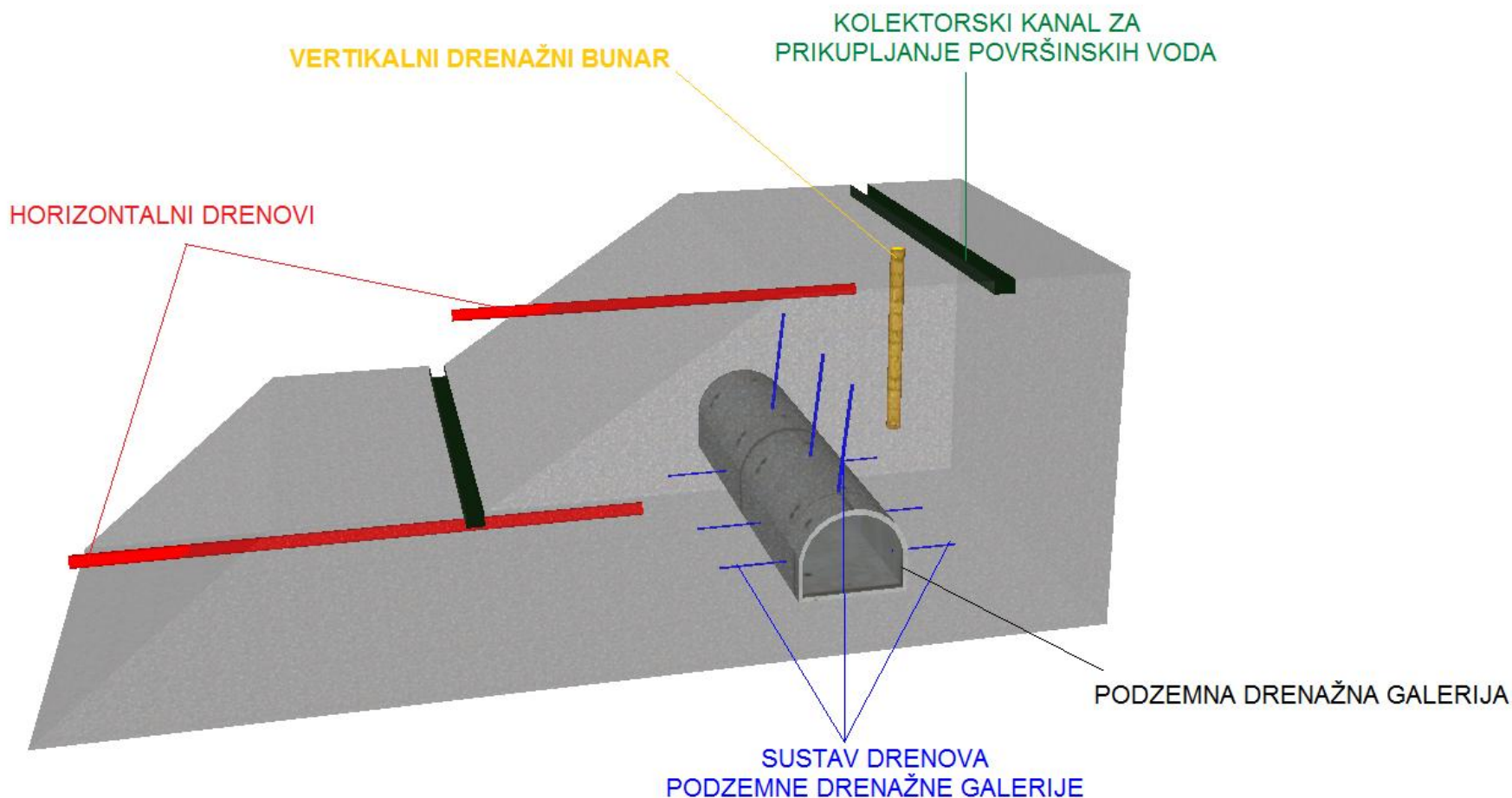
a) metode koje eliminiraju ili reduciraju aktivne (napadne) sile

- Najčešće korištena metoda eliminacije ili redukcije napadnih sila je **snižavanje podzemne vode u pokosu**, čime dolazi do smanjenja pornih pritisaka i povećanja stabilnosti stijenskog pokosa.
- Navedeno se postiže instaliranjem drenažnog sustava koji se općenito smatra jednom od jeftinijih metoda stabilizacije stijenskih pokosa.
- Dva se problema pojavljuju prilikom primjene ovakve metode stabiliziranja.
- Prvi problem se može pojaviti ako se pokaže da pritisci podzemne vode nisu glavni uzrok nestabilnosti pokosa, te dreniranje pokosa nema velikog utjecaja na stabilnost.



