

## UVOD U MEHANIKU STIJENA I STIJENSKO INŽENJERSTVO

### OSNOVNI POJMOVI

- **MEHANIKA STIJENA** – teorijska i primijenjena znanost o mehaničkom ponašanju stijena; grana znanosti koja proučava stanje naprezanja u stijenskoj masi izazvano djelovanjem sila iz njene neposredne fizičke okoline
- **STIJENSKA MASA** – prirodna geološka formacija čvrste stijene sa svim svojim oslabljenjima odnosno diskontinuitetima
- **MONOLITNI UZORAK STIJENE** – izvađeni dio stijenske mase koji se koristi za utvrđivanje mehaničkih svojstava stijene
- **RASJED** – zdrobljena zona uzduž koje je vidljiv pomak reda veličine nekoliko centimetara do nekoliko kilometara
- **PUKOTINA** – lom u geološkoj formaciji uzduž kojeg nije došlo do vidljivog pomaka; može biti zatvorena, otvorena, ispunjena i neispunjena
- **PRSLINA** – zatvorena, prostim okom teško vidljiva pukotina koja se najčešće ne proteže kroz promatrano područje
- **DISKONTINUITET** – opći pojam za mehanički prekid u stijenskoj masi koji ima malu ili nikakvu vlačnu čvrstoću okomito na smjer pružanja; zajednički naziv za rasjede, pukotine i prsline

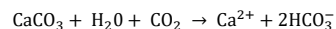
### RAZLIKA IZMEĐU TLA I STIJENA

- Stijene su geološki starije formacije od tla, veće čvrstoće i manje deformabilnosti
- Mehaničke osobine tla ovise o sadržaju vlage, a stijenama ne
- Mehanika tla se zasniva na mehanici kontinuuma, a mehanika stijena na mehanici diskontinuumu
- Radovi u tlu izvode se na ili blizu površine pa su primarna naprezanja manja u odnosu na dodatna naprezanja izazvana građenjem, a kod stijena je obrnuto

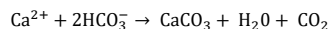
Krš zauzima 52% kopnene površine, a ako se uzme u obzir Jadransko podmorje preko 70% površine.

### KRŠ

- **KRŠ** – teren uglavnom pokriven vapnencem i dolomitom čija je topografija pretežno oblikovana od topivih stijena
  - Morfološki oblici krša (površinski i podzemni krški oblici) : škrape, doline, jame, ponori, uvale, polja, špilje, kaverne,...
  - Hidrogeološki oblici : slivovi s brzim dreniranjem, rijeke ponornice, estavele, ulazni izvori, podmorski izvori, vododjelnice
- Razvija se u topivim stijenama gdje voda dugi niz godina, uz pomoć CO<sub>2</sub> otapa karbonatne stijene što dovodi do procesa okršavanja i oblikovanja krša te usijecanja pukotina i škrapa kroz koje nestaju oborinske vode s površine i odlaze u podzemlje
- Vapnenci sastoje se od karbonatnih minerala, kalcit, magnezijev kalcit i argonit, a dolomitni vapnenci nastaju kombinacijom kalcita i minerala dolomita.
- Proces otapanja karbonatnih stijena, **okršavanje ili karstifikacija zove se korozija vapnenca**. Kalcijev karbonat (kalcit) iz vapnenca se s vodom i ugljikovim dioksidom raspada na ione kalcija i vodikovog karbonata tako se tope karbonatne stijene



- **Na koroziju utječe topivost minerala, pukotine i klimatske karakteristike**
- Može doći i do obrnutog procesa korozije tj. **taloženja karbonata u kršu**. Kada voda sadrži ione kalcija i vodikovog karbonata uđe u špilje ispunjene zrakom, različite temperature, tlaka i vlage dovodi do kristalizacije kalcita. Izmjena CO<sub>2</sub> je najčešći mehanizam taloženja sigua u špiljama ili sedre na krškim rijekama



Vrste poroznosti:

1. **Primarna poroznost** - međuzrnatne šupljine, malo pridonose cirkulaciji podzemne vode, a značajnije za njeno skladištenje, sporo reagira na prihranjivanje intenzivnim oborinama
2. **Sekundarna poroznost** se javlja u prslinama, pukotinama, međuslojnim pukotinama, rasjedima itd. Ove šupljine bitno sudjeluju u procesu lokalnog dreniranja podzemne vode te spajaju vodu iz šupljina primarne poroznosti s onom u šupljinama tercijarne poroznosti. Brže reagiraju na intenzivne oborine pale na sliv
3. **Tercijarna poroznost** se odnosi na šupljine promjera većeg od 2 mm. Radi se o krškim provodnicima kroz kojih voda, koja je ušla u krški vodonosnik nakon intenzivnih oborina, teče brzo. Ove su šupljine značajne za protok vode, a njihova uloga u skladištenju podzemne vode u kršu nije bitna.

Tipovi krša:

- **TROPSKI KRŠ** – tople i vlažne klime; brza korozija i oblici s naglašenim vodoravnim razvojem te prostranim podzemnim oblicima
- **POLARNI KRŠ** – hladna područja u kojima snijeg i led ubrzavaju proces raspadanja
- **KRŠ UMJERENIH ŠIRINA** – ističe se debelim karbonatnim mezozojskim i paleogenskim sedimentima, što uz naglašenu tektonsku razlomljenost utječe na podjednaku zastupljenost horizontalnih i vertikalnih oblika (Dinarski krš)
- **DINARSKI KRŠ** - prostor krša koji se širi od Alpa u Italiji preko Slovenije, Hrvatske, BiH u Crne Gore te završava u Albaniji kod rijeke Drima; sastavljen je uglavnom od karbonatnih stijena

### HIDROGEOLOŠKI KRŠKI OBLICI

#### PONORNICE

- tekućice koje nastaju koncentriranim procjeđivanjem oborinske vode u podzemlju
- javljaju se u uvjetima kontaktnog krša

#### VRULJE

- podmorski izvori, a povremeno i obalni ponori
- javljaju se u koncentriranim krugovima
- vidljiva je razlika od morske vode

#### PONORI

- veći ili manji otvori na površini u kojima nestaju ponornice
- do poniranja dolazi zbog različitog stupnja okrštenosti i propusnosti podzemlja
- na početku su najčešće vertikalni, a konačna erozijska baza je razina mora
- ponikvasti, pukotinski, aluvijalni, sitasti, spiljski, jamski,...

#### IZVORI / VRELA

- otvori na kopnu gdje voda istječe na površinu
- nadmorska visina izvora određuje razinu vodnog lica na izlasku iz vodosnika dok hidraulička vodljivost i izdašnost izvora određuje nagib vodnog lica uzvodno od izvora
- njegove promjene ovise o različitim protocima
- silazni, preljevni i uzlazni (arteški)

#### ESTAVELE

- mjesta koja za visokih vodostaja imaju funkciju vrela, a za niskih vodostaja funkciju ponora
- nalaze se u rubovima zavalata polja u kršu; u sušnim periodima postoji samo izvor na razini mora
- uslijed oborina razina podzemne vode raste pa estavele počinju funkcionirati kao izvor; nakon oborina radi kao ponori

### POVRŠINSKI KRŠKI OBLICI

#### ŠKRAPE

- nastaju površinskim otapanjem vodotopljivih karbonatnih stijena, a mogu biti veličine od 1 cm do 10m
- žljebovi nastali tečenjem kišnice i vode nastale otapanjem snijega po stijeni
- pukotinske, mrežaste i meandrirajuće ; škrapare – sustav više škrapa

## KAMENICE

- nastaju na padinama malog nagiba ili na horizontalnim površinama i predstavljaju poseban oblik škrapa
- u početku nastaju manje udubine u kojima se zadržava voda koja postupno otapa vapnenac
- korozijske (kišnica na vapnenac), biogene (organski materijal biokemijskim procesima otpada stijenu)

## UVALE / ZALJEVI / DRAGE

- izdužena, koritasta udubljenja u kršu nastala u tektonski razlomljenim zonama mehaničkim i korozivnim radom vode
- duljina uvale kreće se od nekoliko stotina metara do nekoliko stotina kilometara, a širina je znatno manja
- kroz uvale ne prolaze stalni vodotoci

## POLJA

- najčešće zatvorene depresije unutar krškog terena dugačke i do nekoliko desetaka kilometara
- predisponirana su rasjedima, zaravnjena kvartarnim ili neogenskim sedimentima i imaju podzemno odvodnjavanje
- pojava stalnih ili povremenih površinskih voda u poljima vezana je uz stalni ili povremeni površinski tok koji dotječe iz veće udaljenosti
- pojavu stalnih ili povremenih izvora uz jedan rub polja ili uz izviranje podzemnih voda kroz estavele pri čemu polje redovito bude poplavljeno
- otjecanje voda iz polja je isključivo podzemno kroz ponore koji se nalaze na suprotnom rubu od izvora ili putem estavela koje se mogu nalaziti po čitavom polju, ali su najčešće u izvornoj zoni

## ZARAVNI

- prostrane, kilometrima dugačke i široke zaravnjene karbonatne površine
- ponekad imaju razvijene ponikve ili se u njih usjekla krška polja ili riječni kanjon
- korozijsko oblikovanje uz razinu temljenice, ali često su i uz zone navlačenja
- mogu se razvit pod blagim nagibom, nije potreban mehanički rad
- ako intenzitet djelovanja krške denudacije nadmašuje intenzitet tektonskog izdizanja, proces korozijskog zaravnjivanja je uspješan

## HUMCI / BREŽULJICI / GLAVICE / KRŠKI TORNJEVI

- oblik zaostajanja krškog procesa odnosno neerodirani ostaci karbonatnih naslaga

## DOLINE U KRŠU

- slijepa dolina – nastaje kada ponornica iz nekrškog područja doteče u krško područje i nestane u podzemlju; rijeka može stvoriti krški kanjon
- viseća dolina – nastaje u slučaju kada je razina vode u rijeci viša nego razina vode u temljnici
- suha dolina – nastala je riječnom erozijom, a danas nema vodotoka

## PODZEMNI KRŠKI OBLICI

### ŠPILE / SPILE / PEĆINE

- pretežno horizontalne ili subhorizontalne podzemne šupljine u koje može ući čovjek
- erozijski i korozijski rad podzemnih voda
- temperatura je promjenjiva s obzirom na dubinu, količinu vode, godišnje doba i vezu s površinom

## PONIKVE / VRTAČE

- osnovni reljefni oblik u kršu i daju mu njegov specifični izgled
- izolirane okrugle ili ljevaste udubine promjera 10-500m čija relativna dubina rijetko prelazi 100m
- korozija, otapanjem odozgo ili urušavanjem zbog ispiranja odozdo jer se snižava razina podzemne vode i gubitka uzgonske potpore

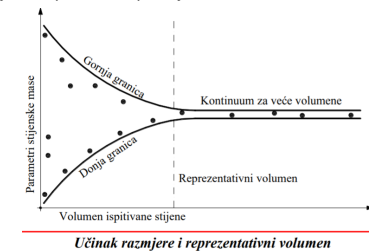
## JAME

- pretežno vertikalne udubine ili pukotine relativno manjeg promjera koje samo ponekad dosežu do razine podzemne vode
- erozijski i korozijski rad vode duž sustava pretežno vertikalnih pukotina

## OSNOVNA FIZIČKO-STRUKTURNA SVOJSTVA STIJENA

### RAZLOMLJENOST / DISKONTINUIRANOST

- **prožetost stijenske mase pukotinama odnosno pukotinskim sustavima**
- kada naprezanje, čijem je djelovanju izložena stijena, prijeđe njenu čvrstoću dolazi do pojave loma odnosno kidanja međumolekularni veza i gubljenja kohezije duž plohe loma
- **uzroci** : tektonske sile, smanjenje volumena zbog hlađenja magme, skupljanje mase zbog sušenja, naprezanje zbog vlastite težine, rasterećenje zbog erozije, temperaturne promjene,...
- diskontinuum – relativna kategorija u odnosu na veličinu promatranog područja
- učinak razmjere – odnos volumena promatranog područja i modela stijenske mase; za mali volumen se ponaša kao diskontinuum, a nakon postizanja reprezentativnog volumena stijenska masa ponaša se kao kontinuum tj. kvazikontinuum
- učinak relacije – veličine monolita i objekta koji treba graditi na stijenskoj masi

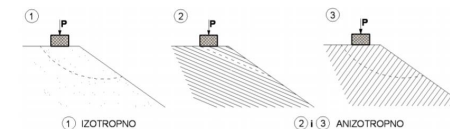


### NEHOMOGENOT / HETEROGENOST

- homogenost je svojstvo materijala odnosno sredine da u svim točkama ima jednaka svojstva
- u suprotnom se radi o nehomogenoj odnosno heterogenoj sredini
- heterogenost stijenskih masa uvjetovana je prije svega njihovim litološkim sastavom
- obzirom na učinke razmjere i relacije može se također govoriti o kvazihomogenoj sredini

### ANZIOTROPIJA

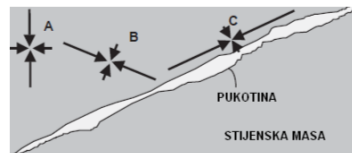
- izotropija je svojstvo materijala da u svim pravcima ima jednaka svojstva, u suprotnom je anizotropija
- može se odnositi na više različitih svojstava stijenske mase
- mogu se svojstva mijenjati od točke do točke ako sredina nije homogena
- uvjetovana je prije svega njihovim razlomljenošću i slojevitošću
- stupanj anizotropije - kvantitativna usporedba određenih fizičko – mehaničkih karakteristika duž privilegiranih pravaca



## STANJE NAPREZANJA I DEFORMACIJA U STIJENSKOJ MASI

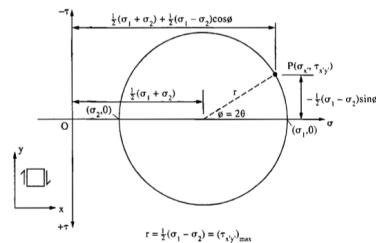
### GLAVNA NAPREZANJA

Stanje naprezanja A označava prevladavajuće stanje naprezanja u stijenskoj masi. Blježe pukotini, stanja naprezanja B i C, smjerovi glavnih naprezanja su zarotirani i veličine glavnih naprezanja se mijenjaju.



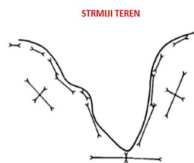
### MOHROVE KRUŽNICE NAPREZANJA

1. Pozitivna os se nalazi ispod osi  $\sigma$
2. Za dobiti jednadžbe kružnice uzima se:  $\phi = 2 \cdot \theta$   
Dakle, koja god rotacija se dogodi u stvarnosti, dvostruka rotacija se dogodi na Mohr-ovoj kružnici
3. Glavna naprezanja su najveća i najmanja vrijednost normalnog naprezanja i nalaze se na osi  $\sigma$
4. Dvije točke koje predstavljaju ravnine glavnih naprezanja leže na suprotnim krajevima promjera Mohr-ove kružnice. Ravnine glavnih naprezanja su u stvarnosti međusobno okomite
5. Ravnine najvećih posmičnih naprezanja se nalaze pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na ravnine glavnih naprezanja



### PRIMARNO STANJE NAPREZANJA / IN-SITU NAPREZANJA

- Stijenska masa koja je ispod površine nalazi se prije inženjerskih zahvata u stanju primarnih naprezanja
- Nastala su kao rezultat mase naslaga stijene i tektonskih aktivnosti u zemljinoj kori
- Može se pretpostaviti red veličine naprezanja i njihov smjer, ali nikad upotpunosti točan ako ne mjerimo
- Preko primarnih naprezanja određujemo veličinu i smjer djelovanja najvećeg glavnog naprezanja, u kojem smjeru doći će do loma, smjer kretanja podzemne vode te o rubnim uvjetima za analize naprezanja
- Pretpostavlja se da tri glavna naprezanja prirodnog in-situ polja djeluju vertikalno i horizontalno (1+2) → teorija elastičnosti
- Na površini stijene horizontalne površine smjerovi glavnih naprezanja su vertikalni i horizontalni, a ova pretpostavka se koristi i kod većih dubina, ali ne vrijedi na manjim dubinama kod strmih terena (komponenta okomita na površinu je nula)
- Međutim to ne vrijedi za manje dubine na strmijim terenima zato jer površina, bez normalnih i posmičnih naprezanja, uvijek formira trajektoriju glavnog naprezanja  
Ispod površine strmog terena je jedno glavno naprezanje okomito na kosinu i jednako nuli, dok druga dva glavna naprezanja leže u ravnini kosine
- Vertikalno naprezanje  $\sigma_v = \gamma \cdot z$   
 $\gamma$  – zapremnska težina slojeva iznad dubine na kojoj se određuju naprezanja  
 $z$  – dubina na kojoj se određuje naprezanje
- Uz pomoć Youngovog modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta mogu se dobiti izrazi za deformacije duž bilo koje osi
- Horizontalno naprezanje  $\sigma_H = K \cdot \sigma_v$  K- koeficijent bočnog pritiska stijenske mase  
 $K = 0,25 + 7 \cdot E_h \cdot \left(0,001 + \frac{1}{z}\right)$   $E_h$  – srednji modul deformabilnosti gornjeg dijela zemljine kore
- Omjer horizontalnih i vertikalnih naprezanja u ovisnosti o modul deformabilnosti je rezultat: erozije, tektonskih aktivnosti, anizotropije stijenske mase, lokalnih efekata u blizini diskontinuiteta i efekta mjerila



## LABORATORIJSKI ISTRAŽNI RADOVI

### ULTRAZVUČNA ISPITIVANJA

- Određuje se brzina širenja elastičnih valova na laboratorijskim uzorcima
- Primjena
  - o Ispituje se homogenost stijene
  - o određivanja modula elastičnosti pri malim deformacijama
  - o mjerenje brzine širenja uzdužnog vala
  - o procjena jednoosijalne tlačne čvrstoće
- Princip:
  - o Generator impulsa preko odašiljača impulsa generira uzdužni val koji prolazi kroz uzorak stijene dužine L i registrira se u prijemniku
  - o Vremenski interval od trenutka kada impuls napušta odašiljač pa do trenutka prijema impulsa, predstavlja vrijeme impulsa
- Brzina širenja uzdužnog vala  $v = \frac{L}{t} \left[\frac{km}{s}\right]$  L – dužina stijene[km] t – vrijeme prolaska impulsa [s]
- Frekvencija sonde  $f_0 > \frac{7000}{a} [kHz]$  a – debljina uzorka [mm]
- Modul elastičnosti stijene pri malim deformacijama  
 $E = \rho \cdot v^2 [GPa]$   $\rho$  – gustoća [g/cm<sup>3</sup>] v – brzina [km/s]
- Tlačna čvrstoća stijene  $\sigma_c = A \cdot e^{Bv} [MPa]$  A – konstanta u MPa B – konstanta u s/km v – brzina u km/s

### SKLEROMETAR – SCHIMDT HAMMER

- Primjena: procjena jednoosijalne tlačne čvrstoće stijene
- Sklerometrom se mjeri veličina odskoka utega koja ovisi o površinskoj tvrdoći i elastičnosti stijenske mase, njime se određuje indeks sklerometra na ispitanom mjestu
- Započinje se s provjerom ispravnosti sklerometra na metalnom kalibratoru ; Ravna, čista i suha površina
- Uzorci se postavljaju kao kruto pričvršćeni radi zaštite od vibracija i pomaka tijekom ispitivanja, a postolje je na ravnoj podlozi
- Od izmjerenih odskoka izračuna se srednja vrijednost i izbacuje se svi odskoci koji su  $\pm 4$  od srednje vrijednosti
- U slučaju ako je izbačeno preko 30% odskoka, ispitno mjesto se izbacuje
- Od preostalog skupa vrijednosti izračuna se srednja vrijednost koja je za ispitano mjesto indeks sklerometra
- Vrijednosti odskoka od 10 do 60. Najmanji broj odgovara slabijoj stijeni ( $\sigma_c < 20$  MPa ), dok najveći broj odgovara vrlo čvrstoj i izrazito čvrstoj stijeni ( $\sigma_c > 150$  MPa )
- Prednost: brza i nerazorna metoda, maleni i lako prenosivi uređaj, ispitivanje se može vršiti na terenu i u laboratoriju
- Nedostaci: rezultati se odnose samo na površinski sloj < 3 cm dubine

### PLT / INDEKS TOČKASTE ČVRSTOĆE

- Metoda za određivanje čvrstoće stijene pri opterećenju u točki
- Indeksn test za klasifikaciju stijenske mase izravno ili u korelaciji s jednoosnom tlačnom čvrstoćom
- Sastoji se u tome da se uzorci stijene lome primjenom koncentriranog opterećenja preko para zaobljenih konusnih šiljaka; Ispitivanje se provodi na valjkastim uzorcima s promjerom do 50mm
- Ako je uzorak stijene u obliku jezgre tada se vrše dijametralni i aksijalni testovi, u suprotnom blok test i test nepravilnih uzoraka; može se izvoditi i u laboratoriju i na terenu
- Postupak:
  - o Ispitivanje se provodi na uzorcima pravilnih ili nepravilnih oblika, najčešće su valjkasti uzorci D>50mm
  - o Može se provesti poprečni ispitivanje, osno ispitivanje ili ispitivanje nepravilnih uzoraka

– Dijametralni test

- o Pogodni su uzorci jezgre čije je omjer dužine i širine veći od 1
- o Udaljenost između dodirne točke šiljaka i uzorka do najbližeg slobodnog tuba treba biti najmanje polovica promjera jezgre
- o Udaljenost između šiljaka mjerena su s 2% točnosti

– Aksijalni test

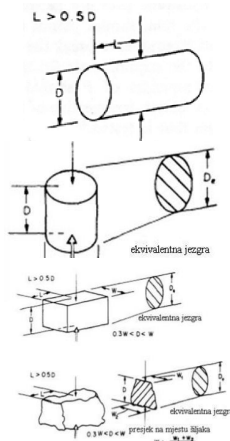
- o Pogodni uzorci jezgre čiji je omjer dužine i širine između 0,3 – 1
- o Pile se ili se odvajaju dijetlom kako bi se mogli testirati
- o Udaljenost između šiljaka mjerena su s 2% točnosti
- o Širina okomita na smjer nanošenja opterećenja bilježi se s točnosti 5%

– Blok test & Test na nepravilnom uzorku

- o Omjer dužine i širine između 0,3 – 1
- o Udaljenost između šiljaka mjerena su s 2% točnosti
- o Širina okomita na smjer nanošenja opterećenja bilježi se s točnosti 5%

– Anizotropna stijena

- o Uslojeni uzorak treba ispitivati u smjerovima koji daju najmanje i najveće vrijednosti čvrstoće
- o Najbolji se rezultat dobije kada je os jezgre okomita na ravnine sloma
- o Indeks čvrstoće u pravcu najmanje čvrstoće → opterećenje prisutno duž jedne ravnine
- o Indeks čvrstoće u pravcu najveće čvrstoće → opterećenje raspoređeno okomito na ravnine sloma



– Proračun

- o Nekorigirana čvrstoća  $I_s = \frac{P}{D_e^2} P$  – maksimalna sila zabilježena u trenutku sloma
- o  $D_e$  – ekvivalentni promjer jezgre dijametralni  $D_e^2 = D^2$  ostali  $D_e^2 = \frac{4 \cdot W \cdot D}{\pi}$
- o **Korekcija indeksa čvrstoće u odnosu na dimenzije uzorka**
  - Definira se kao čvrstoća uzorka izmjerena u dijametralnom testu na uzorku promjera 50 mm i označava se kao  $I_{s(50)}$
  - Najpouzdanija metoda korekcije  $I_s$ -a je testiranje uzoraka različitog promjera i grafički prikaz odnosa maksimalne sile i ekvivalentnog promjera
  - preko tog dijagrama dobije se pravac preko kojeg se dobije vrijednost maksimalne sile kada je  $D_e^2 = 2500 \text{ mm}^2$

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \quad F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad F - \text{faktor korekcije u odnosu na dimenzije}$$

- o Proračun srednje vrijednosti – izbacuju se dvije najveće i najmanje vrijednosti od 10 ili više rezultata i izračuna se aritmetička sredina; ako je mali broj uzoraka tada se izbacuje po jedna najveća i najmanja vrijednost
- o **Indeks anizotropije**
  - Definira se kao omjer srednjih vrijednosti mjerenih okomito i paralelno s ravninama sloma tj. omjer najvećih i najmanjih indeksa PLT-a
  - Za kvaziizotropne stijene indeks je blizu 1, a za anizotropne je preko 1 vrijednost

**JEDNOOSNA VLAČNA ČVRSTOĆA**

- Jednaka je najvećem vlačnom naprezanju koje stijenska masa može preuzeti neposredno prije sloma tj opisuje otpor stijenske mase vlačnom naprezanju
- **Izravne metode**
  - o Uzorak cilindričnog oblika, promjera ne manjeg od 54mm s glatkim i ravnim površinama
  - o Oba kraja se zacementiraju za metalne ploče (promjer metalnih ploča ne manji od uzorka ne veći 2mm; debljina ploče 5mm; debljina cementnog sloja ne smije bit veća od 1,5 mm)

- o Izračuna se kao omjer najveće vlačne sile koju uzorak može preuzeti neposredno prije sloma i površine presjeka uzorka

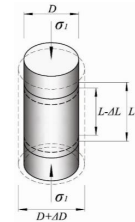
– **Neizravne metode – brazilski test (lakše pri izvedbi)**

- o Stijena se podvrgava tlačnom opterećenju
  - o Većina stijena u dvoosnom stanju naprezanja popušta vlačno kada je jedno glavno naprezanje vlačno, a drugo glavno naprezanje je tlačno, a ono nije tri puta veće od vlačnog naprezanja
  - o Ispituju se cilindrični uzorci promjera ne manjeg od 54mm
  - o Sila se nanosi konstantom brzinom i zapisuje se maksimalna brzina  $\sigma_t = \frac{0,636 P}{D \cdot t}$
- P – sila u trenutku sloma [N] D – promjer uzorka [mm] t – širina uzorka mjerena u središtu [mm]

**POKUS JEDNOOSNOG TLAKA**

- Klasifikacija čvrstoće i karakterizacija intaktne stijene
- Cilindrični uzorak promjera ne manjeg od 47mm, a visine 2-2,5 puta veće od promjera
- Opterećuje se uzdužnom silom uz mjerenje uzdužnih i radialnih deformacija
- Određivanje modula elastičnosti (srednji, tangenti, sekantni), Poissonov koeficijent, volumska deformacija
- Promjena visine uzorka odnosno uzdužna deformacija mjeri se na način da se na uzorak pričvrste nosači senzora za mjerenje pomaka

$$\epsilon_{uzd} = \frac{\Delta L}{L} \quad \epsilon_{rad} = \frac{\Delta D}{D} \quad \sigma_1 = \frac{P}{A}$$

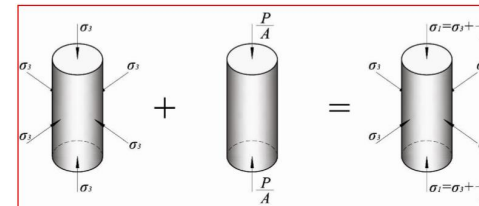
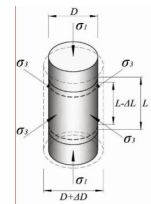


**Modul elastičnosti**

- **Srednji** - omjer razlike naprezanja i razlika deformacija za odabrano područje naponsko - deformacijske krivulje
- **Tangenti** - omjer prirasta naprezanja i prirasta deformacija za vrijednost naprezanja od 0.5oc
- **Sekantni** - omjer naprezanja i deformacije u željenoj točki naponsko-deformacijske krivulje

**POKUS TROOSNOG TLAKA**

- Cilindrični uzorak promjera većeg 47mm, a visine 2-2,5 puta veće od promjera
- Hoekova ćelija za provođenje troosnih ispitivanja → dovodi se u hidrostatsko stanje naprezanja nametanjem ćelijskog tlaka i opterećuje se uzdužnom silom uz mjerenje deformacija
- Mjere se uzdužne i radialne deformacije uz kontinuirano opterećenje silom



**SADRŽAJ KARBONATA**

- Mjeri se volumen oslobođenog CO<sub>2</sub> iz čega se određuje masa ako se zna temperatura i atmosferski tlak
- Pomoću mase CO<sub>2</sub> i težinskog odnosa CaCO<sub>3</sub> i CO<sub>2</sub> dobije se masa kalcijeva karbonata
- Sadržaj karbonata u stijeni je odnos mase karbonata prema masi suhe stijene
- A – težina suhog uzorka [g] B – količina oslobođenog CO<sub>2</sub> [cm<sup>3</sup>] C – težina 1cm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> [mg]
- D – ugljični dioksid u postotku od suhe mase uzorka E – kalcijev karbonat u postotku od mase suhog uzorka

$$D = \frac{B \cdot C}{A \cdot 1000} \cdot 100 [\%]$$

$$E = D \cdot 2.274 [\%]$$

**TRAJNOST – SLAKE DURABILITY TEST**

- Kvalitativno određivanje trajnosti
- Određuje se otpornost stijene slabljenju i dezintegraciji pri cikličkom vlaženju i sušenju
- Postotak stijene koja je ostala u bubnju, pri suhoj masi, predstavlja slake durability indeks
- Postupak:
  - o 10 uzoraka težine 40-60g (ukupno cca 500g) stave se u uređaj koji sadrži dva bubnja duljine 100mm i promjera 140mm te se bilježi točna masa ispitanih uzoraka ( $m_A$ )
  - o Bubljevi se rotiraju u posudama s vodom koja je 20mm ispod osi bubnjeva, konstantom brzinom 20 okretaja u minuti
  - o Nakon 10-o minutne rotacije uzorci stijena se suše na 105°C i mjeri se njihova masa ( $m_B$ )
  - o Ponovi se opet ciklus rotiranja i sušenja te se izmjeri preostala masa nakon drugog ciklusa ( $m_C$ )
  - o Indeks  $I_d$  se računa za prvi i za drugi ciklus, a uzima se onaj koji daje nižu klasifikaciju trajnosti

$$I_{d1} = \frac{m_B}{m_A} \cdot 100 \qquad I_{d2} = \frac{m_C}{m_A} \cdot 100$$

**UVOD**

- **Standardni terenski istražni radovi:** istražna bušenja, mjerenja primarnog stanja naprezanja, metode terenskih ispitivanja krutosti
- **Prednosti:** ispitivanje stijene u prirodnoj sredini, mogućnost dobivanja kontinuiranih podataka o stijeni po dubini

**ISTRAŽNA BUŠENJA**

- Dobivaju se cilindrični uzorci za ispitivanje intaktne stijene i diskontinuiteta u laboratoriju
- Unutar bušotine mogu se izvesti pokusi za statičko određivanje čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase te stanje primarnih naprezanja
- Također mogu određivati mehanička svojstva stijene pri malim deformacijama i vodopropusnost stijenske mase
- Mogu se ugraditi uređaji za opažanje pomaka ili se mogu snimati stjenke bušotine i analizirati jezgre
- **Uloga:**
  - o Geofizička ispitivanja radi određivanja mehaničkih svojstva stijene mase pri malim deformacijama
  - o Ispitivanje vodopropusnosti stijenske mase
  - o Ugrađivanje uređaja za opažanje pomaka u bušotinu
  - o Uvid u stanje stijenske mase snimanjem stijenki bušotine i analiziranjem izvađenih jezgri

**MJERENJA PRIMARNOG STANJA NAPREZANJA (izravne metode)**

- kako bi se upotpunosti odredilo stanje naprezanja u nekoj točki stijene treba poznavati 6 komponenti tenzora naprezanja ili pravce i veličine tri glavna naprezanja
  - o tlačni jastuk – jedna komponenta normalnog naprezanja može se odrediti
  - o hidraulično frakturiranje – pretpostavljena su glavna naprezanja s osima (dva određena, jedno procijenjeno)
  - o usbm torpedo – 3 komponente u 2D određene su iz tri mjerenja promjene promjera bušotine
  - o csiro overcoring – svih šest komponentni je određeno iz šest ili više mjerenja deformacija
- **ISPITIVANJE TLAČNIM JASTUCIMA**
  - o ako postoji izravan pristup licu stijene
  - o mjere se naprezanja u području poremećenja stijenske mase uslijed iskopa galerije u kojoj se provode ispitivanja
  - o ekstrapoliranje rezultata pomoću teorije elastičnosti ili numeričkim modeliranjem
  - o tlačni jastuci sastavljeni su od dvije tanke ploče međusobno zavarene po svojim rubovima i otvor za dovod ulja u prostor između ploča pomoću kojeg se povećava tlak
  - o postupak:
    - na lice stijene se postave dva repera na razmaku  $d$  koji je precizno izmjeren
    - napravi se procijep u stijeni između dva repera; ako je normalno naprezanje u stijeni tlačno, razmak između repera se smanjuje
    - u procijep se postavlja tlačni jastuk i vrši se injektiranje procijepa
    - povećavanjem tlaka u jastuku, dovođenje ulja, razmak između repera će se povećavati
    - kada razmak između repera dosegne vrijednost  $d$ , bilježi se vrijednost sile u tlačnom jastuku i prestaje ispitivanje
  - o kalibracijom jastuka mogu se izbjeći greške kao što su utjecaj rubova jastuka
  - o tri uvjeta za uspješno korištenje:
    - stijenska masa u zidovima iskopane galerije ne smije biti poremećena
    - stijenska masa treba se ponašati elastično
    - geometrija galerije mora biti takva da za nju postoji zatvoreno rješenje za izračun naprezanja

Zabranjuju upotrebu eksploziva

- o dobiva se samo jedna komponenta naprezanja pa kako bi dobili svih šest komponenti tenzora moramo provesti bar šest ispitivanja s različitim orijentacijama tlačnih jastuka
  - preporuka : tri jastuka u suprotnim zidovima otvora i tri jastuka u kaloti otvora ( 9 ispitivanja)
- o ako se normalna naprezanja okomita na ravninu tlačnog jastuka odrede iz tri točke duž sekcije galerije (vrijednosti popuštanja) tada je moguće odrediti vrijednost komponenti naprezanja postupkom inverzije matrica

#### – HIDRAULIČNO FRAKTURIRANJE

- o Procjena naprezanja u stijeni do značajnih dubina korištenjem bušotina velikih dubina (5-6 km)
- o Prednost je to što se izvodi daleko od područja iskopa tj van zone utjecaja promjene stanja naprezanja izazvanog iskopom u stijeni
- o Postupak:
  - Izbuši se bušotina do željene dubine te se kamerom snimi unutrašnjost kako bi se provjerilo ima li pukotina koje onemogućavaju provedbu ispitivanja
  - Voda se pumpa u određeni izolirani dio bušotine; izolacija se vrši pakerima u duljini 1m
  - Kako se tlak vode povećava, početna tlačna naprezanja na zidovima bušotine se smanjuju i nakon nekog vremena postaju vlačna
  - Kada naprezanje dosegne vrijednost  $T_0$  dolazi do formiranja pukotine, a tlak vode je  $p_{c1}$
  - Ako se pumpanje vode nastavi, pukotina se proširuje i s vremenom će tlak u bušotini pasti na vrijednosti  $p_s$
- o Za vrijeme trajanja pokusa mjeri se tlak vode:
  - **Breakdown pressure  $p_{c1}$  – formiranje pukotine**
  - **Shut-in pressure  $p_s$  – potreban da se pukotina drži otvorenom**
- o Kako bi se dobile vrijednosti primarnih naprezanja, potrebno je odrediti orijentaciju hidraulički inducirane pukotine
  - Orijetacija pukotine može se dobiti fotografiranjem ili snimanje kamerom na dubini ispitivanja no često se dogodi da se pukotina smanji ili zatvori nakon ispitivanja
  - Alternativna metoda je korištenje impression pakera (gumeni paker) na kojem ostaje trag pukotine
- o Većinom se formira vertikalna pukotina (ispitivanja većih od 800m)
- o Glavni nedostatak je to što se ne mogu izmjeriti sve komponente naprezanja
- o Kako bi se dobile sve komponente naprezanja, treba uvesti određene pretpostavke
  - Pravci djelovanja glavnih naprezanja paralelni su i okomiti na os bušotine
  - Vrijednost trećeg glavnog naprezanja se pretpostavlja
  - Vertikalno glavno naprezanje je rezultat težine nadsloja
- o Analiza rezultata je olakšana ako se pretpostavi da penetracija vode u pore stijene nema utjecaja na naprezanja u okolici bušotine
- o **Prihvaćajući takvu pretpostavku moguće je koristiti rezultate distribucije naprezanja oko kružnog otvora homogene, elastične i izotropne stijene da bi se dobilo početno stanje naprezanja (Kirschovo rješenje)**
  - Tangencijalno naprezanje na zidu bušotine je najmanje na presjeku A-A' ima vrijednost  $\sigma_{\theta} = 3 \cdot \sigma_{h,min} - \sigma_{h,max}$
  - Kada se nametne pritisak  $p$  vlačno naprezanje dodaje se po cijelom obodu jednako, a uvjet za nastanak vertikalne pukotine je vlačno naprezanje u točki A koje je jednako vlačnoj čvrstoći  $-T_0$   $3 \cdot \sigma_{h,im} - \sigma_{h,max} - p_{c1} = -T_0$
  - Jednom kad je formirana pukotina, povećava se sve dok je nametnuti tlak veći od naprezanja okomitog na ravninu pukotine
  - Pukotine napreduju u ravnini okomitoj na treće glavno naprezanje
  - Naprezanje okomito na ravninu pukotine jednako je shut-in tlaku  $\sigma_{h,min} = p_s$

- Dvije navedene jednadžbe omogućuju određivanje većeg i manjeg normalnog naprezanja u ravnini okomitoj na bušotinu ako je poznata vlačna čvrstoća stijene
- Ako je tlak u bušotini smanjen pa je povećan veći od  $p_s$ , hidraulička pukotina će se zatvoriti pa otvoriti, a novi vršni tlak  $p_{c2}$  pa vrijednost vlačne čvrstoće stijene  $T_0 = p_{c1} - p_{c2}$

#### – OVERCORING METODE

- o Osnovu predstavlja bušenje bušotine do određene pozicije na kojoj se žele odrediti naprezanja, na dnu takve bušotine se izbuši još jedna manjeg promjera (pilot bušotina) u koju se umetne sonda
- o **Sonda radi na jedan od dva načina**
  - **Mjeri promjenu promjera bušotine manjeg promjera**
  - **Mjeri deformaciju zidova bušotine manjeg promjera**
- o Prednost je to što se izvodi dovoljno daleko od područja iskopa tj van zone utjecaja promjene stanja naprezanja izazvanog iskopom u stijeni
- o Nakon izvršenog nultog mjerenja kreće se s postupkom overcoringa – bušenje bušotine većeg promjera od pilot bušotine čime se stijena oslobađa utjecaja okolnog masiva
- o Naprezanja u stijenskoj masi mogu se dobiti na dva načina:
  - Nakon overcoringa, izvadi se jezgra unutar koje se nalazi sonda; na jezgru se postavlja uređaj koji aplicira naprezanje dok se promjena promjera konstantno bilježi naprezanja kojima se mjerene veličine vrata na vrijednosti koje su imale prije overcoringa su naprezanja u ravnini okomitog na os bušotine u stijenskoj masi
  - Mjerenjima deformacije stijenske mase gdje su in-situ naprezanja mogu se izračunati iz izmjerenih deformacija uz poznavanje elastičnih karakteristika stijene
- o Dvije najzastupljenije metode: USBM torpedo i CSIRO overcoring
- o **USBM torpedo**
  - Tehnologija koja omogućava određivanje cjelokupnog stanja naprezanja iz tri mjerenja promjene promjera bušotine (i to u tri pravca koja se sijeku pod kutem od  $120^{\circ}$ )
  - Nakon bušenja bušotine i pilot bušotine, unosi se sonda na kojoj se nalaze šest mjerača deformacija
  - Nakon overcoringa naprezanja po plaštu jezgre padaju na nulu time dolazi do povećanja promjera, a deformacija se registrira mjeračima deformacije
  - Šuplji cilindar sa sondom se zatim vadi iz bušotine i postavlja u biaksijalni uređaj da bi se odredio modul elastičnosti na način da se aplicira naprezanje po plaštu uz istodobno mjerenje deformacija
  - Da bi se odredile sve komponente naprezanja, potrebno je izvesti najmanje tri ovakva ispitivanja s različitim orijentacijama bušotina
- o **CSIRO overcoring**
  - Sličan USBM uz razliku da se sonda lijepi za stjenke bušotine i mjeri deformacije za različite orijentacije i lokacije unutar bušotine
  - Takve sonde se mogu koristiti samo jedanput
  - Mogu se odrediti sve komponente tenzora naprezanja iz razloga jer se na sondi nalaze mjerači deformacija koji su postavljeni u tri rozete od kojih svaka sadrži tri do četiri mjerača deformacija te se odjednom može izmjeriti 9 ili 12 deformacija

#### METODE TERENSKIH ISPITIVANJA KRUTOSTI

- Zahvaćaju različite volumene stijenske mase koje su u većini slučajeva značajno veći od laboratorijskih uzoraka i kao takvi mogu reprezentirati ponašanje stijenske mase
- **POKUS OPTEREĆENJA PLOČOM (plate loading test)**
  - o Određivanje modula deformacije mjerenjem pomaka stijenske mase izazvanih opterećivanjem kružnom pločom odgovarajućeg promjera
  - o Za potrebe temeljenja teških građevina na stijeni vrši se opterećenjem pločom na površini terena