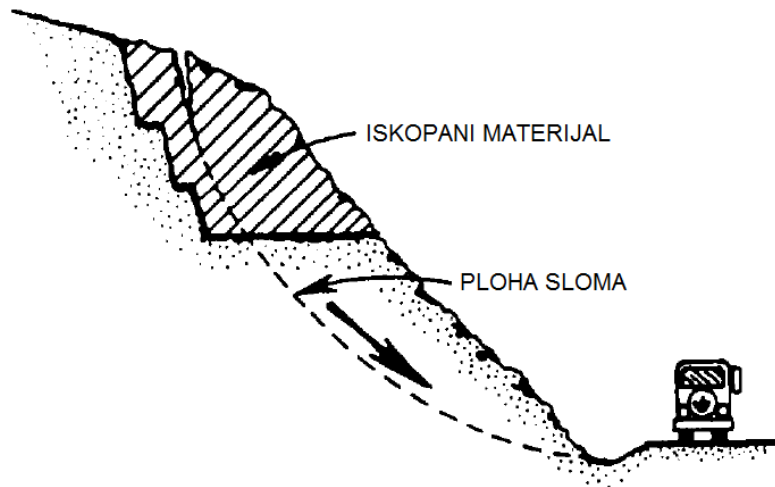
- Drugi problem je u projektiranju efektivnog sustava drenaže i u osiguranju da će drenažni sustav biti efektivan tijekom projektnog perioda za koji je namjenjen.
- Navedeni problemi se mogu nadići instaliranjem sustava piezometara za mjerenje pornih pritisaka prije izvedbe pokosa, za vrijeme izvedbe, te nakon izvedbe tijekom projektnog perioda.
- Osim navedenih, glavnih problema, ostali potencijalni problemi se mogu pojaviti u slučaju da drenažni sustavi mogu postati potpuno nepotrebni ako se voda nalazi u pukotinama u stijeni, a sustavi drenaže ne presijecaju te pukotine. Također se problem može pojaviti ako se drenažni sustavi začepi nakon čega dolazi do porasta pornog tlaka.

- Kao dio drenažnih sustava, mogu se izvesti horizontalni drenovi (pod nagibom), vertikalni bunari, te se podzemne drenažne galerije kao i kolektorski kanali za prikupljanje površinskih voda ili kombinacije navedenog.



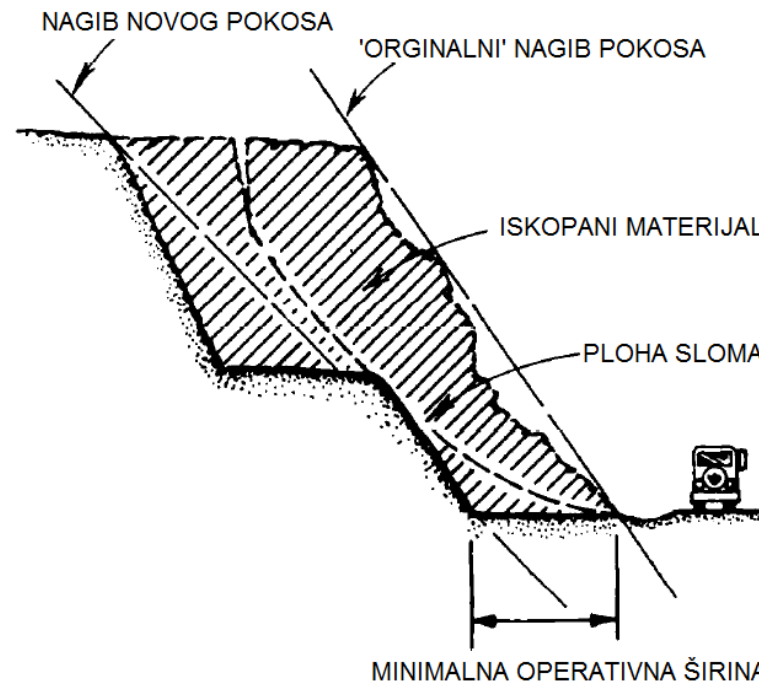


- Još jedna metoda eliminacije ili redukcije napadnih sila uključuje **iskope** čime se smanjuje ukupna težina potencijalnog kliznog tijela.
- Iskopi se vrše s krune pokosa, jer zasijecanje nožice može dovesti do potencijalnih nestabilnosti pokosa. Količina stijenskog materijala koju je potrebno ukloniti se može odrediti numeričkim povratnim analizama.
- Osim uklanjanja gornjeg dijela pokosa, stabilizacija se može vršiti uređenjem pokosa pod manjim kutem. Nagib pokosa koji zadovoljava tražene faktore sigurnosti se može također dobiti iz povratnih analiza.