- Prednost mjerenja pomaka po dubini leži u činjenici da se time izbjegava poremećenost stijenske mase na kontaktu što značajno smanjuje dobiveni modul deformacije ako se pomaci mjere samo na površini
- Opterećenje se prenosi hidrauličkim prešama za koje treba osigurati kontra teret što se u praksi najčešće postiže sidrenjem
- Za projektiranje tunela pokus se izvodi u probnim tunelima ili galerijama posebno izvedenim za potrebe ispitivanja ili na početnim dionicama tunela koji se izvode prednost: mogućnost postizanja velikih naprežanja uz istovremeno korištenja ploča velikog promjera zbog jednostavnog načina razupiranja o suprotne stjenke tunela
  - Pokus se izvodi sa dvije ploče koje opterećuju suprotne stjenke tunela
  - Provođenjem više pokusa u različitim smjerovima može se odrediti stupanj anizotropije stijenske mase obzirom na deformabilnost
- Da bi se u najvećoj mogućoj mjeri osigurala pretpostavka elastičnog poluprostora nužno je plohu preko koje se prenosi opterećenje proširiti u odnosu na promjer ploče
- Opterećenje stijenske mase može se izvesti primjenom fleksibilne ili krute ploče ovisno o krutosti materijala koji se ispituje
- Kruto prenošenje opterećenja ostvaruje se izravnom prijenosom opterećenja na stijensku masu preko čeličnih ploča različite debljine, a fleksibilan prijenos opterećenja postiže se umetanjem tlačnih jastuka između ploče i stijenske mase
- Primjena krute ploče znatno je povoljnija kada se radi o ispitivanju tla ili mekih stijena, a primjena fleksibilnih ploča kod ispitivanja krutih stijena
- Posljedica primjene fleksibilne ploče je ravnomjerna razdioba naprežanja po cijeloj površini ploče, a posljedica primjene krute ploče je ravnomjerna razdioba pomaka po cijeloj površini ploče
- Nedostaci ovakvog načina određivanja modula deformacije stijenske mase:
  - za određivanje modula deformacije potrebno je pretpostaviti Poissonov koeficijent
  - primjenom navedenih izraza često su se dobivali moduli deformacije nekoliko puta veći od modula intaktne stijene iz laboratorijskih pokusa što je fizikalno nemoguće
  - za svaki interval mjerenja su se dobivale drugačije vrijednosti modula deformacije stijenske mase što je teško prihvatljivo obzirom na relativno mali volumen stijenske mase zahvaćen ispitivanjem, tj. da su već na dubini od 3 promjera ploče pomaci toliko mali da se praktički ne mogu ni izmjeriti sa zadovoljavajućom točnošću

#### – POKUS RADIJALNOG OPTEREĆENJA

- Zasniva se na određivanju modula deformacije mjerenjem pomaka stijenske mase izazvanih radijalnim opterećivanjem stijenske mase
- Radijalno opterećenje vrši se hidrauličkim prešama ili pritiskom vode, a pomaci po dubini stijenske mase mjere se ugrađenim ekstenzometrima
- Pokus se odvija u testnim komorama kružnog poprečnog presjeka velikog radijusa ili u početnim dionicama tunela
- Zahvaća veliki volumen stijenske mase pa najbolje od svih pokusa reprezentira stijensku masu sa svim njenim oslabljenjima i diskontinuitetima, što je i najveća prednost ovakvog ispitivanja, a moguće je i ispitati stupanj anizotropije stijenske mase obzirom na krutost
- Glavni nedostatak ovog pokusa je visoka cijena i trajanje ispitivanja zbog čega se danas rijetko izvode
- Pokus se provodi radijalnim opterećivanjem i rasterećivanjem stijenske mase uz prosječni inkrement opterećenja i rasterećenja 0,05 MPa/min do predviđenog maksimalnog pritiska. Nakon dostizanja maksimalnog pritiska pomaci se mjere sve do prestanka deformacija
- Preporučljivo je dostizanje maksimalnog naprežanja kroz najmanje 3 ciklusa opterećenja i rasterećenja

- U slučaju da se za postizanje jednolikog radijalnog opterećenja koristi hidraulička preša, aplicirani pritisak na preši se mora korigirati da se dobije odgovarajući ravnomjerno raspodijeljeni pritisak na betonsku oblogu komore
- Ekvivalentni pritisak  $p_2$  na 'mjernom radijusu'  $r_2$  iza betonske obloge i zone oslabljene stijenske mase iznosi

$$p_2 = \frac{r_1}{r_2} p_1 = \frac{\sum b}{2 \cdot \pi \cdot r_2} p_m$$

$$p_1 = \frac{\sum b}{2 \cdot \pi \cdot r_1} p_m$$

gdje je:

- $p_1$  – ravnomjerni pritisak na oblogu radijusa  $r_1$
- $p_2$  – aplicirani pritisak na hidrauličkoj preši
- $b$  – širina segmenta preše preko kojeg se prenosi opterećenje.

#### – ISPITIVANJA VELIKIM TLAČNIM JASTUCIMA

- zasniva se na određivanju modula deformacije mjerenjem pomaka stijenske mase izazvanih povećanjem tlaka u velikim hidrauličkim jastucima umetnutima u prethodno izrađen prorez u stijenskoj masi
- Tlačni jastuci sastoje se od dvije čelične ploče, debljine manje od 1 mm, zavarene po rubu, između kojih se nalazi ulje
- Oblik tlačnog jastuka je kvadrat stranice duljine 1 m na koji se nastavlja polukrug promjera 1 m
- Jastuk ima jedan otvor kojim se dovodi ulje, povećava tlak i mijenja širina jastuka te drugi otvor za ispuštanje zraka i električne vodove kojima se izmjereni pomaci stijenske mase prenose do uređaja za očitavanje
- Pomaci stijenske mase mjere se okomito na plohu pružanja jastuka sa četiri kratka deformetra smještena unutar tlačnog jastuka ili u zasebne bušotine
- Prije provedbe pokusa potrebno je izvesti prorez u stijenskoj masi, proizvoljne dubine, širine 6 mm, korištenjem velike dijamantske pile. Zbog zahvaćanja većeg volumena može se u prorez postaviti veći broj tlačnih jastuka u jednoj ravni
- Zahvaća veći volumen stijenske mase od pokusa opterećenja pločom, ali manji volumen od pokusa radijalnog opterećenja u tunelima
- Postavljanjem tlačnih jastuka u različitim smjerovima lako se ispita stupanj anizotropije stijenske mase obzirom na krutost

➤ Uz pretpostavku linearnog elastičnog ponašanja stijenske mase **modul deformacije** može se odrediti iz izraza:

$$E_m = k_1 \cdot (1 - \nu^2) \frac{p}{d}$$

gdje je:

- $E_m$  – modul deformabilnosti stijenske mase na mjernom mjestu /
- $p$  – inkrement apliciranog naprežanja,  $p = p_m - p_0$
- $p_m$  – maksimalni testni pritisak
- $p_0$  – minimalni testni pritisak
- $d$  – promjena širine proreza na mjernom mjestu / od naprežanja  $p$
- $\nu$  – Poissonov koeficijent
- $k_1$  – koeficijent koji ovisi o krutosti, obliku, rasporedu i broju tlačnih jastuka, poziciji mjerne točke /, obliku testne komore u kojoj se provodi pokus i dubini tlačne pakotine nastale u stijenskoj masi tijekom pokusa

#### – FLEKSIBILNI DILATOMETAR

- zasniva se na mjerenju promjene radijusa bušotine izazvanog radijalnim širenjem dilatometarske sonde postavljene na određenoj dubini
- Radijalno opterećivanje stijenci bušotine vrši se širenjem fleksibilne membrane dilatometra izazvane povećanjem tlaka u dilatometarskoj sondi, hidraulički, pomoću komprimiranog zraka, ulja ili vode
- Fleksibilna membrana prenosi ravnomjerno raspodijeljeno opterećenje na stjenke bušotine
- Za mjerenje promjena radijusa bušotine koriste se dva tipa dilatometarskih sondi
  - Kod prvog tipa sonde registrira se promjena volumena bušotine iz koje se izračunava promjena radijusa
  - Kod drugog tipa sonde pomoću ugrađenih mjerača izravno se mjeri promjena radijusa bušotine
- Obzirom da se ispitivanja provode u bušotinama promjera 76 do 101 mm, zahvaćen je vrlo mali volumen stijenske mase, obično manje od 1/3 m<sup>3</sup>. Takav volumen nikako ne može reprezentirati stijensku masu što bitno umanjuje značaj i iskoristivost ovog pokusa

## KLASIFIKACIJE STIJENSKE MASE

- Dodatni problem predstavlja činjenica da se u vertikalnim bušotinama ustvari ispituje horizontalna krutost, dok je za npr. temeljenje znatno važnija vertikalna krutost. Promjer bušotine treba biti 0,5 do 30 mm veći od promjera dilatometarske sonde prije početka pokusa. Veća bušotina značajno bi smanjila maksimalni pritisak koji se može postići prilikom ispitivanja

Uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja stijenske mase i namakanjima pokusima u svim od duljine sonde odgovarajući elastični moduli elastičnosti se može izraziti kao:

$$E_s = (1 + \nu_s) D \frac{\Delta Q_s}{\Delta D}$$

gdje je:

- $\Delta p_s$  – inkrement tlaka
- $D$  – početni promjer bušotine
- $\Delta D$  – srednja promjena promjera bušotine

Ako se pokus provodi u raspadnoj stijenskoj masi i ako je  $p_1 \geq 2p_2$  ove radijalne pokusne ča se otvori pa se dilatometrijski moduli elastičnosti izračunava prema izrazu:

$$E_s = (1 + \nu_s) D \frac{\Delta Q_s}{\Delta D} \left( 1 + \nu_s \right) \left( \frac{p_1}{2p_2} + 1 \right)$$

$\Delta D$  – srednja promjena promjera bušotine kada se tlak povećava od 0 do  $p_1$ .

### – KRUTI DILATOMETAR

- zasniiva se na mjerenju promjene radijusa bušotine izazvanog širenjem krute dilatometarske sonde postavljene na određenoj dubini
- Opterećenje na stijensku masu prenosi se preko dvije krute zakrivljene ploče dilatometra čije je međusobno razmicanje izazvano hidrauličkim povećanjem tlaka u dilatometarskoj sondi pomoću komprimiranog zraka, ulja ili vode
- Ispitivanja se provode u bušotinama promjera 76,2 mm čime je zahvaćen mali volumen stijenske mase koji ne može reprezentirati volumen stijenske mase zahvaćen izvedbom geotehničkih konstrukcija, što umanjuje značaj i iskoristivost ovog pokusa
- Prednost ovog tipa dilatometra je mogućnost ispitivanja u svim, pa i u horizontalnom smjeru, čime se dobije vertikalna krutost značajna za temeljenje objekata na stijeni, što se ne može dobiti korištenjem fleksibilnog dilatometra
- Zakretanjem krutih dilatometarskih ploča moguće je ustanoviti stupanj anizotropije stijenske mase po dubini u odnosu na krutost
- Osim pretpostavke linearno elastičnog ponašanja stijenske mase, u proračunu modula deformacije pretpostavlja se da je ostvaren potpun kontakt između krutih dilatometarskih ploča i stijenski bušotine
- Iako su dilatometarske ploče relativno krute ne može se izbjeći njihovo savijanje za vrijeme ispitivanja, posebice kod ispitivanja krutih stijena. Zbog toga se moduli deformacije dobiveni pomoću izraza za modul deformacije stijenske mase moraju korigirati

Modul deformacije stijenske mase ( $E_{mod}$ ) računa se prema izrazu (Heuze i Amadei, 1985.):

$$E_{mod} = 0.86 \cdot 0.93 \cdot D \cdot (\Delta Q_s / \Delta D) \cdot T$$

gdje je:

- 0.86 – koeficijent kojim se uzima u obzir 3D djelovanje
- 0.93 – hidraulička efikasnost dilatometra
- $D$  – promjer bušotine
- $\Delta D$  – promjena promjera bušotine
- $\Delta Q_s$  – inkrement nametnutog pritiska
- $T$  – koeficijent ovisan o Poissonovom koeficijentu
- $\Delta Q_s / \Delta D$  – nagib linearom dijela krivulje opterećenja

### OSNOVNI UVJETI

- Podjela određene stijenske mase u grupe sa sličnim ponašanjem
- Osiguranje osnove za razumijevanje karakteristike i ponašanja svake grupe
- Davanje kvantitativnih podataka za inženjerski projekt
- Osiguranje zajedničke osnove za uspješnu suradnju svih sudionika u projektu

### SVOJSTVA KLASIFIKACIJA

- Jednostavna, razumljiva, lako se shvaća i pamti
- Svaki izraz mora biti jasan, a terminologija opće prihvaćena
- Uključena samo najznačajnija svojstva stijenske mase
- Temeljena na parametrima koji se mogu mjeriti i odrediti brzim i jeftinim pokusima na terenu
- Temeljena na bodovnom sustavu koji može ocijeniti relativnu važnost klasifikacijskih parametara
- Daje kvantitativne podatke za projekt podgradnog sustava

### TERZAGHIJEVA KLASIFIKACIJA

- Razvijena za potrebe projektiranja i izvedbe tunelskih podgradnih sustava
- Prva praktična i racionalna metoda procjene opterećenja stijenske mase koje se prihvaća ugradnjom podgrade od čeličnih lukova
- Opterećenje se određuje u ovisnosti od kategorije stijenske mase, te širine i visine tunela i predstavlja težinu zone rastresene stijenske mase ispod rasteretnog svoda
- Pri tome je posebno značajno po prvi put uvođenje sljedećih pojmova u mehaniku stijena:
  - intaktna stijenska masa
  - raspadnuta stijenska masa
  - uslojena stijenska masa
  - stijenska masa podložna skupljanju
  - umjereno ispućala stijenska masa
  - stijenska masa podložna bubrenju
  - stijenska masa u blokovima i raspucala stijenska masa
- Značaj Terzaghijeve klasifikacije je doprinosu opisu pojedinih značajki stijenske mase koje daju presudan utjecaj na ponašanje stijenske mase, naročito u uvjetima u kojima geostatička naprezanja imaju presudan utjecaj
- Nedostaci Terzaghijeve klasifikacije:
  - klasifikacija je preopćenita da bi dozvolila objektivnu procjenu kvalitete stijenske mase
  - ne daje kvantitativne informacije o osobinama stijenske mase
  - prestaje biti prihvatljiva nakon usvajanja modernih metoda izvođenja radova u tunelogradnji uz korištenje mlaznog betona i geotehničkih sidara

### LAUFFEROVA KLASIFIKACIJA

- Razvijena za potrebe projektiranja i izvedbe tunelskih podgradnih sustava
- Predlaže korelaciju između vremena postojanosti stijenskog iskopa nepodgrađenog raspona u odnosu na različite klase na koje je podijeljena stijenska masa
- Vrijeme postojanosti nepodgrađenog raspona predstavlja vrijeme u kojem tunelski nepodgrađeni raspon može stajati bez podgrađivanja
- Značaj Laufferove klasifikacije ili koncepta vremena nepodgrađenog iskopa je u zahtjevima na skraćjenje vremena potrebnog za ugradnju podgrade

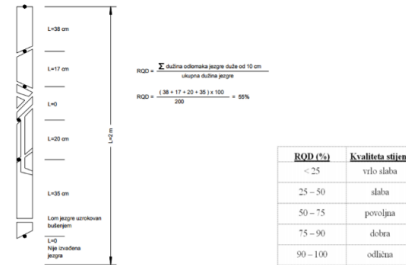
### MODIFICIRANA LAUFFEROVA KLASIFIKACIJA

- Klasifikacija je rađena za prometne tunele većih presjeka, promjera 10-15 m, probijane i podgrađivane
- Zasnovana je na rezultatima znanstvenog istraživanja ponašanja stijenske mase u zoni oko tunelskog otvora

- Stijenska masa podijeljena je u 4 grupe (A, B, C i D) odnosno 6 klasa (I, II, III, IV, Va i Vb)
- U grupu A spadaju klase I i II odnosno neznatno do jako obrušljive stijenske mase
  - o Iskop se izvodi u punom profilu
  - o U klasu I spadaju stabilne do neznatno obrušljive stijenske mase sklone ispadanju pojedinih blokova
  - o U klasu II spadaju jako obrušljive stijene kod kojih je prisutno jače odvajanje kao rezultat uslojenosti i ispucalosti te su potrebne površinske odnosno lokalne mjere zaštite
- U grupu B spada klasa III odnosno rastresene do vrlo rastresene stijenske mase.
  - o Iskop se ne može vršiti u punom profilu
  - o Pored površinske potrebne su i sistematske mjere zaštite
- U grupu C spadaju klase IV i Va odnosno stijenske mase koje nakon iskopa izazivaju pritiske na podradni sklop
  - o U klasu IV spadaju stijenske mase koje izazivaju umjerene pritiske na podgradni sklop
  - o U klasu Va stijene koja izazivaju jaki pritisak na podgradni sklop. Potrebne su sistematske mjere zaštite, razrada podzemnog otvora i zatvaranje podgradnog prstena
- U grupu D spada klasa Vb odnosno posebni slučajevi. Potrebne su posebne mjere podgrađivanja
- Nedostaci modificirane Laufferove klasifikacije:
  - o potrebno je dosta praktičnog iskustva za primjenu
  - o nije temeljena na bodovnom sustavu, a opis stijenske mase je kvalitativan
  - o podgrada je određena samo kvalitativno

## RQD KLASIFIKACIJA

- Nije isključivo vezana na tunele
- Rock Quality Designation (RQD) index definiran je kao postotak intaktnje jezgre koja sadrži odlomke dužine 100 mm ili duže u ukupnoj dužini izbušene jezgre
- Za određivanje vrijednosti RQD ISRM određuje promjer jezgre 54.7 mm. Obzirom na to tijekom godina je predloženo više korekcijskih faktora za izračunavanje RQD za različite promjere jezgre (bušenja). Zaključeno je da se granična vrijednost od 100 mm može koristiti za sve veličine promjera jezgre ukoliko se prilikom mjerenja isključuju oštećenja jezgre nastala bušenjem i rukovanjem
- U slučaju nedostatka podataka o stijenskoj masi dobivenih bušenjem, RQD indeks se može odrediti iz utvrđenog broja pukotina (diskontinuiteta) vidljivih na površini po jedinici volumena stijenske mase
- **Nedostaci RQD klasifikacije:**
  - o bez obzira što je RQD jednostavna i relativno jeftina metoda određivanja kvalitete stijenske mase, sama nije dovoljna za adekvatan opis stijenske mase
  - o glavni nedostaci su što ne uzima u obzir orijentaciju pukotina, širinu i materijal ispune, te posebno kut trenja i hrapavost zidova pukotina
  - o problemi se javljaju i pri korištenju RQD indeksa za stijensku masu vrlo slabe kvalitete



Broj pukotina prisutan u prostornom metru stijene definira veličinu  $J_v$  kao:

$$J_v = \sum (l/S)$$

$S_l$  - razmak pukotina u metru promatranog skupa pukotina

RQD indeks je zavisin o  $J_v$  za stijensku masu bez glinovitih ispuna prema sljedećem izrazu:

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

gdje je RQD u postocima i  $J_v \geq 4.5$

## RSR KLASIFIKACIJA

- Rock Structure Rating Concept – koncept bodovanja strukture stijena
- RSR sustav predstavlja sustav bodovanja stijenske mase odnosno zbroj vrednovanja pojedinih parametara usvojenih u sustavu klasifikacije. Ukupna suma RSR može imati maksimalnu vrijednost 100
- RSR je kvantitativna klasifikacija za razliku od Terzaghijeve

- RSR usvaja više parametara stijenske mase za razliku od jednog parametra kao što je RQD indeks ograničen kvalitetom jezgre iz bušotine
- RSR ima numerički ulaz i rezultat za razliku od Laufferove i drugih klasifikacija proizašlih iz iste RSR sustav usvaja dvije glavne kategorije faktora koji utječu na ponašanje stijenske mase u tunelima: geološki parametri i parametri podgradne konstrukcije
  - o Geološki parametri su: tip stijenske mase, prosječan razmak pukotina, orijentacija pukotina (nagib i smjer), tip diskontinuiteta, glavni smjer rasjeda, smicanja i preklapanja, osobine stijenske mase, trošenje ili alteracija
  - o Parametri podgradne konstrukcije su: veličina (raspona) tunela, smjer napredovanja tunela, metoda iskopa
- RSR računa se prema izrazu  $RSR = A + B + C$ 
  - o Parametar A (opća geologija prostora) - generalna ocjena geološke strukture zasnovana na: porijeklu stijenske mase, tvrdoći stijenske mase i geološkoj strukturi
  - o Parametar B (položaj pukotina, smjer izvedbe) - efekt položaja pukotina uz poštivanje smjera napredovanja tunela zasnovana na: razmaku pukotina, orijentaciji pukotina i smjeru napredovanja tunela
  - o Parametar C (podzemna voda, stanje pukotina) - efekt utjecaja toka podzemne vode i uvjeta pukotina zasnovan na: ukupnoj kvaliteti stijenske mase na osnovi kombinacije A i B parametara, stanju pukotina i vrijednosti dotoka podzemne vode
- Nedostatak predstavlja činjenica da definicije pojedinih parametara koji se koriste u klasifikaciji nisu jasno određene, ne koriste se u običajenim standardnim opisima pukotinskih sustava, te mogu izazvati određene zabune tijekom odabira adekvatnih parametara

## RMR / GEOMEHANIČKA KALSIFIKACIJA

- Izvorno je razvijena za potrebe karakterizacije stijenske mase i projektiranje podgradnog sustava za tunele
- Klasifikacijska procedura zasniva se na određivanju sljedećih šest parametara:
  - o Jednoosna tlačna čvrstoća
  - o RQD indeks (Rock Quality Designation)
  - o Razmak diskontinuiteta
  - o Stanje diskontinuiteta
  - o Uvjeti podzemne vode
  - o Orijetacija diskontinuiteta
- Klasifikacija se temelji na bodovanju, pri čemu su različitim parametrima pridružene različite numeričke vrijednosti u ovisnosti o njihovoj važnosti za sveukupnu klasifikaciju stijenske mase
- **Predmetni bodovi se sumiraju i ukupna suma daje vrijednost RMR**