UKLANJANJE
MATERIJALA S
KRUNE POKOSA

UBLAŽAVANJE
NAGIBA POKOSA





b) metode koje povećavaju sile otpora

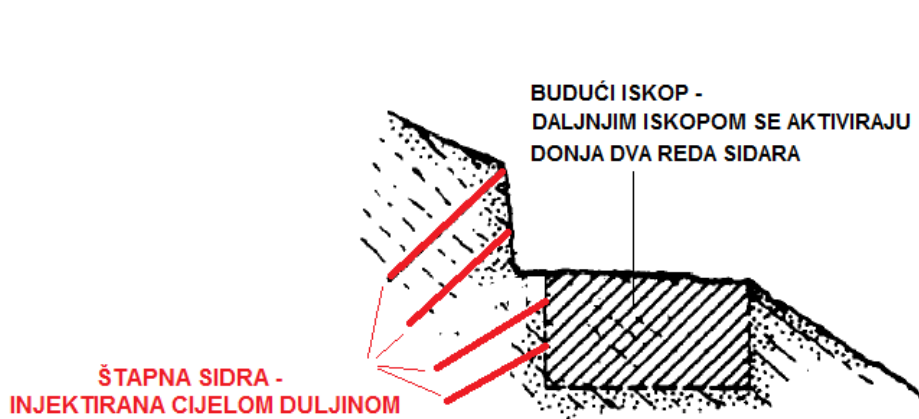
- Metode koje povećavaju sile otpora se mogu podijeliti na dvije vrste:
 - i. metode armiranja stijenske mase –
tzv. ‘unutrašnje’ povećanje sile otpora
 - ii. metode podupiranja stijenske mase -
tzv. ‘vanjsko’ povećanje sile otpora



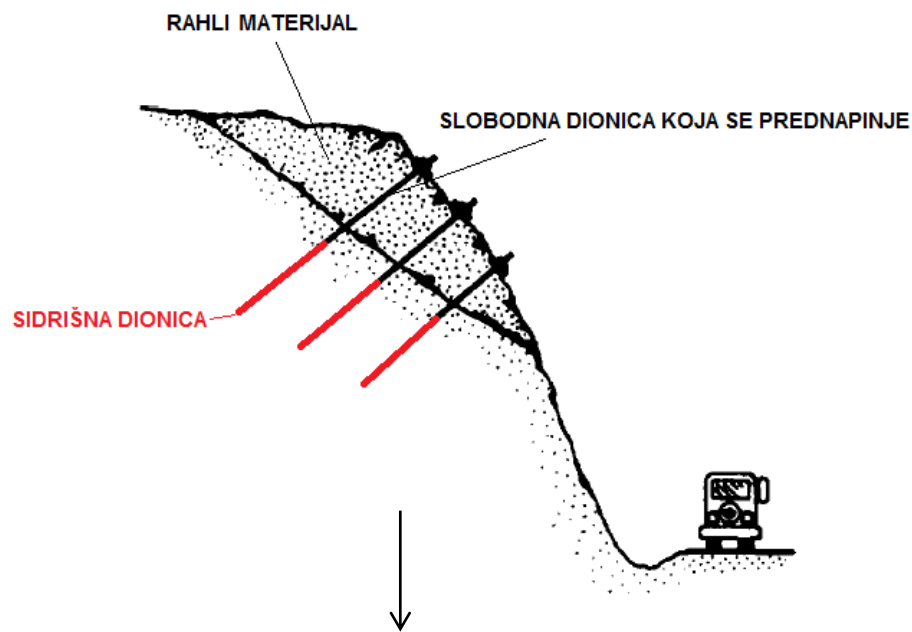
i. metode armiranja stijenske mase –

- Ako postoji opasnost od formiranja plohe sloma, sile otpora se mogu povećati ugradnjom štapnih ili prednapetih sidara, te se takva procedura naziva ‘armiranjem stijenske mase’.
- Njihovom ugradnjom se povećava normalna i posmična sila otpora na plohu sloma, a relativna veličina tih sila ovisi o orijentaciji sidra u odnosu na plohu sloma.
- Navedene sile imaju puno veći utjecaj na stabilnost pokosa, nego što ga ima posmična čvrstoća čelika duž plohe sloma.

- Iako je u stijenskim masama češća upotreba štapnih sidara koji se aktiviraju pomakom stijenske mase, koriste se i prednapeta sidra u koja se unosi vlačna sila čime se dodatno povećava sila otpora na plohu sloma.