## Q KLASIFIKACIJA

- NGI – Rock Tunnelling Quality Index – Q
- Klasifikacija je napravljena primarno za određivanje karakteristika stijenske mase i odgovarajuće tunelske podgrade
- Vrijednost indeksa Q varira (u logaritamskom mjerilu) od 0.001 do 1000, a sama vrijednost indeksa Q određena je izrazom:  $Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \times \left(\frac{J_w}{SRF}\right)$
- Klasifikacija je zasnovana na numeričkoj procjeni kvalitete stijenske mase koja se opisuju sa šest parametara i to:
  - o RQD – Rock Quality Designation
  - o  $J_n$  – broj skupova (familija) pukotina
  - o  $J_r$  – indeks hrapavosti pukotina
  - o  $J_a$  – indeks alteracije (trošnosti) pukotina
  - o  $J_w$  – faktor pukotinske vode
  - o SRF – faktor redukcije naprežanja
- Kvocijent  $(RQD / J_n)$  predstavlja cjelokupnu strukturu stijenske mase i reprezentira relativnu veličinu bloka
- Kvocijent  $(J_r / J_a)$  predstavlja veličinu približne posmične čvrstoće između blokova u funkciji hrapavosti i alteracije pukotina. Ustanovljena je veza u kojoj  $\tan^{-1}(J_r / J_a)$  odgovara vrijednosti posmične čvrstoće pukotina
- Kvocijent  $(J_w / SRF)$  predstavlja aktivni pritisak kroz odnos pritiska vode u pukotinama i parametra SRF koji predstavlja:

## KRUTOST STIJSKE MASE

- opterećenje rastresene zone u području rasjednih zona ili zona stijenske mase s glinom
- naprezanja kod zdravih stijenskih masa
- naprezanja nastala uslijed gnječenja ili bubrenja plastičnih stijenskih masa
- Tlačna i vlačna čvrstoća intaktne stijene ( $\sigma_c$  i  $\sigma_t$ ) treba biti ispitana u smjeru mjerodavnom za stabilnost stijenske mase
- Barton i Grimstad, 1994. godine su na osnovi Q indeksa ustanovili:
  - vezu s RMR klasifikacijom ( $RMR = 9\ln Q + 44$ )
  - vezu s tlakom na podgradni sustav
  - vezu s deformabilnosti stijenske mase
  - vezu s brzinom posmičnih valova u stijenskoj masi

### GSI – GEOLOŠKI INDEKS ČVRSTOĆE

- Geološki indeks čvrstoće predstavlja pojednostavljeni klasifikacijski sustav određivanja čvrstoće stijenske mase
- GSI se zasniva na procjeni litologije, strukture i uvjeta površine diskontinuiteta u stijenskoj masi i određuje se vizualnim ispitivanjem stijenske mase vidljive u zasjecima, u površinskim iskopima kao što su zasjeci za ceste, lica tunela i jezgre bušotina
- Klasifikacijski postupak obavlja se procjenom dvaju osnovnih svojstava stijenske mase: blokovitošću i značajkama diskontinuiteta, čime se na terenu vrlo jednostavno dobiva indeksni pokazatelj koji je u velikoj mjeri ovisan o osnovnim geološkim značajkama stijena
- modificirana GSI klasifikacija prilagođena hrvatskom kršu (RMR klasifikacija nije ispunjavala uvjete za hrv.krš)
- U kršu Hrvatske mogu se izdvojiti dva sasvim različita i oprečna modela trošenja. Modeli su definirani značajkama intaktnog uzorka i veličinom osnovnog bloka:
  - Model A – debelo slojevite, gotovo masivne, uglavnom vapnenačke stijene velikih i vrlo velikih blokova s gotovo neporemećenim i često izotropnim intaktnim uzorkom
  - Model B – tanko slojevite do laminirane, razlomljene ili masivne vapnenačke stijene ili dolomiti s gustim rasporedom brojnih diskontinuiteta, intaktni uzorak često je anizotropan ili je oslabljen dijagenetskim procesima, brojnim prslinama i žilicama
- Uspostavljen je sljedeći odnos između GSI i RMR:
  - Za  $RMR_{76} < 23$      $GSI = 9\ln Q + 44$
  - Za  $RMR > 23$      $GSI = RMR - 5$

### RMI KLASIFIKACIJA

- Rock Mass index (RMI) predstavlja volumetrijski parametar koji ukazuje na približnu vrijednost jednoosne čvrstoće stijenske mase
- može se koristiti i za određivanje čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase
- $j_c$  - faktor stanja pukotina, dobiven kao kombinacija faktora veličine pukotina ( $j_L$ ), hrapavosti pukotina ( $j_R$ ) i alteracije (trošnosti) pukotina ( $j_A$ ) prikazan kao  $j_C = j_L * (j_R / j_A)$
- $V_b$  - volumen bloka ( $m^3$ ) za prosječnu vrijednost veličine bloka, vrijednost  $Db = (V_b)0.33$  predstavlja ekvivalentni promjer bloka ( $m$ )
- $f_a$  - parametar masivnosti stijenske mase  $f_a = (0.05Db)0.2$  i predstavlja parametar prilagodbe tlačne čvrstoće stijenske mase u ovisnosti o efektu veličine bloka za masivne stijene. Pri tom se podrazumijeva da je masivna stijena onda kad je  $Db > 2$  m za koju je  $f_a \sim 0.5$ . Ukoliko je  $JP < f_a$  (vrijedi kada je  $JP < 0.5$ ) primjenjuje se izraz za raspucalu stijensku masu

Vrijednost Rock Mass indexa (RMI) definira se:

- za raspucalu stijensku masu

$$RMI = \sigma_c * JP$$

- za masivnu stijensku masu

$$RMI = \sigma_c * f_a$$

$\sigma_c$  - jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene mjerena na uzorcima promjera 50 mm

$JP$  - parametar raspucalosti koji uključuje glavne karakteristike raspucalosti stijenske mase

Vrijednost  $JP$  se dobiva iz dijagrama ili iz izraza:

$$JP = 0.2 * (j_C)^{0.5} V_b^D, \text{ gdje je } D = 0.37 j_C^{0.2}$$

### UVOD

- Krutost reprezentira omjer naprezanja i deformacija
- Modul elastičnosti stijenske mase neophodan je parametar za svaku numeričku analizu i prognozu deformacija geotehničkih konstrukcija
- Deformabilnost stijenske mase ovisi o stupnju raspucalosti stijenske mase, stišljivosti pukotina i stišljivosti intaktnog stijenskog materijala između pukotina
- Raspucala stijenska masa ima znatno veću deformabilnost odnosno manju krutost od intaktne stijenske mase
- Tri su vrste određivanja krutosti stijenske mase:
  - Laboratorijska ispitivanja krutosti
  - Terenska ispitivanja krutosti
  - Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

### LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA

- Rezultat ispitivanja je modul elastičnosti (E) koji se može ispitivati u:
  - Jednoosnom stanju naprezanja
  - Troosnom stanju naprezanja

### TERENSKA ISPITIVANJA KRUTOSTI

- Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM) preporuča sljedeća terenska ispitivanja krutosti stijenske mase
  - Pokus opterećenja pločom
  - Ispitivanja velikim tlačnim jastucima
  - Pokus radijalnog opterećenja
  - Fleksibilni i kruti dilatometar

### ODREĐIVANJE KRUTOSTI POMOĆU KLASIFIKACIJA STIJSKE MASE

- Modul elastičnosti određuje se preko uspostavljenih korelacijskih veza sa rezultatima klasificiranja stij. mase
- Korelacijska veza između krutosti i klasifikacija može se uspostaviti :
  - koristeći rezultate terenskih ispitivanja
  - pomoću povratnih numeričkih analiza na temelju rezultata mjerenja deformacija geotehničkih konstrukcija izvedenih u stijenskoj masi
- Rock Quality Designation (RQD) index definiran je kao postotak intaktne jezgre koja sadrži odlomke dužine 100 mm ili duže u ukupnoj dužini izbušene jezgre
  - Uključili su modul elastičnosti intaktnog uzorka ( $E_r$ ) i uspostavili sljedeću linearna vezu
 
$$E_m = E_r (0.0231 RQD - 1.32)$$
  - Nedostatak leži u činjenici što su korišteni podaci za kvalitetnije stijene. Samo nekolicina podataka ima  $RQD < 60\%$ ; zbog toga izraz vrijedi za  $RQD > 57\%$
  - Da bi izbjegli uočene nedostatke Zhang i Einstein proširili su bazu podataka. Ovako formirana baza podataka pokrivala je cijelo područje  $0 \leq RQD \leq 100\%$  i pokazivala izrazito nelinearnu povezanost RQD i modula deformabilnosti Predložena je redukcija sekantnog modula elastičnosti intaktne stijene ( $E_r$ ) i predložena donja i gornja granica modula deformabilnosti ovisno o RQD
 
$$E_m = E_r 10^{0.0186RQD - 1.91}$$
  - Kayabasi, Gokceoglu i Ercanoglu uočili su da za određivanje modula deformacije stijenske mase nije dovoljno koristiti samo RQD indeks. Zaključili su da u redukciju modula elastičnosti intaktne stijene treba uključiti trošnost stijeni diskontinuiteta (WD) koja se standardno određuje u RMR klasifikaciji. Predložili su redukciju modula elastičnosti intaktne stijene ( $E_i$ )
 
$$E_m = 0.135 \left[ \frac{E_i (1 + 0.01RQD)}{WD} \right]$$
  - Gokceoglu, Sonmez i Kayabasi u redukciju modula elastičnosti intaktne stijene osim trošnosti stijeni diskontinuiteta (WD), uključili su i jednoosnu tlačnu čvrstoću intaktnog uzorka. Predložili su redukciju modula elastičnosti intaktne stijene ( $E_i$ )

$$E_m = 0.135 \left[ \frac{E_i (1 + 0.01RQD)}{\sigma_{ci} WD} \right]^{1.5528}$$

– Q klasifikacijski sustav (Barton, 1974)

- Klasifikacijska procedura sastoji se od određivanja sljedećih 6 parametara:
  - RQD – Rock Quality Designation, indeks kvalitete jezgre
  - Jn – broj skupova diskontinuiteta
  - Jr – indeks hrapavosti diskontinuiteta
  - Ja – indeks alteracije diskontinuiteta
  - Jw – faktor pukotinske vode
  - SRF – faktor redukcije naprezanja

○ Klasifikacija je zasnovana na numeričkoj procjeni kvalitete stijenske mase. Vrijednost indeksa Q varira od 0.0001 do 1000, a sama vrijednost indeksa Q određena je izrazom

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \times \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \times \left( \frac{J_w}{SRF} \right)$$

- koristeći rezultate izmjerenih deformacija i povratne numeričke analize na velikom broju izvedenih podzemnih iskopa u Norveškoj, primjenjujući sljedeći izraz  $E_m = 25 \log Q$
- Predloženi izraz vrijedi za stijenske mase kod kojih je  $Q > 1$  jer bi u protivnom modul bio negativan
- U rezultate navedenih istraživanja bile su uključene samo čvrste stijene te nisu uzeti u obzir dubina i početno stanje naprezanja

$$E_m = 10 (Q_c)^{\frac{1}{3}} \quad Q_c = Q \times \frac{\sigma_{ci}}{100} \quad \sigma_{ci} - \text{jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene u MPa}$$

– Rmi klasifikacijski sustav

- Rock Mass index (Rmi) predstavlja volumetrijski parametar koji ukazuje na približnu vrijednost jednoosne čvrstoće stijenske mase
- Rmi je zasnovan na selektivnim dobro utvrđenim geološkim parametrima stijenske mase dobivenim iz detaljiziranih terenskih opisa stijenske mase na izdancima i jezgrenog materijala iz bušotina te rezultata geofizičkih mjerenja
- Vežu između modula deformacije stijenske mase i Rmi > 1 teoretski je izveo Palmstrom povezivanjem parametara Rmi i RMR klasifikacije te koristeći izraz Bieniawskog  $E_m = 5.6 Rmi^{0.375}$
- Predložili su

Rmi	0.1 - 1	1 - 30	30 <
$E_m$	$5.6 Rmi^{0.375}$	$7 Rmi^{0.5}$	$7 Rmi^{0.4}$

– RMR (Geomehanička klasifikacija)

- Klasifikacija se temelji na bodovanju, pri čemu su različitim parametrima pridružene različite numeričke vrijednosti u ovisnosti o njihovoj važnosti za sveukupnu klasifikaciju stijenske mase
- Klasifikacijska procedura zasniva se na određivanju odnosno procjeni šest parametara:
  - jednoosna tlačna čvrstoća
  - RQD indeks (Rock Quality Designation)
  - razmak diskontinuiteta
  - stanje diskontinuiteta
  - uvjeti podzemne vode
  - orijentacija diskontinuiteta
- Prva istraživanja određivanja modula deformacije na osnovi rezultata RMR klasifikacije proveo je Bieniawski stavljajući u korelacijski odnos rezultate terenskih ispitivanja modula deformabilnosti i rezultate RMR klasifikacije
  - Obzirom da je Bieniawski smatrao da se preko rezultata RMR klasifikacije može procijeniti a ne odrediti modul deformacije pojednostavio je dobiveni rezultat radi lakšeg pamćenja  $E_m = 2RMR - 100$
- Serafim i Pereira proširili su bazu podataka koju je koristio Bieniawski sa modulima deformacije dobivenim na temelju opažanih slijeganja i povratnih numeričkih analiza. Dobili su nelinearnu vezu između rezultata RMR klasifikacije i modula deformacije u GPa  $E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$
- Istu bazu podataka koristili su Nicholson i Bieniawski uzevši u obzir dva bitna ograničenja izravne veze modula deformacije stijenske mase i rezultata RMR klasifikacije:

- volumen stijenske mase zahvaćen terenskim istražnim radovima znatno je manji od volumena stijenske mase u kojem se izvodi
- početno stanje naprezanja nije niti na koji način uključeno u određivanje vrijednosti modula deformacije stijenske mase

- Oba ograničenja pokušali su prevladati uključivanjem u vezu modula elastičnosti intaktnog uzorka dobivenog laboratorijskim ispitivanjem pokusom jednoosnog tlaka odnosno pretpostavkom da se modul deformacije stijenske mase može dobiti redukcijom modula elastičnosti intaktne stijene  $E_m = E_i \cdot RF$   $E_m$  – modul deformacije stijenske mase  $E_i$  – modul elastičnosti intaktne stijene iz pokusa jednoosnog tlaka  $RF$  – faktor redukcije komparabilan s rezultatima istražnih radova

- Faktor redukcije RF dobiven je uspostavljanjem nelinearne korelacijske veze sa rezultatima RMR klasifikacije iz postojeće baze podataka uz pretpostavku da je  $RF=1$  za  $RMR=100$ ,  $RF=0$  za  $RMR=0$  te da oblik krivulje faktora redukcije s porastom RMR slijedi oblik promjene modula deformacije dobivenog terenskim istražnim radovima

Mitri, Edrissi i Hennig analizirajući podzemne iskope u rudnicima u Kanadi predložili su također redukciju modula deformacije intaktne stijene:

$$E_m = E_i [0.5(1 - (\cos(\pi \cdot RMR/100)))]$$

dok su Read, Richards i Perrin na osnovi izmjerenih rezultata ponašanja grauvaka u Novom Zelandu predložili izraz:

$$E_m = 0.1 \left( \frac{RMR}{10} \right)^3$$

$$E_m = \frac{E_i}{100} \cdot 0.028 RMR^2 + 0.9 e^{\frac{RMR-10}{22.82}}$$

- Najveće istraživanje na području primjene RMR za određivanje modula deformabilnosti stijenske mase do sada proveli su Galera, Alvarez i Bieniawski na bazi od preko 700 rezultata terenskih mjerenja modula deformabilnosti a i uključili su i podatke koje su objavili Bieniawski te Serafim i Pereira

- a) Izraz koji su predložili Serafim i Pereira poboljšan je novim izrazom koji za 10% daje bolju procjenu modula deformabilnosti:

$$E_m = e^{\frac{RMR-10}{14}}$$

- b) Predložili su i izraz koji nešto bolje prognozira modul deformacije od gornjeg izraza:

$$E_m = 147.280 \cdot e^{\frac{RMR-10}{24}} - 0.202 RMR$$

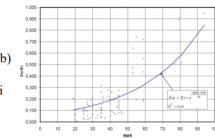
- c) te izraz koji se sastoji iz linearnog i nelinearnog dijela, a koji za 15% daje bolju procjenu od izvornog izraza Serafima i Pereira:

$$E_m = 0.0876 RMR (RMR < 50) \\ E_m = 0.0876 RMR + 1.056(RMR - 50) + 0.015(RMR - 50)^2 (RMR > 50)$$

- d) U izrazu b) i c) nije uključen modul elastičnosti intaktnog uzorka što uzrokuje ograničenja. Da bi to prevladali predložili su sljedeći izraz:

$$E_m = E_i \cdot e^{\frac{RMR-100}{16}}$$

Izraz d) nešto slabije procjenjuje modul deformabilnosti od izraza b) i c) ali zato za skoro 40% popravljiva izraz koji su dali Nicholson i Bieniawski.



– GSI

- GSI su za potrebe određivanja modula deformacije prvi put uveli Hoek i Brown. Na osnovi rezultata mjerenja i povratnih numeričkih analiza utvrdili su da izraz Serafima i Pereira dobro opisuje krutost za kvalitetnije stijenske mase, ali daje previsoke vrijednosti za slabije stijenske mase. Korigirali su njihov izraz zamjenjujući RMR sa GSI te uvodeći redukciju modula deformacije za stijene kod kojih je **jednoosna tlačna čvrstoća  $\sigma_{ci} < 100$  MPa**  $E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}$
- Razlog za uvođenje redukcije je pretpostavka da su deformacije kvalitetnijih stijenskih masa kontrolirane položajem i karakteristikama diskontinuiteta, dok su deformacije slabijih stijenskih masa uvjetovane deformacijama intaktne stijene
- Hoek, Carranza-Torres i Corkum predlažu modificirani Hoek i Brownov izraz uvažavajući poremećenost stijenske mase izazvanu miniranjem ili relaksacijom stijenske mase uslijed iskopa za  $\sigma_{ci} < 100$  MPa  $E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}$ , gdje je **D faktor poremećenosti koji ovisi o stupnju poremećenosti stijenske mase uslijed oštećenja nastalih miniranjem i relaksacijom (0 – neporemećena stijenska masa, 1 znatno poremećena stijenska masa)**
- Sonmez, Gokceoglu i Ulusay na bazi od 115 rezultata terenskih ispitivanja modula deformacije na branama i hidroelektranama u Turskoj predložili su izraz  $E_m = E_i (s^a)^{0.4}$  ( $s_a$  – konstante)

- Najveće istraživanje na području primjene GSI za određivanje modula deformabilnosti stijenske mase do sada proveli su Hoek i Diederich na bazi od oko 500 rezultata terenskih mjerenja modul deformabilnosti; dobili su izraz za  $E_m$  koji ne uključuje modul elastičnosti intaktnog uzorka

$$E_m = 100\,000 \cdot \left( \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left(\frac{75+25D-GSI}{11}\right)}} \right)$$

- U prošli izraz nije uključen modul elastičnosti intaktnog uzorka ( $E_i$ ) što ima ranije opisana ograničenja. Da bi to prevladali napravili su analizu uključivši samo one rezultate za koje su imali  $E_i$  i predložili sljedeći izraz

$$E_m = E_i \cdot \left( \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left(\frac{75+25D-GSI}{11}\right)}} \right)$$

- Pomoću izraza koji povezuju  $V_p$ , RMR i GSI, dobili su izraz:  $GSI = 11.1 V_p - 11.7$
- Kod određivanja krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske usvaja se kvadratna ovisnost rezultata GSI klasificiranja stijenske mase i sekantnog modula elastičnosti odnosno modula deformacije
- Kao rezultat dosadašnjih istraživanja, predlaže se određivanje krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske prema izrazu  $E_m = IKs \cdot GSI^2 \cdot V_p^2$  ( $E_m$  [GPa], GSI [%],  $V_p$  [km/h])
- Dani izraz je validiran na mjerenjima i povratnim numeričkim analizama na spomenutim složenim geotehničkim zahvatima.
- Formirana su 4 proračunska modela kod kojih se krutost stijenske mase određivala na sljedeće načine:
  - Model 1 – Serafim i Pereira, 1983.
  - Model 2 – Hoek, Carranza-Torres i Corkum, 2002.
  - Model 3 – Hoek i Diederich, 2006.
  - Model 4 – Jurić-Kačunić, 2009

### PRIMJENJIVOST KLASIFIKACIJA ZA ODREĐIVANJE KRUTOSTI U KRŠU HRVATSKE

- Iskustva stečena izvedbom složenih inženjerskih zahvata u karbonatnim stijenama hrvatskog krša pokazuju da je krutost krških naslaga, određena preko poznatih korelacija sa rezultatima klasificiranja stijenske mase (RMR i GSI) značajno precijenjena
- Intenzivna geotehnička mjerenja, provođena za vrijeme izvedbe, pokazala su da su izmjerene deformacije znatno veće od onih dobivenih proračunima te da su izmjerene oblici deformacija po dubini značajno različiti od proračunatih

### PARAMETRI KOJI UTJEČU NA KRUTOST KARBONATNIH STIJENA U KRŠU HRVATSKE

- Predložio je modificiranu GSI klasifikaciju prilagođenu hrvatskom kršu
- GSI prilagođen procesu trošenja karbonatnih stijena u kršu Hrvatske predstavlja prvi parametar koji služi za određivanje krutosti
- Proces trošenja karbonatnih stijena započinje u površinskom dijelu i napreduje u dubinu kroz dugi vremenski period
- Tako se stvaraju zone trošenja koje imaju različite krutosne karakteristike po dubini i čija dubina je uglavnom veća od dubine zahvaćene istražnim radovima za potrebe građenja
- Dubine zona trošenja mogu se ustanoviti uspoređivanjem brzina uzdužnih valova (mjenjenih geofizičkim istražnim radovima) s pripadajućim dubinama na kojima su izmjerene
- Profil brzina uzdužnih valova po dubini je drugi parametar koji služi za određivanje krutosti
- Trošenjem karbonatnih stijena je dobar pokazatelj stupnja poremećenosti tj oslabljena stijenske mase
- Parametar koji ukazuje na redukciju krutosti stijenske mase, definira se, prema predloženom pristupu određivanju krutosti, kao indeks krutosti stijenske mase i može poprimiti vrijednosti od 0 do 1
- Indeks krutosti stijenske mase je treći parametar koji služi za određivanje krutosti

### ODREĐIVANJE KRUTOSTI KARBONATNIH STIJENA U KRŠU HRVATSKE

- Sekantni modul elastičnosti je za karbonatne krške naslage vapnenaca i dolomita ovisan o kvadratu brzine širenja uzdužnih valova i u području velikih deformacija
- U zoni ispitivanja ne mijenjaju se drugi parametri koji utječu na krutost kao što su: rezultati klasificiranja stijenske mase, moduli elastičnosti i zona trošenja stijenske mase
- U novom pristupu određivanja krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske usvaja se kvadratna ovisnost brzine širenja uzdužnih valova u stijeni i modula deformacije
- Barton je predložio izraz koji povezuje rezultat GSI klasifikacije i brzinu širenja uzdužnih valova  $GSI=15V_p-7.5$
- Na temelju terenskih i geofizičkih ispitivanja te rezultata klasificiranja Jašarević i Kovačević su povezali module deformacije sa rezultatima klasificiranja i brzinama širenja uzdužnih valova

$$E_m = e^{(4.407+0.081RMR)}$$

$$E_m = e^{(4.950+0.900V_p)}$$

- Uspostavili su sljedeće ovisnosti:

## ČVRSTOĆA STIJENSKE MASE

### POLAZIŠTA

- Procjena čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase od iznimnog je značaja za provedbu numeričke analize
- Stijena je razlomljena, heterogena i anizotropna

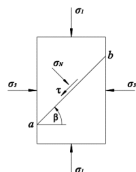
### OPĆENITO

- **Kriteriji čvrstoće trebaju zadovoljiti uvjete:**
  - o Trebao bi pokazivati dobro slaganje s eksperimentalno dobivenim čvrstoćama
  - o biti opisan pomoću jednostavnih matematičkih izraza i bezdimenzionalnim parametrima
  - o omogućiti proširenje primjene na lom anizotropnih materijala i ispucale stijenske mase
- **Opći analitički oblik:**  $\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3)$ 
  - o  $\sigma_1$  – veće glavno naprezanje pri slomu
  - o  $\sigma_2$  – srednje glavno naprezanje pri slomu
  - o  $\sigma_3$  – manje glavno naprezanje pri slomu
- Srednje glavno naprezanje ima mali ili zanemariv utjecaj u odnosu na manje glavno naprezanje  $\sigma_1 = f(\sigma_3)$
- Kriterij čvrstoće se također može opisati i kao odnos između posmičnog i normalnog naprezanja:  $\tau = f(\sigma_n)$

### KRITERIJ ČVRSTOĆE

#### - COULOMB

- o posmična čvrstoća tla ili stijene se sastoji od dvije komponente:
  - konstantne kohezije (c) i komponente trenja ( $\varphi$ )  $\tau = c + \sigma_N \cdot \tan \varphi$
  - c – kohezija
  - $\tan \varphi$  – kut unutrašnjeg trenja
  - $\sigma_N$  – efektivno normalno naprezanje na plohi sloma
- o **LINEARNI KRITERIJ ČVRSTOĆE – parametri se određuju testom izravnog smicanja ili troosnim testom**
- o ne daje zadovoljavajuće rezultate za kriterij vršne čvrstoće:
  - Podrazumijeva da glavni lom smicanjem nastaje pri vršnoj čvrstoći sto nije uvijek slučaj
  - Smjer loma uslijed smicanja se ne slaže uvijek sa onim dobivenim ispitivanjima
  - Anvelopa vršnih čvrstoća je nelinearna
- o **KORIŠTENJE COULOMBOVOG KRITERIJA** je prihvatljivo pri rezidualnim uvjetima jer tada daje dobro slaganje sa rezultatima ispitivanja čvrstoće, kao i posmičnu čvrstoću diskontinuiteta u stijeni



#### - GRIFFITH

- o Lom krugog materijala započinje kada koncentracija vlačnih naprezanja na nekom malom vrhu, tankoj pukotini ili mikroskopskom toku u materijalu, koji je inače izotropan, premaši vlačnu čvrstoću materijala
- o Parabolična Mohrova anvelopa  $\tau = 2\sqrt{|\sigma_1| \cdot (|\sigma_1| + \sigma_n)}$ 
  - $\sigma'_n$  – efektivno normalno naprezanje na plohi sloma
  - $\sigma_1$  – jednoosna vlačna čvrstoća materijala

#### - MODIFICIRANI GRIFFITH

- o Uzeli su u obzir sile trenja koje nastaju kada je stijena izložena tlačnim naprezanjima

$$\tau = 2 \cdot |\sigma_1| + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad \text{za } \sigma_n > 0 \quad \varphi - \text{kut trenja na površini pukotine}$$

#### - HOBBS

- o Empirijski kriterij koji stavlja u odnos veće i manje glavno naprezanje ili posmično i normalno naprezanje pri slomu

$$\sigma_1 = B \cdot \sigma_n^2 + \sigma_n \quad \text{i} \quad \tau = K_2 \cdot \sigma_n^2$$

gdje su B, b, K<sub>2</sub> i a empirijske konstante.

#### - HOEK

- o Predlaže dvodimenzionalni kriterij čvrstoće za intaktnu stijenu koja uključuje tri konstante
- o Stavlja u odnos veće i manje glavno naprezanje ili posmično i normalno naprezanje pri slomu

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2 \cdot C + A \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) \quad \tau_{max} = \tau_{max0} + A \cdot \sigma_n$$

gdje su:  $\tau_{max0} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  - najveće posmično naprezanje  
 $\sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$  - srednje normalno naprezanje  
 $\tau_{max0}$  - vrijednost na dijagramu  $\tau_{max} - \sigma_n$ , za  $\sigma_n = 0$   
 A, B, C, b - konstante materijala

#### - BIENIAWSKI

- o Empirijski kriterij za stijenski materijal tj analitički opis vršne anvelope

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 1 + A \cdot \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)^b$$

$$\frac{\tau_m}{\sigma_3} = 0.1 + B \cdot \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_3} \right)^c$$

#### - ORIGINALNI HOEK – BROWN

- o Ne postoji veza između empirijskih konstanti i fizikalnih karakteristika stijena
- o Funkcija većeg i manjeg glavnog naprezanja pri slomu

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_2 + s \cdot \sigma_3^2}$$

gdje su:  $\sigma_1$  - veće glavno naprezanje pri slomu  
 $\sigma_2$  - manje glavno naprezanje pri slomu  
 $\sigma_3$  - jednoosna tlačna čvrstoća intaktno stijene  
 $m, s$  - empirijski parametri čvrstoće stijene

Odnos posmičnih i normalnih naprezanja prema glavnim naprezanjima može se napisati u obliku:

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin 2\beta \quad \sigma_n = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos 2\beta$$

ne sloma i smjera većeg glavnog

#### - UNAPRIJEĐENI HOEK – BROWN

- o Uvođenje efektivnog naprezanja te načina određivanja vrijednosti parametara m i s

$$\sigma_1' = \sigma_1 + \sqrt{m \sigma_3' \sigma_2 + s \sigma_3'^2}$$

$$\text{Neporemećena stijenska masa: } m = m_0 \cdot e^{\frac{GSI-100}{28}} \quad s = e^{\frac{GSI-100}{9}}$$

$$\text{Poremećena stijenska masa: } m = m_0 \cdot e^{\frac{GSI-100}{14}} \quad s = e^{\frac{GSI-100}{4}}$$

$m_0$  - vrijednost m intaktno stijene

#### - MODIFICIRANI HOEK – BROWN

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_1'}{\sigma_c} \right)^a$$

$m_b, a$  - konstante ovisne o karakteristikama stijenske mase

$\sigma_c$  - jednoosna tlačna čvrstoća intaktno stijene

$\sigma_1'$  - veće glavno naprezanje pri slomu

$\sigma_3'$  - manje glavno naprezanje pri slomu

#### - OPĆI HOEK – BROWN

- o Konstante za izračunati

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

$$a = 0,5 + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

- $m_i$  - vrijednost intaktno stijene koja se određuje iz troosnog pokusa
- D - faktor poremećenosti stijenske mase

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_1'}{\sigma_c} + s \right)^a$$

$m_b, a$  - konstante ovisne o karakteristikama stijenske mase

$\sigma_c$  - jednoosna tlačna čvrstoća intaktno stijene

$\sigma_1'$  - veće glavno naprezanje pri slomu

$\sigma_3'$  - manje glavno naprezanje pri slomu

$s = 1, a = 0.5$  - originalni Hoek-Brown kriterij

$s = 0$  - modificirani Hoek-Brown kriterij

## OPIS I ČVRSTOĆA DISKONTINUITETA

### OPIS DISKONTINUITETA (ISRM)




#### ORIJENTACIJA DISKONTINUITETA

- određena je sljedećim kutovima: nagibom diskontinuiteta i smjerom nagiba diskontinuiteta
- **Nagib** diskontinuiteta predstavlja kut koji najveći nagib zatvara sa površinom (dvoznamenkasti broj 0-90°)
- **Smjer nagiba** je azimut kuta koji zatvara smjer najvećeg nagiba sa sjeverom pri čemu se kao referentna uzima horizontalna ravnina. Smjer nagiba mjeri se u smjeru kazaljke na satu (troznamenkasti broj 0-360°)
- Orijeantacija diskontinuiteta na geološkim kartama označava se: smjer nagiba/nagib
- Smjer nagiba i nagib definira vektor nagiba
- Dostupne su različite metode prezentiranja orijentacije diskontinuiteta:
  - **simboli ucrtani u geološke karte** - ograničen broj diskontinuiteta koje se može ucrtati
  - **perspektivne skice, rozete diskontinuiteta, stereografska projekcija**

#### RAZMAK DISKONTINUITETA

- **Razmak diskontinuiteta** određuje se kao udaljenost između susjednih ravnina diskontinuiteta mjerena okomito na susjedne ravnine
    - daje podatke o bolokovitosti odnosno razlomljenosti stijenske mase
  - **Frekvencija diskontinuiteta** je inverzna razmaku diskontinuiteta, a označava broj diskontinuiteta po metro
  - Razmak diskontinuiteta se mjeri **mjernom trakom** koja mora biti postavljena tako da površinski trag diskontinuiteta koji mjerimo bude okomit na mjernu traku. Duljina mjerenja ne smije biti manja od 3 metra i trebala bi biti deset puta veća od procijenjenog razmaka diskontinuiteta. Udaljenosti se trebaju mjeriti s točnošću od 5 % od njihove apsolutne vrijednosti.  $S = d_n \sin \alpha$
- Najmanji kut između mjerne trake i promatrane grupe diskontinuiteta mjeri se kompasom. Bilježi se kut zaokružen na 5°
- $d_n$  - izmjerena udaljenost,  $\alpha$  - nagib mjerne trake u odnosu na diskontinuitet.

#### NEPREKINUSTOST

- Površina diskontinuiteta na promatranoj ravnini; omjer duljine diskontinuiteta i duljine klizne plohe
- Grupe diskontinuiteta mogu biti:
  - **neprekinute** 
  - **poluprekinute** 
  - **prekinute** 

#### HRAPAVOST STIJENKI DISKONTINUITETA

- Nepravilnost površine diskontinuiteta u odnosu na referentnu ravninu; određuje posmičnu čvrstoću
- Činitelji hrapavosti:
  - **Valovitosti** – „veliki vrhovi“ uzrokuju dilataciju, tj. Izdizanje kod smicanja jer su preveliki da bi došlo do drobljenja.
  - **Neujednačenosti** - hrapavost manjih razmjera, tj. „neravnine“ koje se drobe kod smicanja
- Procjena hrapavosti diskontinuiteta može se podijeliti na dva opća pristupa koja uključuju **subjektivni opis diskontinuiteta te kvalitativna mjerenja**
- Koficijent hrapavosti diskontinuiteta  $J_c$  je broj koji se može dobiti iz usporedbe stanja površine diskontinuiteta sa standardiziranim profilima (vizualna procjena)
- Hrapavost se određuje opisnim metodama koje se temelje na centimetarskom ili metarskom mjerilu

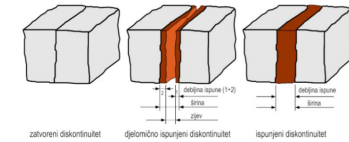
#### ČVRSTOĆA ZIDOVA DISKONTINUITETA

- Manja od čvrstoće intaktno stijene (izloženost atmosferilijama)

- Uzrok smanjenja čvrstoće zidova u odnosu na intaktnu stijenu je izloženost zidova atmosferilijama tj. kemijskom i mehaničkom trošenju koje je izraženije na površini nego na unutrašnjosti stijenske mase
- Debljina sloja smanjenja čvrstoće varira od mikroskopskih do centimetarskih veličina
- Tlačna čvrstoća zidova diskontinuiteta ( $J_{cz}$ ) može se ispitivati pomoću jednostavnih indeksnih testova:
  - **Geološkim čekićem**
  - **Schmidtovim čekićem**

#### ŠIRINA DISKONTINUITETA

- Okomita udaljenost između zidova otvorenog diskontinuiteta
- **Zijev** diskontinuiteta je onaj dio širine diskontinuiteta koji ne zauzima ispunja



#### ISPUNA DISKONTINUITETA

- Skupina zatvorenih diskontinuitet govori o širini zatvorenih diskontinuiteta ili debljini ispune
- Materijal koji ispunjava prostor između stijeni diskontinuiteta (npr. Kalcit, klorit, glina)
- Obično ispunjeni materijalom loše kvalitete, koherentnim i nekoherentnim tlima koja su rezultati trošenja okolnih stijena

#### VODA U DISKONTINUITETA

- Materijal koji ispunjava prostor između stijeni diskontinuiteta
- Obično ispunjeni materijalom loše kvalitete, koherentnim i nekoherentnim tlima koja su rezultati trošenja okolnih stijena
- Proučava se kod stijena kod kojih je primarna vodopropusnost stijene manja od procjeđivanja kroz diskontinuitete
- Procjeđivanje kroz diskontinuitete ovisi jesu li diskontinuiteti otvoreni ili zatvoreni, jesu li ispunjeni i kojim materijalom, ovisi o pritiscima oko pukotine, otpornosti materijala ispunje na unutrašnju eroziju i o pritisku vode

#### BRJ GRUPE DISKONTINUITETA

- Utječe na mehaničko ponašanje budući da određuje do koje mjere se stijenska masa može deformirati bez loma u samoj stijeni
- Individualne grupe diskontinuiteta obično se određuju mjerenjem orijentacije pojedinačnih diskontinuiteta do 150 diskontinuiteta
- Vizualno prepoznavanje broj grupa diskontinuiteta treba biti popraćeno nekim sustavom numeriranja radi identifikacije

#### VELIČINA BLOKOVA

- Veličina bloka može se opisati pomoću **indeksa veličine bloka** (prosječne dimenzije tipičnih blokova), **volumena bloka** ili pomoću **volumetrijskog broja pukotina** (ukupnog broja diskontinuiteta koji presijecaju jedinični volumen stijenske mase)
- **Indeks veličine bloka** može se procijeniti vizualnim odabirom nekoliko tipičnih veličina blokova te uzimanjem prosječnih dimenzija tih blokova (točnost mjerenja od 10%)
- U slučaju sedimentnih stijena, dvije međusobno okomite grupe diskontinuiteta i podloga često čine oblik kocke ili prizme. U tom slučaju,  $I_b$  može se izraziti na sljedeći način:  $I_b = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}$  gdje su:  $S_1, S_2$  i  $S_3$  -razmaci međusobno paralelnih diskontinuiteta.
- Veličina blokova uvjetovana je razmakom diskontinuiteta, brojem grupa diskontinuiteta i njihovom neprekinutošću

▪ **Volumen bloka** može se odrediti prema sljedećem izrazu:

$$V_b = \frac{S_1 \times S_2 \times S_3}{\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3}$$

gdje su:  
 $S_1, S_2$  i  $S_3$  -prosječne vrijednosti razmaka međusobno paralelnih diskontinuiteta za tri grupe diskontinuiteta  
 $\sin \gamma_1, \sin \gamma_2, \sin \gamma_3$  -kutevi između grupa diskontinuiteta

▪ **Volumetrijski broj pukotina** označava broj pukotina unutar jediničnog volumena stijenske mase, a može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$J_c = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots$$

gdje su  
 $S_1, S_2$  i  $S_3$  -razmaci međusobno paralelnih diskontinuiteta.

- Broj grupa i orijentacija diskontinuiteta određuju oblik bloka, koji može formirati kocku, romboedar, tetraedar

- Kod podzemnih iskopa, veličina bloka određuje hoće li se stijenska masa ponašati kao kontinuum ili diskontinuirani materijal na koji utječu svojstva i geometrija diskontinuiteta
- Stijenska masa može biti opisana na sljedeći način kako bi se dobio dojam o veličini i obliku blokova:
  - **masivna** – nekolicina pukotina na vrlo širokom razmaku
  - **blokovi** – blokovi podjednake veličine
  - **tabličasta** – jedna dimenzija puno manja od ostalih dviju
  - **stupičasta** – jedna dimenzija puno veća od ostalih dviju
  - **nepravilna** – velike razlike u veličinama i obliku blokova
  - **razlomljena** – velik broj pukotina

### ČVRSTOĆA DISKONTINUITETA

- Ukupna posmična čvrstoća stijenske mase funkcija je čvrstoće diskontinuiteta i čvrstoće mostova u intaktnoj stijenskoj masi koji razdvajaju diskontinuitete

- **Posmična čvrstoća potpuno ravnog diskontinuiteta** linearna je funkcija normalnih napreznja na plohi diskontinuiteta i odgovara Mohr - Coulombovom kriteriju čvrstoće:

$$\tau = c + \sigma_N \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

gdje su:  $\tau$  – vršna posmična čvrstoća diskontinuiteta,  $\sigma_N$  – efektivno normalno napreznje,  $c$  – kohezija ispuke diskontinuiteta,  $\varphi$  – kut unutrašnjeg trenja diskontinuiteta.

- Kad se uslijed smicanja po diskontinuitetu dosegne vršna čvrstoća, posmična napreznja padaju na vrijednost rezidualne posmične čvrstoće, uz pad vrijednosti

$$\tau = \sigma_N \cdot \operatorname{tg} \varphi_r$$

kohezije na vrijednost '0' prema izrazu:  $\varphi_r$  – rezidualni kut unutrašnjeg trenja

- Bazični kut trenja približno je jednak rezidualnom kutu trenja ali se isti određuje pokusom smicanja, na prerezanoj plohi intaktne stijene.

$$\tau = \sigma_N \cdot \operatorname{tg} \varphi_b$$

gdje je:  $\varphi_b$  – bazični kut unutrašnjeg trenja.

Kriterij čvrstoće za bazični kut:

- **Faktori koji utječu na posmičnu čvrstoću diskontinuiteta su:**

1. adhezijske veze
2. zatvaranje i uklještenje uslijed manjih neravnosti pukotina
3. premoštavanje (prejahanje) većih neravnina pukotina zonama kontakta pukotina
4. postojanje stijenskih mostova

- Pattonov pokus na uzorcima nazubljene površine

$$\tau = \sigma_N \cdot \operatorname{tg}(\varphi_b + i)$$

$\varphi_b$  – bazični kut unutrašnjeg trenja,  $i$  – nagib nazubljene površine,

- dokazao utjecaj površinske hrapavosti diskontinuiteta na povećanje posmične čvrstoće

- **Bartonov pokus (uzima u obzir hrapavost površine diskontinuiteta i tlačnu čvrstoću zidova diskontinuiteta)**

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[ JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right]$$

gdje su:  $JRC$  – koeficijent hrapavosti diskontinuiteta (*Joint Roughness Coefficient*),  $JCS$  – tlačna čvrstoća zidova diskontinuiteta (*Joint Wall Compressive Strength*).