ŠTAPNA SIDRA ZA ZAŠTITU POKOSA



PREDNAPETA SIDRA ZA ZAŠTITU POKOSA

- Važno je naglasiti da i štapna i prednapeta sidra moraju završavati u stijenskoj masi van plohe sloma.
- Pod elemente armiranja se ubraja i mlazni beton, iako se ugrađuje na lice pokosa. Naime, sloj mlaznog betona služi samo za sprečavanje rahljenja stijene i ispadanja pojedinih manjih blokova. Kako praktički nema nosivost, zajedno sa sidrima forira sustave za armiranje stijenskih pokosa.



Zaštita stijenskog pokosa mlaznim betonom

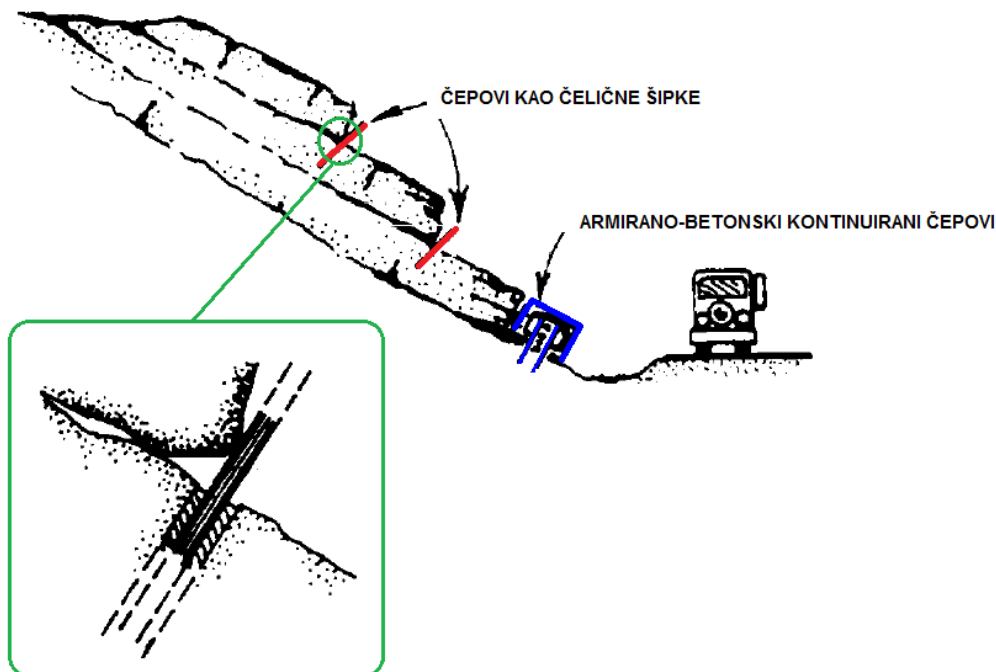


ii. metode podupiranja stijenske mase –

➤ Sustavi za podupiranje se ugrađuju na ili ispred lica pokosa sa ciljem u ograničavanju pomaka konture iskopa na definiranu vrijednost.

➤ Kao sustavi za podupiranje stijenskih pokosa se koriste tzv. čepovi, betonski i armirano-betonski potporni zidovi ili gabionski zidovi.

➤ Čepovi su čelične šipke ili kontinurani betonski blokovi koji se ugrađuju u nožicu potencijalno nestabilnih pokosa te pružaju pasivni otpor klizanju.



- Potporni zidovi su konstrukcije koje se izvode na dnu stijenskog pokosa ili ispod ‘visećeg’ dijela stijene i pružaju otpornost klizanju. Zidovi bi trebali imati dovoljnu masu da i čvrstoću da pruže otpor težine stijene koja se nalazi iza zida. Također se mogu, u cilju sprečavanja prevrtanja zida, dodatno sidriti u stijensku masu.

- Umjesto armirano-betonskih zidova, moguće je kao metodu stabilizacije stijenskih pokosa koristiti i gabionske zidove.
- Gabionski zidovi se sastoje od niza žičanih košara ispunjenih lomljenom kamenom ispunom. Karakterizira ih veća deformabilnost i manja cijena nego potporne zidove od armiranog betona. Također radi svoje propusnosti omogućavaju slobodnu drenažu stijenskog pokosa.
- Prednost armirano-betonskih i gabionskih zidova je u činjenicu da za njihovo izvođenje nisu potrebni radovi na vrhu pokosa čime bi se unijela dodatna nestabilnost.