**Za diskontinuitete koji ne sadržavaju pukotinsku ispunu, stvarna vrijednost kohezije je jednaka nuli**

## STABILNOST STIJENSKIH POKOSA

### UVOD

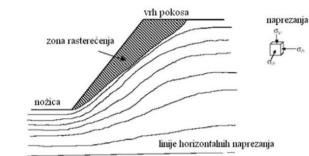
- Koncept stabilnosti padine nije u potpunosti određen jer niti za jednu padinu u stijenskoj masi ili tlu ne može u potpunosti garantirati stabilnost tijekom njezinog korištenja u dužem vremenskom periodu
- Razlika kod stabilnosti pokosa u geotehnici i rudarstvu je u činjenici da se u geotehnici zahtijeva veći stupanj pouzdanosti i da se potencijalni slomovi stijenske mase rijetko mogu tolerirati (kod otvorenih iskopa pomoci stijenske mase dozvoljeni su u slučaju da ne ometaju daljnji iskop rude) te je zasjek u rudarstvu ekonomičnije izveden nego u građevinarstvu
- **Dva tipa inženjerskih problema vezanih uz stabilnost pokosa**
  - Projektiranje umjetnih pokosa zasijecanjem 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
  - 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
  - Čvrstoća diskontinuiteta i intaktne stijene
  - Napreznje u stijenskoj masi i uvjeti podzemne vode
  - Geometrija pokosa

### Geološku strukturu ( pukotine, rasjed, zona smicanja, razlomljena zona)

- To je tip stijenske mase koji izgrađuje padinu kao i sustavi diskontinuiteta koji ispresijecaju stijensku masu
- Razmatraju se diskontinuiteti reda veličine mikropukotina kraćih od 1 cm do rasjeda dužine veće od 1000 km
- Nepravilnosti u geološkoj strukturi uzrok su pojave slomova u stijenskoj masi radi čega je bitno mapirati takve diskontinuitete jer utječu na stabilnost stijenskog pokosa
- Podatci o geološkoj strukturi dobiveni inženjersko-geološkim mapiranjem su pouzdaniji nego dobiveni istražnim bušenjima jer vidljivo lice pokosa pokazuje diskontinuitete u većem razmjeru i u neporemećenim in-situ uvjetima naspram malih stijenskih uzoraka
- Za dodatnu identifikaciju sustava diskontinuiteta mogu dobro poslužiti otvoreni pokosi u blizini jer se može ekstrapolirati na pokos koji se planira izvesti

### Napreznja u stijenskoj masi

- Napreznja koja djeluju na stijensku strukturu u odnosu na čvrstoću stijenske strukture određuju stabilnost predmetne stijenske strukture
- Početno stanje napreznja u stijenskoj masi padine prije iskopa većinom je tlačne prirode i težine nadsloja te napreznja uvjetovana vanjskim tektonskim silama i mogućim rezidualnim napreznjima
- Veličina početnog stanja vertikalnih napreznja u stijenskoj masi uobičajeno se zamjenjuje težinom nadsloja stijenskog materijala, a početno stanje horizontalnih napreznja teže je odrediti (pogotovo ako postoji utjecaj tektonskih sila)
- Zasijecanjem stijenske padine mijenja se početno stanje napreznja u stijenskoj masi pri čemu se napreznja preraspodjeljuju na stijensku masu oko izvršenog iskopa
- Horizontalna napreznja povećavaju se u dnu iskopa uz koncentracije napreznja u nožici, a rasterećuju se pokosi zasjeka
- Vertikalna napreznja nakon iskopa u pravilu se usklađuju s opterećenjem uzrokovanim težinom nadsloja
- Koncentracija tlačnih napreznja u nožici zasjeka padine izaziva slom stijenske mase koje je zona porasta posmičnih napreznja



- U području pokosa zasjeka nastupa rasterećenje (glavna naprezanja manja od početnih) što rezultira otvaranjem pukotina u stijenskoj masi i posmičnim slomom duž postojećih diskontinuiteta u stijenskoj masi uslijed smanjenja normalnih naprezanja

#### Uvjeti podzemne vode

- 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
- Bitno je razlikovati dvije vrste vodopropusnosti
  - o Primarna vodopropusnost
    - Tečenje vode kroz intaktnu stijenu i koeficijent primarne vodopropusnosti  $K_{\text{PRIMARNO}}$  kod većine stijena je male vrijednosti
    - Intaktni granit  $K_{\text{PRIMARNO}} = 10^{-10}$  cm/sec ili pješčenjaci  $K_{\text{PRIMARNO}} = 10^{-4}$  cm/sec
  - o Sekundarna vodopropusnost
    - Tečenje vode kroz stijensku masu čime uključuje tečenje i kroz intaktni dio i kroz prisutne diskontinuitete
    - Najveći utjecaj na veličinu koeficijenta sekundarne vodopropusnosti  $K_{\text{SEKUNDARNO}}$  je neprekinutost, širina i ispunjena diskontinuiteta

#### Čvrstoću diskontinuiteta i intaktnu stijenu

- Dobro se opisuje Bartonovim kriterijem čvrstoće koji uzima u obzir hrapavost zidova diskontinuiteta i njihovu čvrstoću
- Intaktna stijena u stijenskoj masi djeluje kao veza između diskontinuiteta, a do njenog loma dolazi najčešće u obliku vlačnog sloma

#### Geometriju pokosa - uključuje nagib pokosa (visina kroz duljina pokosa) i zakrivljenost pokosa

#### UZROCI NASTANKA POJEDINIH MEHANIZAMA SLOMA STIJENSKOG POKOSA

- Geološki uvjeti: tektonski procesi; gravitacijske, seizmičke i hidrodinamičke sile
- Antropološki uvjeti: iskopi i nasipavanje; opterećenje građevina; promjene režima podzemnih voda; promjene namjene zemljišta; vibracije uslijed miniranja
- Klimatski uvjeti
- Vrijeme

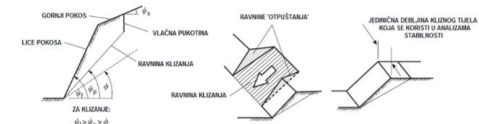
#### MEHANIZMI SLOMA STIJENSKOG POKOSA

- 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 kada se prekorači posmična čvrstoća materijala na kliznoj plohi (čvrstoća tla, stijenske mase ili diskontinuiteta)
- Mehanizam sloma predstavlja opis fizičkog procesa u stijenskoj masi pri kojem je došlo do porasta opterećenja i pojave sloma te razvoja sloma na padini
- Vrste mehanizama sloma : planarni, klinasti, rotacijski, složeni, blokovsko klizanje i slom prevrtanja, lomljenje i izbacivanje sloja

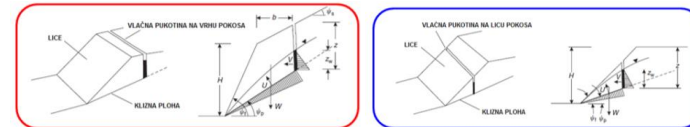
#### Planarni slom

- pojavljuje se duž određenog geološkog diskontinuiteta, a opći uvjeti za nastanak planarnog sloma uključuju:

- o ravnina diskontinuiteta po kojem se dogodio slom mora se pružati paralelno ili približno paralelno (cca  $\pm 20^\circ$ ) s licem pokosa
- o nagib ravnine po kojoj se dogodio slom mora biti manji od lica pokosa  $\psi_f > \psi_p$
- o nagib ravnine po kojoj se dogodio slom mora biti veći od kuta unutarnjeg trenja stijenske mase  $\theta < \psi_p$
- o ravnine otpuštanja koje pružaju neznatnu otpornost klizanju moraju biti vidljive u cilju određivanja bočnih granica kliznog tijela

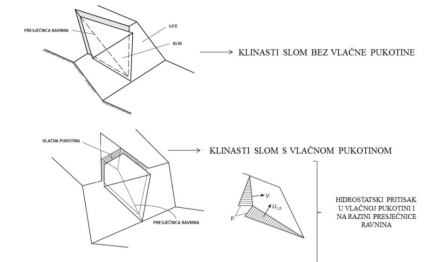


- Važnu ulogu imaju vlačne pukotine u stijeni koje se javljaju iz razloga neznatne vlačne čvrstoće stijene na tom dijelu
- Vlačne pukotine mogu se pojaviti na vrhu pokosa (crvene) ili na licu pokosa (plavo); nakon što se ispunje vodom stvara se novi pritisak na potencijalno klizno tijelo



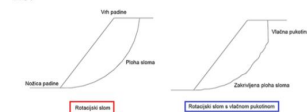
#### Klinasti slom

- Pojavljuje se duž dva diskontinuiteta koji se nalaze pod određenim kutom u odnosu na lice pokosa te formirano klizno dijelo klizi prema iskopu po presječni ravnina tih diskontinuiteta
- Događa se pri puno većem opsegu geoloških i geometrijskih uvjeta nego planarni slom
- Može se pojaviti bez ili sa prisustvom vlačne pukotine
- 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  $\theta < \psi_i$
- Prosječni kut trenja označava srednju vrijednost kuta trenja dobivenu iz kutova trenja stijenske mase na mjestu pojedine klizne plohe



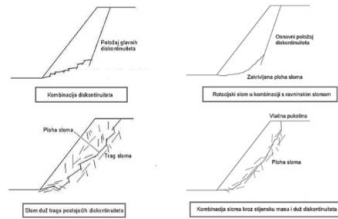
#### Rotacijski slom

- Odgovara kružnom slomu prema kojem se slom kroz stijensku masu odvija po kružnoj plohi sloma
- Kružna ploha sloma – sve klizne plohe sloma 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
- 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 rotacijska nestabilnost stijenske mase uslijed formiranja vlačne pukotine



- Prikazuje se 2D iako je zapravo 3D

### Složeni slomovi

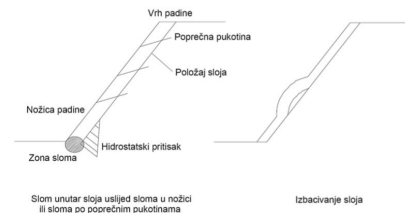


### Blokovsko klizanje i slom prevrtanjem (toppling)

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

### Lomljenje i izbacivanje sloja

- Slom tanko uslojenih stijenskih masa koji uključuju 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
- Značajan utjecaj može imati prirast hidrostatskog pritiska uzrokovan porastom razine podzemne vode u padini



### ANALIZE STABILNOSTI STIJENSKIH POKOSA

- Projektiranje pokosa podrazumijeva odabir stabilne geometrije i odgovarajućih mjera podgrađivanja
- Na temelju terenskih i laboratorijskih istražnih radova i klasifikacije dobivaju se parametri čvrstoće i deformabilnost na temelju kojih se izrađuju geotehnički modeli za provđenje analize stabilnosti
- Analize stabilnosti provode se prema jednoj od odgovarajućih metoda uz prethodno utvrđene moguće mehanizme sloma
- **Rezultat analize stabilnosti je faktor sigurnosti; ako se dobije nezadovoljavajući faktor sigurnosti tada se odabire podgradni sustav koji daje traženi faktor sigurnosti**
- Analize stabilnost utvrđuju moguće pojave sloma u prirodnom ili umjetnom pokosu te utvrđuje parametre čvrstoće materijala u pokosima u kojima je nastupio slom
- Većina metoda analiza stabilnosti radi na konceptu podjele pokosa u odvojene projektne geotehničke cjeline
- Projektne geotehničke cjeline predstavljaju dio pokosa u kojem su parametri koji mogu utjecati na stabilnost pokosa konstatni
- **Podjela metoda analiza stabilnosti pokosa:**
  - o Metode grafičke analize

- 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 (dif.jednadžbe ravnoteže, jednadžbe kompatibilnosti pomaka, konstituirne jednadžbe ponašanja materijala, zadovoljenje rubnih uvjeta)
- Zahtjeva pojednostavljenje problema
- o Metode analize granične ravnoteže
  - Analiziranje grafičkih sila otpora potrebnih za održavanje ravnoteže sa silama koje uzrokuju pojavu klizne plohe
  - Nisu u potpunosti zadovoljene ni jedne osnovne jednadžbe mehanike kontinuuma koje opisuju ravnotežu, deformacije i konstitutivno ponašanje materijala na pokosu
  - Deformacije se pri tom uopće ne uzimaju u razmatranje, a uvjeti ravnoteže su zadovoljeni jedino za sile koje djeluju u pokosu
  - Usvaja se postojanje plohe sloma, a čvrstoća materijala na plohi sloma opisuje se usvojenim kriterijem čvrstoće
  - Faktor sigurnosti određen je kao odnos sila mogućeg otpora i aktivnih sila koje djeluju na padinu
  - Faktor sigurnosti može se izraziti kao odnos
    - Sila mogućeg otpora i aktivnih sila
    - Naprezanja na plohi sloma i čvrstoće materijala
    - Parametra čvrstoće u kosini i parametara čvrstoće potrebnih za održavanje stabilnosti kosine
    - Momenata otpora i momenata aktivnih sila na plohi sloma
  - Ako je faktor sigurnosti jednak ili manji od 1, tada je moguća pojava sloma
  - Ako je više modela ili ploha sloma, a faktor sigurnosti za sve je manji od 1, tada su svi slomovi mogući kao 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 rezultantnoj sili
  - Granična čvrstoća na plohi sloma u tom slučaju može biti veća od rezultatne 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
- o Numeričke metode
  - 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 jednadžbe ravnoteže, konstituirne jednadžbe materijala i odgovarajuće jednadžbe pomaka
  - Kao rezultat analiza u numeričkim modelima dobivaju se vrijednosti stanja naprezanja i deformacije u elementima modela izloženog vanjskim opterećenjima i ograničenog rubnim uvjetima
  - Mogu se koristiti različiti konstitutivni odnosi ponašanja materijala i neograničeni broj različitih vrsta materijala čime se bolje opisuju složeni uvjeti u geometriji pokosa u odnosu na metode granične ravnoteže
  - Numeričke metode kontinuuma: metoda konačnih elemenata, metoda rubnih elemenata, metoda konačnih razlika, metoda diskretnih elemenata
  - Nije moguće eksplicitno odrediti faktor sigurnosti pojedinog pokosa, ali mogu se koristiti kao prvi korak u analizi stabilnosti pokosa u kojem se utvrđuje stanje naorezanja duž plohe sloma
- o Probabilističke metode
  - Faktori koji utječu na stabilnost pokosa podložni su određenim prirodnim varijacijama koje se u idealnim uvjetima mogu uključiti u analize

- Za svaki faktor određuje se funkcija distribucije vjerojatnost s kojim se ulazi u usvojeni tip analize
- Funkcijom distribucije mogu se prikazati parametri čvrstoće, razine podzemne vode, nagib diskontinuiteta i zapreminske težine stijenske mase
- Provodi se odabirom vrijednosti za svaku odabranu funkciju distribucije metodom slučajnih odabira na osnovi čega se određuje faktor sigurnosti za vrlo veliki broj provedenih analiza
- Empirijski pristup
  - Zasniva se na iskustvima stečenim promatranjem ponašanja pokosa tijekom izvedbe
  - Koristi dostupne podatke izvedenih pokosa prikazane bazom podataka pri čemu se analiziraju svi dostupni podatci izvedenih pokosa u različitim uvjetima prikazani u odnosu visine i nagiba izvedenog pokosa
- Fizički modeli
  - Služe za simulaciju uvjeta ponašanja pokosa u kontroliranom okruženju pri čemu se uvjeti koji utječe na stabilnost pokosa mogu lako varirati
  - Mogućnost ispitivanja i utvrđivanja stanja pokosa pri kojem se javlja slom u kosini, a može biti odgovarajući pojavi sloma na terenu
  - Omogućavaju prepoznavanje mehanizma sloma u pokosu, a služe i za potvrdu ponašanja materijala utvrđenu odgovarajućim numeričkim modelima
  - Tri osnovna tipa modelskih ispitivanja
    - Umanjeni model kosine
    - Modeli ponašanja u konvekcionalnoj laboratorijskoj opremi
    - Modeli ponašanja ispitivani centrifugom

- Normalna i posmična sila otpora ima veći utjecaj na stabilnost pokosa nego posmična čvrstoća čelika duž plohe sloma
- Prednapeta sidra unose vlačnu silu čime se dodatno povećava sila otpora na plohu sloma
- Štapna i prednapeta sidra moraju završavati u stijenskoj masi van plohe sloma
- Mlazni beton je element armiranja koji služi za sprječavanje rahljenja stijene i ispadanje pojedinih manjih blokova
- Metode podupiranja stijenske mase – povećanje vanjske sile otpora
  - Sustav za podupiranje se ugrađuje na ili ispred lica pokosa s ciljem u ograničavanju pomaka konture iskopa na definiranu vrijednost
  - Čepovi, B i AB potporni ili gabionski zidovi koriste se kao sustav za podupiranje stijenskih pokosa
  - Čepovi – čelične šipke ili kontinuirani betonski blokovi koji se ugrađuju u nožicu potencijalno nestabilnih pokosa te pružaju pasivni otpor klizanju
  - Potporni zidovi – konstrukcije koje se izvode na dnu stijenskog pokosa ili ispod visećeg dijela stijene i pružaju otpornost klizanju; moraju imati dovoljnu masu i čvrstoću da pruže otpor težine stijene koja se nalazi iza zida; također moraju spriječiti prevrtanje zida tako da se dodatno sidri u stijensku masu
  - Gabionski zidovi – niz žičanih košara ispunjenih lomljenom kamenom ispunom; veće deformabilnosti i manje cijene nego AB potporni zidovi; omogućavaju slobodnu drenažu stijenskog pokosa
  - Prednost AB i gab. zidova: nisu potrebni radovi na vrhu pokosa (dodatna nestabilnosti)

#### METODE STABILIZIRANJA STIJENSKIH POKOSA

Metode koje eliminiraju ili reduciraju aktivne sile

- Najčešća korištena metoda je snižavanje podzemne vode u pokosu čime dolazi do smanjenja pornih pritisaka i povećanje stabilnosti stijenskog pokosa
- Snižavanje podzemne vode postiže se instaliranjem drenažnog sustava koji se općenito smatra jednom od jeftinijih metoda stabilizacije stijenskih pokosa
- Dva problema pojavljuju se pri instaliranju drenaže
  - Dreniranje pokosa nema velikog utjecaja na stabilnost – pritisci podzemne vode nisu glavni uzrok nestabilnosti pokosa
  - Efektivnost sustava drenaže – treba osigurati efektivnost tijekom projektne perioda
- Rješavanje tih problema se radi pomoću instaliranja sustava piezometara za mjerenje pornih pritisaka prije, za vrijeme, nakon izvedbe pokosa tijekom projektne perioda
- Potencijalni problem: drenažni sustavi se postavljaju nepotrebno ili ne presijecaju pukotine ili začepljenje
- Vrste drenažnih sustava: horizontalni drenovi, vertikalni bunari, podzemne drenažne galerije, kolektorski kanali za prikupljanje površinski vodu, kombinacije navedenog
- Druga najčešća metoda je iskop čime se smanjuje ukupna težina potencijalnog kliznog tijela
- Iskop se vrši s krune pokosa jer zasijecanje nožice može dovesti do potencijalnih nestabilnosti pokosa
- Potrebna količina da se ukloni se određuje numeričkim povratnim analizama
- Može se urediti pokos pod manjim kutem, nagib pokosa koji zadovoljava faktore sigurnosti se također dobiva iz povratnih analiza

Metode koje povećavaju sile otpora (dvije vrste)

- Metode armiranja stijenske mase – povećanje unutrašnje sile otpora
  - Ako postoji opasnost od formiranja plohe sloma → ugradnja štapnih ili prednapetih sidara
  - Ugradnjom siadara povećava se normalna i posmična sila otpora na plohu sloma, a relativna veličina tih sila ovisi o orijentaciji sidra u odnosu na plohu sloma

## STABILNOST ODRONA

### ODRONI

- Predstavljaju veliku opasnost u područjima koja se odlikuju izrazitom raznovršću litostratigrafskog sastava tla, visokim stupnjem tektonske i seizmičke aktivnosti, složenim geološkim karakteristikama, različitim reljefnim obilježjima, nepovoljnim klimatskim uvjetima, razvijenom vodnom mrežom i značajnim antropogenim utjecajem na oblikovanje reljefa
- Sve odrone karakterizira:
  - Dolazi do odvajanja jednog ili grupe stijenskih blokova od stijenskog pokosa
  - Svaki stijenski blok kreće se neovisno o drugom
  - Stijenski blok se privremeno odvaja od pokosa te ubrzo pada
  - Stijenski blokovi postižu veliku kinetičku energiju pri padu
- Razlika između odrona i klizanja je to što se pri klizanju stvara klizna ploha na stijenskom pokosu i to utječe na cijelu stijensku masu, a odron je zapravo osipavanje sitnih fragmenata stijenske mase
- U krškom području često se klizanje i odron javlja zajedno
- Odrone se karakteriziraju:
  - Volumenom bloka
  - Posljedicama
  - Vremenskim uvjetima
  - Mjerama zaštite

### UZROCI POJAVE ODRONA

- Do odrona dolazi zbog različitih utjecaja koji smanjuju čvrstoću stijenske mase
- Ako dođe do promjena uvjeta u kojima se nalazi stijenska masa, može doći do pojave nastabilnosti tj. odrona
- **Odrone uvjetuju:**
  - **Klimatski čimbenici**
    - To su: povećanje pornog tlaka tijekom infiltracije oborina, erozija materijala tijekom jakih kiša, ciklusi smrzavanja-odmrzavanja
    - Nagle i brze klimatske promjene povećale su učestalost odrona stijenske mase
    - Voda je jedan od ključnih faktora koji kontroliraju stabilnost odrona
    - Ljeto: skupljanje, raspucavanje, gubitak vegetacije
    - Jesen/proljeće: bujanje, drukčiji režim infiltracije, povišeni porni pritisci, erozija, poplave
  - **Biološki čimbenici**
    - Kemijska razgradnja (dekompozicija) – otapanje određenih minerala (krš)
    - Mehaničko raspadanje (dezintegracija) – širenje pukotina uslijed rasta korijenja
  - **Antropogeni čimbenici**
    - Građevinski radovi (zasijecanje, nasipavanje) pri čemu se mijenja stanje naprezanja u stijenskoj masi pa novonastalo stanje naprezanja postaje prevladavajući čimbenik u povećanju nestabilnosti
    - Za vrijeme miniranja na stijensku masu djeluje visoki intenzitet kratkotrajne sile te dolazi do usitnjavanja stijene i proširenja pukotina što povećava rizik od lokalne i erozijske nestabilnosti
    - Pod takvim utjecajem mogu se pokrenuti rizični blokovi i klinovi
    - Uklanjanjem vegetacije također može utjecati na lokalnu i erozijsku nestabilnost

### MEHANIKA ODRONA

- Najopasniji oblici sloma stijenske mase se događaju kada se blok iznenada oslobodi iz naizgled čvrste površine s malim deformacijama u okolnoj stijeni
- To se događa kada se sile, koje djeluju okomito na ravninu diskontinuiteta, promijene zbog pornog pritiska udiskontinuitetu ili smanjenja posmične čvrstoće tih ravnina
- Oslobađanje ključnih blokova ponekad može ubrzati odrone značajnih razmjera ili slomove pokosa velikih razmjera

- Dimenzije odronjenog bloka ovise o prostornom rasporedu diskontinuiteta, a mehanizam gibanja ovisi o orijentaciji diskontinuiteta
- Mehanizmi gibanja blokova po pokosu mogu biti: kosi hitac, odskakivanje, klizanje, kotrljanje
- Parametri koji utječu na gibanje odrona
  - Geometrija pokosa
    - Kontrolira putanju odronjenog bloka
    - Velika horizontalna komponenta brzine daje odronu odskok daleko od nožice pokosa
    - Čiste površine tvrde stijene ne usporavaju brzinu kretanja odrona
    - Površine prekrivne trošnim materijalom ili šljunkom apsorbiraju znatnu količinu energije udara odrona što nekad može upotpunosti zaustaviti odron
  - Karakteristike stijenskog bloka tj. odrona koji se giba niz pokos
  - Karakteristike materijala od kojeg je izgrađen pokos (tri parametra ga definiraju)
    - **Koeficijent restitucije**
      - Sposobnost materijala da apsorbira energiju odronjenog bloka pri udaru o podlogu koju čini ta vrsta materijala
      - Pri udaru o podlogu, blok gubi dio energije čime mu se smanjuje brzina i može doći do usporavanja ili zaustavljanja
      - Podloge koje su podložne trošenju bolje su u apsorbiranju energije odronjenog bloka
    - Koeficijent trenja
      - Otpor pokosa klizanju bloka po tom pokosu, a definira se kao tangens kuta pod kojim dolazi do klizanja bloka na vrhu pokosa
    - Rolling friction koeficijent
      - Otpor pokosa kotrljanju bloka, a definira se kao tangens kuta pod kojim dolazi do kotrljanja bloka na vrhu pokosa

### STRATEGIJA ZAŠTITE OD ODRONA U HRVATSKOJ

- Prikupljaju se podatci o dosadašnjim odronima i klimi te klimatskim promjenama
- Prilagođavaju se numerički modeli
- Mapiraju se rizična mjesta na postojećoj infrastrukturi
- Primjena mjera zaštite i rad na strategiji zaštite od odrona

### MJERE ZAŠTITE OD ODRONA

- Uklanjanje materijala
  - uklanjanje rastresitog stijenskog materijala s pokosa pomoću ručnih alata i/ili mehaničke opreme
  - obično u kombinaciji s drugim mjerama
- Postavljanje mreže na pokos
  - Vrsta zaštite od odrona koja se koristi za trajne pokose
  - Svrha je uhvatiti odorne između površine stijene i mreže te tako smanjiti horizontalnu komponentu brzine koja uzrokuje odbijanje bloka na kolnik
  - Blokovi se akumuliraju u podnožju pokosa i treba ih ukloniti
- Jarak za hvatanje odrona
  - Pasivna mjera zaštite koja se nalazi na nožici pokosa ako postoji dovoljno mjesta za njegov smještaj
  - Dno ovog jarka treba biti prekriveno slojem šljunka kako bi apsorbirao energiju odronjenog stijenskog bloka
  - Prostor između jarka i prometnice treba se zaštititi kako blok ne bi odbijanjem dosegao kolnik
- Iskop / berme
  - Uklanjanje materijala s pokosa kako bi se stvorilo područje gdje se odron može zaustaviti
- Mlazni beton
  - Nanosi se pod jakim pritiskom na pokos
  - Prvenstveno se koristi za zaustavljanja utjecaja erozije, ali pomaže pri zadržavanju stijenskih blokova na pokosu

- Drenaža
  - o Smanjenje razine vode u pokosu kroz ugradnju horizontalnih drenova
- Sidrenje i uvezivanje sajlama
  - o Povećanje stabilnosti pokosa sidrenjem i uvezivanjem čeličnom užadi (sajle)
  - o Zadržavanje blokova na pokosu
- **Barijere**
  - o Pasivni sustav zaštite od odrona
  - o U slučajevima kada se očekuje odroni nestabilnih blokova stijenske mase
  - o Definirane su energetske razredom, visinom i elongacijom
  - o Apsorbiraju određenu energiju udara stijenskog bloka
  - o Energija udara definirana je brzinom pada bloka i njegovom masom
  - o Dimenzioniraju kinematičkim simulacijama i proračunima prema putanjama potencijalno nestabilnih blokova stijenske mase
- Hibridne barijere za zaštitu od odrona
  - o Kombinacija zaštitnih mreža i barijera za zaštitu od odrona bez donjeg užeta
  - o Barijera zaustavlja odronjeni stijenski blok, a zavjesa omogućava kontrolirano kretanje bloka niz pokos do nožice
  - o Na određenoj udaljenosti može se instalirati nekoliko hibridnih barijera
- Galerije za zaštitu od odrona
  - o Rasprostranjenu uporabu na strmim pokosima iznad uskih željeznica ili prometnica
  - o Na relativnom uskom rasponu i strmo nagnuti krov za učinkovitost

#### KLASIFIKACIJE STIJENSKIH ODRONA

- Kvantitativna klasifikacija treba omogućiti standardiziran način određivanja prioriteta za radove sanacije na područjima opasnosti od odrona
- U Hrvatskoj je potrebno razviti metodologiju klasifikacije stijenskih odrona u kršu koja će biti prilagođena značajkama procesa koji su važni u nastajanju hrvatskog krša

#### RHRS klasifikacija

- **Klasifikacija stijenski odrona (S.A.D); predstavlja bodovni sustav**
- Problem stabilnosti stijenskih pokosa je složen u područjima gdje autoceste prolaze kroz teren koji zahtijevaju zasjeka i/ili usjeka u stijenama
- **Namijenjen je kao alat koji će omogućiti detektiranje područja opasnosti od odrona proaktivno umjesto da se reagira na već pokrenute odronne**
- Pruža pravno obranjiv, standardiziran način određivanja prioriteta za uporabu ograničenih sredstava za izgradnju; postignuto brojčanim razlikovanjem rizika na područjima opasnosti od odrona
- Ne uključuje preporuke za radove sanacije za različito ocijenjene pokose jer odluke o mjerama sanacije ovise o mnogo faktora kao što su financije
- Dva načina ocjenjivanja pokosa preliminarno ocjenjivanje prilikom popisa pokosa i detaljno ocjenjivanje
- Preliminarno ocjenjivanje eliminira mnoge pokose iz daljnjeg razmatranja radi čega je ovaj pristup najučinkovitiji i najisplativiji način za klasifikaciju stijenski odrona kada je veliki broj pokosa u pitanju
- **Preliminarno ocjenjivanje koristi kategorije:** procijenjeni potencijal odrona, aktivnost odrona u povijesti
- **Detaljno ocjenjivanje koristi kategorije:** visina pokosa, učinkovitost jarka za hvatanje odrona, prosječni rizik vozila, procijenjena duljina vidnog polja, širina kolnika uključujući popločani rub, geološke značajke, veličina bloka, klima i prisutnost vode na pokosu, povijest odrona
- Popis pokosa
  - o Svrha pregleda pokosa je identificirati lokacije potencijalnih odrona i odrediti opseg problema
  - o Područje odrona je svaki neprekinuti pokos duž autoceste gdje je isti nivo i način pojavljivanja odrona

- o Unutar neprekinutog područja učestalost ili/i količina odrona mogu biti izrazito različite kao i svojstva materijala i uzroci odrona
- Preliminarno ocjenjivanje
  - o Svrha: grupiranje pregledanih područja odrona tijekom popisa pokosa u tri kategorije te racionalizacija vremena i osoblja na način da se detaljno ne ocjenjuju područja koja su okarakterizirana kao nisko do umjereno opasna u pogledu opasnosti od odrona
  - o Tri klase:
    - A (visoka opasnost)
      - Veliki broj potencijalno opasnih blokova i sigurno je da će blok pasti na kolnik
      - Vidno polje je nedovoljno i kolnik je uzak
      - Mora biti fotografirano
    - B (umjerena opasnost)
      - Odron niz pokos je moguć
      - područje u nožici pokosa je dovoljno široko da ograničava gotovo sve blokove da dosegnu kolnik
      - odron na kolnik je rijetka pojava
    - C (niska opasnost)
      - Malo vjerojatno da će se dogoditi odron na lokaciji ili da će doći do autoceste
      - Rizik događaja je nizak do nepostojeći
  - o Prilikom preliminarno ocjenjivanja trebaju biti pokrivenne informacije o: lokaciji odrona, frekvenciji odrona, doba godine kada je najviše odrona, količini odrona po događaju, fizičke karakteristike materijala iz odrona, mjesto gdje se odron u svojoj putanji zaustavio, dostupne informacije o odronima u povijesti, pretpostavljeni uzrok odrona, učestalost patroloe koja je zadužena za čišćenja jarake, procjena troškova za održavanje poslije odrona
- Detaljno ocjenjivanje
  - o Svrha: brojčano razlikovanje rizika na identificiranim lokacijama kao bi se na temelju rezultata lokacije mogle rangirati prema prioritetu sanacije
  - o Sadrži 12 kategorija prema kojima se pokosi ocjenjuju i boduju, a zatim se rezultati pojedine kategorije zbrajaju
  - o Pokos s većim brojem bodova predstavlja veći rizik od odrona
  - o U kategorijama su sadržani glavni elementi koji su uzroci odrona
  - o Za bodovanje se koristi ekspancijalni sustav bodovanja

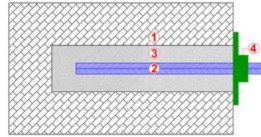
#### MODIFICIRANI RHRS

- Svrha: poboljšati RHRS dodavanjem nekoliko klimatskih i geoloških čimbenika koji su prepoznati u stručnoj literaturi kao uzroci odrona sa svrhom točnijeg procjenjivanja čimbenika koji doprinose odronima te ukloniti nedostatke RHRS
- **Nedostaci RHRS :**
  - o **Subjektivna terminologija za neke parametre ne dopušta dosljednost u ocjenjivanju pokosa od strane različitih ocjenjivača**
  - o **Nekoliko geoloških karakteristika i klimatskih uvjeta nisu obuhvaćeni dosadašnjim sustavom iako doprinose nastanku odrona**
  - o **Obzirom da postoje samo dva parametra koji opisuju geološke značajke pokosa, postoji mogućnost da pokos ima visoki ukupni rezultat iako nije vjerojatno da će geološki uvjeti uzrokovati odron**
- Subjektivne terminologije su se izbacili te su uvedli način bodovanja parametara s numeričkim vrijednostima ili detaljnije opisnom terminologijom na temelju istraživanja
- Sadrži 4 zasebne kategorije koje doprinose potencijalu odrona: karakteristike pokosa, klimatski uvjeti, geološki uvjeti, uvjeti diskontinuiteta
- Dodatna zasebna kategorija je prometni uvjeti

## OJAČANJA STIJENSKE MASE ŠTAPNIM SIDRIMA

### UVOD

- Štapna sidra su osnovni sustav ojačanja stijenske mase koja se sastoje od stijenske mase, elementa sustava ojačanja (čelična šipka), unutarnje veze elementa ojačanja i stijenske mase (injekcijska smjesta) te vanjske veze elemenata ojačanja i stijenske mase
- Osnovni zadatak sidra je pripomoći stijenskoj masi da nosi samu sebe
- Sidra se dijele na
  - Aktivna sidra – unosi se sila prednapinjanja
  - Pasivna sidra – aktiviraju se pomakom stijenske mase
- Pasivna sidra se zovu i štapna sidra (na njima je naglasak)
- Primjena štapnih sidra: rudarstvo, tunelogradnja, zaštita građevinskih jama, zaštita pokosa
- Reakcija sustava ojačanja stijenske mase je mehaničko ponašanje sustava ojačanja kao odgovor na pobudu uslijed ponašanja stijenske mase
  - Priroda reakcije ovisi o odnosima sila i pomaka te obliku uspostavljenog podgradnog sustava u promatranom području
  - Ponašanje sustava ojačanja određeno je pojedinačnim ponašanjem osnovnih elemenata sustava i njihovim međusobnim interakcijama
- Prednosti ojačanja stijenske mase štapnim sidrima: svestrana mogućnost uporabe neovisna o geometriji iskopa, jednostavna i brza mogućnost uporabe, ugradnja je u potpunosti mehanizirana, relativno niska cijena, jednostavno mijenjanje gustoće ojačanja ovisno o kvaliteti stijenske mase

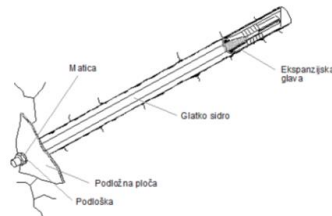


### TIPOVI ŠTAPNIH SIDARA

- Podjela prema različitim načinima sidrenja
  - Mehanički usidrena štapna sidra
  - Injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti
  - Trenjem usidrena štapna sidra
- Tri klase sustava ojačanja štapnih sidara
  - Sustavi s kontinuiranim mehaničkim prijenosom opterećenja
  - Sustavi s kontinuiranim prijenosom opterećenja trenjem
  - Sustavi s diskontinuiranim mehaničkim prijenosom opterećenja ili prijenosom opterećenja trenjem

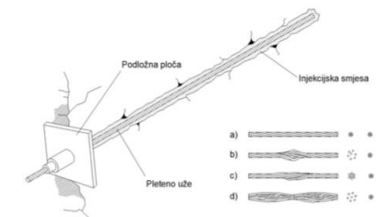
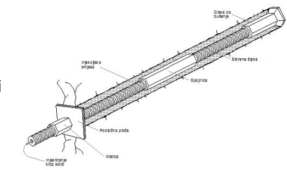
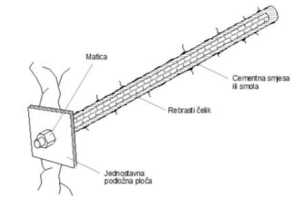
### MEHANIČKI USIDRENA ŠTAPNA SIDRA

- Štapna sidra s ekspanzijskom glavom koja onemogućuje pomake sidra
- Ekspanzijska glava konusno se širi rotacijom sidra pri čemu dolazi do utiskivanja elemenata glave u zidove bušotine
- Sidrenje se ostvaraju na osnovi dva mehanizma:
  - Trenje ekspanzijske glave i zidova bušotine
  - Uklještenje glave u neravnine zidova bušotine
- Privremena ojačanja stijenske mase uslijed djelovanja korozije vremenom dolazi do smanjenja nosivosti
- Za uvjete trajnih konstrukcija nužna je primjena naknadnog injektiranja bušotine
- Prednost: trenutno preuzimanje opterećenja nakon ugradnje i unošenje predopterećenja u stijensku masu
- Nedostatak: moguće slabljenjem ili potpun prestanak njihova djelovanja ako se iskop tunela izvodi miniranjem



## INJEKTIRANA ŠTAPNA SIDRA I PLETENA SIDRA OD ČELIČNIH NITI

- Injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti ugrađuju se u bušotine ispunjene cementnom smjesom
- Veza sa stijenskom masom uspostavlja se cijelom injektiranom dužinom elementa ojačanja na osnovi kemijskih veza, trenja i uklještenja
- Veći značaj imaju trenje i uklještenje, kemijske veze se s vremenom mogu razgraditi
- Injektirana štapna sidra su najčešća ojačanja stijenske mase u svijetu
- Najčešće se koristi rebrasto obrađeni čelik ili odgovarajući obrađeni presjeci čelika posebno proizvedeni za geotehnička sidra
- Za injektiranje se koriste suspenzije na bazi cementa ili umjetnih smola (jeftinije)
- Injektiranje sidra se izvodi na dva načina
  - Izvedena bušotina zapunjava se injekcijskom smjesom, a štapno sidro ugrađuje se u zapunjenu bušotinu
  - U izvedenu bušotinu ugrađuje se štapno sidro nakon čega se injektira prostor između sidra i zidova bušotine; injektiranje se izvodi ugradnjom cijevi za injektiranje do dna bušotine ili ugradnjom pakera
- Samobušiva sidra
  - Koriste se kao dio bušačeg sustava na način da se umjesto bušaće šipke koriste elementi samobušivog sidra koji na vrhu imaju odgovarajuću bušaću glavu
  - Izvide se u skecijama standardne dužine (2,3,4m) i po potrebi nastavljaju odgovarajućim spojnicama
  - Bušenje sidra odgovarajuće dužine završeno je postavljenjem sidra
  - injektiraju sidra izvodi se kroz samo sidro pri čemu injekcijska smjesa izlazi kroz otvore na bušačkoj glavi sve dok injekcijska smjesa ne počne izlaziti na ušću bušotine
  - prednost: omogućavaju značajnu dužinu izvedbe, izbjegavanje mogućnosti zarušavanja bušotine uslijed izvlačenja bušaće šipke i ulaganje sidara, upotreba u oštećenim stijenskim masama
- Većinom se koriste kao pasivna sidra (ne unose dodatna opterećenja tokom izvedbe)
  - Aktiviraju se uslijed deformacija stijenske mase te preuzimaju dio naprezanja
- Pleteno sidro je element ojačanja stijenske mase, uobičajno izveden od čeličnih niti pletenih kao čelično užje i ugrađeno bez unesenog vlačnog opterećenja ili kao vlačno opterećeno i injektirano u kontaktu s stijenskom masom
- Prednost pletenih sidara: uporaba velike duljine kao i kombinacije unošenja vlačnih naprezanja i prijenosa na podgrađen stijensku masu
- Pleteno sidro od čeličnih niti: standardni tip, garford bulb, nutcase, birdcage



### TRENJEM USIDRENA ŠTAPNA SIDRA

- Prijenos opterećenja realizira se trenjem uslijed radijalne sile koja djeluje na zidove bušotine duž cijele dužine bušotine
- Sidro se sastoji od čelične cijevi koja se mehaničkim ili hidrauličkim putem širi sve dook stijenke cijevi ne dostignu kontakt s zidovima bušotine
- Opterećenje stijenske mase prenosi se na element ojačanja izravno bez nužno potrebno završnog elementa prijenosa i injektiranjem bušotine
- Prednost: relativno jednostavna ugradnja, trenutno preuzimanje opterećenja neposredno nakon ugradnje

- Nedostatak: relativno visoka cijena, ograničenost uporabe za trajne konstrukcije zbog korozije
- Dvije vrste sidra:
  - Split set
    - Koristi naglavnu ploču radi osiguranja dijela stijenske mase na klizanje duž sidra
    - Ugradnja sidra izvodi se mehaničkim utiskivanjem sidra u bušotinu pri čemu je promjer cijevi sidra veći od promjera bušotine
    - Sidro se pri tome može prilagoditi velikim pomacima bez sloma
  - Swellex
    - Radi po mehanizmu sidrenja sidra koje nosi trenjem i uklještenjem u zidove bušotine
    - Izvodi se proširivanjem ugrađene cijevi hidrauličkim pritiskom unutar cijevi pri čemu se cijev skraćuje
    - Sidro može podnijeti velike deformacije stijenske mase

### MODELIRANJE PONAŠANJA ŠTAPNIH SIDARA

- Modeliranje ponašanja sidara i stijenske mase dijeli se na
  - Modele koje razmatraju ponašanje sidara u okolišu stijenske mase i njihov međusobni odnos zanemarujući uvjete stanja naprezanja u stijenskoj masi koja proizlaze iz zahvata u stijenskoj masi
  - Modele koji razmatraju ponašanje stijenske mase ojačane sidrima u uvjetima stanja naprezanja uzrokovanog iskopom podzemnih otvora ili zasijecanjem padina
- Različiti mogući modeli sloma unutar sustava ojačanja stijenske mase
  - Slom u čeliku štapnog sidra
  - Slom veze injekcijske smjese i stijenske mase
  - Slom veze sidra i injekcijske smjese
  - Slom stijenske mase u okolišu sidra
  - Slom u injekcijskoj smjesi
  - Slom stijenske mase oko zone ojačane sidrima
- Metode projektiranja ojačane stijenske mase štapnim sidrima dijeli se u tri osnovne grupe:
  - Empirijske metode projektiranja
    - Zasnivaju se na primijenjenim metodama koje su se pokazale uspješne u praksi
    - Treba koristiti klasifikacijske postupke opisa stijenske mase na osnovi koji se mogu povezivati pojedina empirijska rješenja sa stanjem stijenske mase na koju će se izvršiti aplikacija rješenja
    - Koriste se u rješavanju relativno jednostavnih inženjerskih problema pri kojima je utjecaj zahvata na dubini potrebnog podgrađivanja relativno mali, a faktor sigurnosti podgradnog sustava u pravilu veliki
  - Analitičke metode projektiranja
    - Relativno dobro opisuju zakone ponašanja pojedinačnih štapnih sidara
    - Problem nastaje pri primjeni postojećih odnosa u analizama ponašanja štapnih sidara u sklopu potrebnih podgradnih sustava u geotehničkim zahvatima (numerički model)
    - Ograničene mogućnosti u opisivanju složenijih odnosa ponašanja materijala (sidra, injekcijske smjese, stijenske mase), a pogotovo njihovih veza (sidro-injekcijska smjesta, injekcijska smjesta-stijenska masa)
  - Numeričke metode projektiranja (primjena)
    - Vrlo složeni modeli koji vrlo dobro opisuju ponašanje štapnih sidara u stijenskoj masi
    - Modeli koji relativno dobro opisuju ponašanje stijenske mase ojačane štapnim sidrima dok je ponašanje štapnih sidara opisano relativno jednostavnim modelima ponašanja
    - Modeli koji relativno dobro opisuju ponašanje stijenske mase ojačane štapnim sidrima, ali je opis ponašanja štapnih sidara kao element ojačanja u ukupnom modelu vrlo loše zastupljeno i daleko je od stvarnog ponašanja sidara in situ

### ISPITIVANJE SIDARA

- U cilju
  - Verifikacije projektnog rješenja – ponaša li se sidro u skladu s pretpostavkama
  - Dobivanje parametara nužnih za projektiranje – probno sidro

- Kontrole kvalitete izvedenih radova
- Ispituje se nosivost sidra/sila u sidru ili kvaliteta injektiranosti sidra

### ISPITIVANJE NOSIVOSTI SIDRA / SILE U SIDRU

- Test čupanja sidara
  - Razorna metoda, relativno skupa, spora metoda ispitivanja
  - Minimalno se 5% ugrađenih sidara ispituje
  - Vršiti se mjerenje sile na glavi sidra
  - Svrha mjerenja sile na glavi sidra je da se utvrdi sila kojom stijenska masa na konturi iskopa djeluje na glavu sidra
  - Mjerilo sile umetne se između navrtke i posebnog elementa koji je prilagođen obliku mjerila sile
  - Tijekom vremena očitava se sila koju sidro preuzima na sebe
  - Nametanjem vlačne sile određuje se dijagram odnosa sile i pomaka
  - Dvije vrste ispitivanja testa čupanjem:
    - Provjera stvarne nosivosti sidra prilikom čega dolazi do izvlačenja sidra iz stijenske mase
    - Sidro se ispituje do sile predviđene projektom te se zatim ispitivanje zaustavlja
- Tehnika akustične emisije
  - Nova nerazorna metoda
  - Ispitivanjem tehnikom akustične emisije armaturnih šipki i ab ukazali su na mogućnost ispitivanja ponašanja štapnih sidara injektiranih u stijenskoj masi
  - Napredovanje elastičnih valova nastalih kao rezultat pucanja veza injekcijske smjese i štapnog sidra kao i pojavom pukotina u injekcijskoj smjesi odvija se duž štapnog sidra
  - Na kraju sidra su postavljeni senzori koji registriraju takve pojave
  - Prednost: izvor signala je u samom materijalu
  - Moguće je odrediti silu koja je vrlo blizu sile sloma kada mjereni broj impulsa akustične emisije naglo poraste; nastaju plastične deformacije pri toj sili, ali je integritet sačuvan
- GRANIT sustav
  - Koristi se za ispitivanje geotehničkih sidara koja imaju slobodnu i sidrišnu dionicu (aktivna sidra)
  - U svakom sidru tijekom njegova vijeka trajanja dolazi do promjee sile tijekom kojeg se sila u sidru mijenja te je pretpostavka ispitivanja da se određivanjem vlastitih frekvencija sidara može odrediti razina sile u sidru
  - Generiranje impulsa na glavi sidra postiže se koristeći patentirani uređaj dok se vibracijski odgoov sidra i njegove okoline mjeri akcelometrom koji se nalazi na glavi sidra

### ISPITIVANJE KVALITETE INJEKTIRANJA

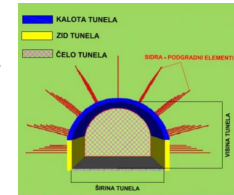
- Boltometar
  - Metoda korištenja određivanja kvalitete injektiranja štapnih sidara
  - Generiranje ultrazvučnih valova u sidru i praćenje njihove refleksije
  - Ako je sidro dobro injektirano neće biti povrata energije signala, međutim ako je loše injektirano registrira će se povrat određene količine energije
  - Pri tome mora postojati razlika u impedanciji između injekcijske smjese i stijenske mase jer će u protivnom valna energija u potpunosti dispirati u stijenu prije nego li je uopće val stigao do greške u injektiranju
  - Na temelju razine povratne energije Boltometar klasificira injetkirana sidra u 4 skupine
    - A – optimalno
    - B – reducirano
    - C – manjkavo
    - D – vrlo loše
  - Nedostaci: problem pri ispitivanju u raspucalim stijenskim masama gdje dolazi do gubitka energije, glava sidrene šipke mora biti precizno obrađena(sječenje, brušenje, poliranje) kako bi se osigura kvalitetan kontakt generatora valovo i čelika
- Kovačević et al.

- Generiranjem mehaničkog impulsa na glavi sidra, određivali dominantnu frekvenciju te je stavili u vezu s postotkom injektiranosti štapnog sidra
- Prednost: nije potrebna obrada glave sidra
- Nedostatak: zbog analize samo dominantne frekvencije kompleksnij slučajevi nekvalitetnog injektiranja nisu razmatrani

## TUNELOGRAĐNJA

### UVOD

- Tunnel, u užem smislu, je podzemni prostor za prolaz ili transport ljudi i materijala, izveden ljudskom djelatnošću, malih dimenzija poprečnog presjeka u odnosu na dužinu s niveletom koja ne odstupa znatnije od horizontale
- Tri glavna argumenta za tunelogradnju su svladavanje terenskih prepreki, nedostatak prostora i zaštita okoliša
- Podjela tunela s obzirom na namjenu
  - Prometni – cestovni, željeznički, brodski, pješački, mješoviti
  - Hidrotehnički – vodovodni, melioracijski, kanalizacijski, u sklopu hidrocentrala
  - Komunalni – smještaj telefonskih, električni vodova, toplovoda, plinovoda

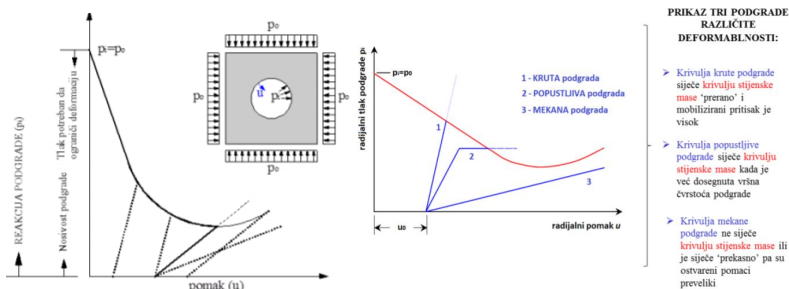


### TUNELSKA PODGRADA

- Primarna podgrada
  - Primjenjuje se za vrijeme ili odmah nakon iskopa kako bi se osigurali sigurni radni uvjeti tijekom kasnijeg iskopa i inicirao proces mobiliziranja i konverzacije čvrstoće stijenske mase na način da se kontrolira pomak granice iskopa
  - Svaka dodatna podgrada primjenjena u kasnijoj fazi naziva se sekundarnom
  - Sastoji se od
    - Stijenske mase
    - Mlaznog betona
      - Upotrebljava se a sprječavanja rahljenja stijene i kao podgradni element
      - Obloga od mlaznog betona zatvara pukotine u stijeni, sprječava ispadanje blokova stijene iz kalote i blokova i time pojavu progresivnog loma
      - Vežanjem za stijenu poboljšava mehaničku kvalitetu stijene i sprječava redukciju njezine čvrstoće
      - Primjenjuje se mikroarmirani mlazni beton primjenom čeličnih ili poliprolenskih vlakana propisanih karakteristika ili normalni mlazni beton
    - Čeličnih mreža i lukova
      - čelične zavarene mreže upotrebljavaju se u kombinaciji s mlaznim betonom
      - obično Q i R mreža; Q mreža kada je debljina mlaznog betona >25cm
      - čelični lukovi su u slabijoj primjeni
      - čelični lukovi podupiru iskop zajedno s armiranim mlaznim betonom kao elastična podgrada i sprječavaju rastresanje stijene
      - postavljaju se neposredno nakon iskopa ak neam izgleda da će lagana podgrada zaustaviti napredovanje deformacije stijene
    - Sidra
      - Osnovni podgradni element s kojim se poboljšavaju fizičke i mehaničke karakteristike stijene oko iskopa
      - Ugrađuje se sustavno kao dio standardnog podgradnog sustava
      - Broj sidra, dužina, nosivost i raspored ovise o kvaliteti stijene, veličini i obliku poprečnog presjeka i dužina napredovanja
      - Uloga pojedinačnog sidrenja je da sanira lokalne pojave nestabilnost i smanjuje mogućnosti geoloških odvala stijenske mase
      - Uloga sistematskog sidrenja je povećanje ili održavanje čvrstoće stijenske mase i ravnomjerna raspodjela opterećenja oko podzemnog iskopa
      - Djelovanje sidara u stijenskoj masi može se opisati kao: dodatni unutrašnji pritisak na granicu iskopa, poboljšanje karakteristika stijenske mase, pridržanje nestabilnih

blokova, povezivanje slojeva uz povećanje posmične čvrstoće u diskontinuitetima, formiranje nosivog svoda od stijene ojačane sidrima

- Posebne mjere podgrađivanja
  - o Čelična koplja, cijevni kišobran, mlazno injektiranje, iskop pod komprimiranim tlakom, zamrzavanje tla i stijene, odvodnja
- Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade
  - o Predstavlja odnos između podgradnog pritiska ( $p_i$ ) potrebnog da se uspostavi ravnoteža na rubu podzemnog otvora pri danom radijalnom pomaku ruba otvora, a prema tom radijalnu pomaku ( $u_i$ )
  - o  $p_i$  – naprezanje koji podgrada djeluje na stijensku masu, naprezanje koje podgrada preuzima na sebe
  - o  $p_0$  – prirodno naprezanje u stijenskoj masi na mjestu podzemnog otvora prije iskopa
  - o pretpostavke
    - analizira se kružni otvor polumjera  $a$
    - prirodno stanje naprezanja oko otvora je hidrostatsko
    - stijenska masa u zoni iskopa je homogena i izotropna; u nedirnutom stanju ponaša se idealno elastično te su joj svojstva opisana modulom elastičnosti i Poissonovim koeficijentom; nakon prekoračenja čvrstoće stijenska masa se ponaša idealno plastično
    - podgradni pritisak je jednolik po cijelom unutrašnjem rubu otvora



- o Koristi se za analizu podgrade potrebne za stabilizaciju podzemnog otvora tj. da bi smo znali odrediti pravo vrijeme ugradnje i dozirati stijenski pritisak
- o Učinkovitost podgrade određena je početkom postavljanje podgrade, krutošću sustava podgrade i nosivošću sustava podgrade
- Sekundarna obloga
  - o Izvodi se od AB nakon završetka primarne tunelske podgrade
  - o Između primarne i sekundarne obloge postavljaju se slojevi hidroizolacije
  - o Djeluje s primarnom kao spregnuta konstrukcija, a njihov spoj se promatra kao kruta veza
  - o Primarna tunelska podgrada služi za trajno osiguranje tunelskog profila i u interakciji sa stijenskim masivom mora preuzeti cjelokupno opterećenje
  - o Sekundarna tunelska obloga ne preuzima nikakvo značajnije opterećenje

### ANALIZA OPTEREĆENJA NA SEKUNDARNU OBLOGU

- Vlastita težina sekundarne obloge
  - o Težina AB čija debljina varira 10 - 50 cm i više
  - o Može se dodati i opterećenje težine ventilatora ovisnih u svodu tunela
  - o Intenzitet opterećenja potrebno je precizno definirati
  - o Javlja se odmah nakon očvršćavanja betona tj prije puštanja bilo kojeg prometa u tunelu
- Skupljanje i puzanje betona sekundarne obloge
  - o Dugotrajni procesi koji uzrokuju deformaciju sekundarne obloge

- o O pouzdanosti mjerenja reoloških i mehaničkih karakteristika ugrađenog betona ovisi preciznost određivanja intenziteta opterećenja
- o Mijenja se u vremenu, no ne utječe značajno na stanje naprezanja u primarnom podgradnom sustavu i okolnoj stijeni
- Injektiranje šupljine u svodu
  - o Zbog prva dva opterećenja može doći do stvaranja šupljina između primarne i sekundarne podgrade
  - o Kako bi se ponovo uspostavio kontakt provodi se kontaktno injektiranje kroz otvore ostavljene u svodu sekundarne obloge
- Temperaturne promjene u tunelu
  - o Izazivaju deformacije betona, a time i promjenu stanja naprezanja u sekundarnoj oblozi
  - o Intenzitet se može prilično pouzdano odrediti
  - o Ne utječe značajno na stanje naprezanja u primarnom podgradnom sustavu i okolnoj stijeni
- Podizanje razine podzemne vode oko tunela
  - o Djeluje na primarni i sekundarni podgradni sustav, a istovremeno mijenja efektivna naprezanja u okolnoj stijeni
  - o Intenzitet se može prilično pouzdano odrediti
  - o Ako za vrijeme eksploatacije dođe do podizanja vode, tada sekundarna obloga preuzima dio opterećenja na sebe jer je sada i ona nosivi konstruktivni sustav
  - o Može uzrokovati reološke promjene u stijeni i primarnom podgradnom sustavu i time povećati opterećenje na sekundarnu oblogu
- Trajnost primarnog podgradnog sustava
  - o Gubitak mehaničkih karakteristika primarnog podgradnog sustava predstavlja najveće opterećenje na sekundarnu oblogu i izaziva velike promjene stanja naprezanja i deformacija
  - o Opterećenje se javlja na tri načina
    - Stijenska masa koja je uključena u primarni podgradni sustav izložena je dugotrajnom opterećenju i različitim režimima podzemnih voda zbog puzanja, bujanja ili rastrožbe dolazi do povećanja opterećenja na primarnu podgradu te prijenosa opterećenja na sekundarnu oblogu
    - Primarna podgrada opterećena iznad polovine svoje čvrstoće imat će znatne viskozne deformacije puzanja, a rezultat toga je uključivanje sekundarne obloge u proces zaustavljanja deformacije stijenskog masiva
    - Čelična geotehnička sidra, naročito ona bez zaštite, nakon većih deformacija izvrgnuta su intenzivnoj koroziji te nakon toga potpuno zakazuju to dovodi do slabljenja primarnog podgradnog sustava i prijenosa opterećenja na sekundarnu oblogu
  - o Intenzitet je veoma teško utvrditi

### NATM

- Nije metoda ako pod metodu podrazumijevanom tehnologiju gradnje koja se može prikazati shemom iskopa i nacrtima podgrade
- Nije vezana za neku proceduru iskopa i podgrađivanja
- To je generalni koncept tj. filozofija tunelogradnje; postupak gradnje tunela temeljen na znanstveno utvrđenim i u praksi potvrđenim idejama i principima kako bi se mobiliziranjem kapaciteta stijenske mase ostvarila optimalna sigurnost i ekonomičnost
- Četiri osnovna načela NATM-a
  - o Zadržati čvrstoću stijene –
    - izbjeći nepoželjno oslajivanje stijene pažljivim iskopom i trenutnom primjenom podgrade i očvršćavanja
  - o Zaboljeni oblici presjeka –
    - izbjegavati koncentracije naprezanja u kutevima u kojima počinje progresivni lom
  - o Popustljiva tanka podgrada

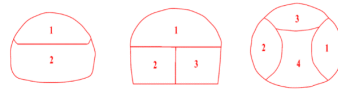
- Primarna podgrada treba biti fleksibilna kako bi se smanjili momenti savijanja i olakšali procesi preraspodjele napreznja, a podgrada se ne izvrgava nepovoljnim unutrašnjim silama
- Potreba dodatnog podgrađivanja ostvaruje se sidrenjem
- Podgrada mora u biti u potpunom kontaktu s vidljivom stijenom (mlazni beton)
- Mjerenja in-situ
  - Opažanja ponašanja tunela za vrijeme gradnje je vrlo bitno
  - Praćenje i interpretacija deformacija i napreznja može optimizirati radne postupke i potrebe podgrađivanja
  - Kontrola deformacija tj porcesa preraspodjele napreznja da bi se zajmčio trađeni stupanj sigurnosti

## POSTUPAK PROJEKTIRANJA

- Projektiranje tunela zahtjeva minimalno sljedeće discipline:
  - Geotehniku
  - Građevinskog konstrukterstva
  - Geologiju
  - Osnova ugovaranja i pravnih odnosa
  - Tehnike iskopa i napredovanja
- Projektant geotehničkih konstrukcija u podzemnoj gradnji nema mogućnost izbor osnovnog strukturnog materijala jer je to stijenska masa ili tlo
- Istražni radovu u cilju definiranja karakteristika i stanja tla i projektiranje trebaju nastaviti tijekom izvođenja
- Tunelogradnja ima visoki humani i financijski rizik koji je povezan s uvjetima u stijenama
- Norveški sustav ugovaranja tunela temelji se na podjeli rizika te dobroj suradnji investitora, izvođača i konzultanta što rezultira smanjenjem troškova

## RAZRADA PROFILA

- Ako je stijena loše kvalitete, tada se iskop radi u više faza
- Kod višefaznog iskopa zadani profil tunela se kopa u više faza na način da se čelo iskopa podijeli na više dijelova
- Kod toga je bitno osigurati da su sva iskopana čela stabilna prije iskopa sljedećeg



## TEHNOLOGIJA IZVEDBE

- Metoda iskopa i zatrpavanja
  - Sastoji se od iskopa građevinske jame s površine terena, izvedbe tunelske konstrukcije u jami te zatrpavanja izvedene konstrukcije tlom iz iskopa; primjena u zonama malog nadsloja
- Metoda tunelogradnje u mekim tlima
  - Ne postoji nikakva inicijalna slabost podzemnog iskopa i trenutno se podgrađivanje mora osigurati krutim oblogama
  - Za izvođenja tunela se primjenjuje metoda štita pod čijom zaštitom se obavlja iskop i izrada obloge od prefabriciranog elemenata
  - Okolni medij ne sudjeluje aktivno u stabilizaciji podzemnog iskopa
- Metoda tunelogradnje u mediju dovoljne čvrstoće da aktivno sudjeluje u stabilizaciji podzemnog iskopa
  - Primjena metode kreće se od više kohezivnih tla do najkvalitetnijih stijenskih masa
  - Bitni strukturni element kod ove metode tunelogradnje je okolni medij
  - Za izvođenje se danas najviše primjenjuje NATM i NMT
- Osnovna podjela tehnika iskopa
  - Miniranje
    - Eksploziv se postavlja u predviđene bušotine, povezuje i detonira
    - Kontrolirane eksplozije radi očuvanje kvalitete okolne stijenske mase
    - Dvije tehnike miniranja
      - Presplitting metoda
      - Metoda glatkog miniranja
  - Strojni iskop

- Bageri – meške stijene i tvrda tla
- Iskop rezanjem stijene – precizan iskop s vrlo malim poremećenjem stijenske mase
- Strojevi s pokretnom glavom
  - Proizvoljno kretanje po tunelu i lako postizanje željnog pop.presjeka
  - Maleni, jeftini i fleksibilni strojevi; glodači ili strojevi s diskovima
- Strojevi za iskop u punom profilu tzv. krtice
  - Na čelu je rotirajuća rezana glava koja vrši iskop
- Dvije osnovne tehnike ugradnje malznog betona
  - Suhi postupak – suha mješavina cementa i agregata dovodi se na mlaznicu zračnim transportom gdje se dodaje voda i aditivi
  - Mokri postupak – mješavina agregata, cementa i vode napravi se u mješalici za beton i gumenim se cijevima dovodi na mlaznicu zračnim transportom ili pumpama za beton

## TEMELJENJE NA STIJENI

### UVOD

- Proračun temeljenja na stijeni obuhvaća tri različita aspekta djelovanja temelja:
  - o Nosivost stijenske mase – osigura da se neće dogoditi slom stijenske mase ili njezino puzanje ispod temelja
  - o Slijeganje temelja – proizlazi iz elastičnih i neelastičnih deformacija stijenske mase i stiskanja mekših slojeva koji se nalaze u stijenskoj masi
  - o Stabilnost temelja – uslijed posmičnog sloma blokova stijenske mase formirnog po presjecajućim diskontinuitetima u opterećenom području ispod temelja
- Ponašanje temelja mora se provjeriti u odnosu na sva tri uvjeta koja su neovisna jedna o drugom
- Kod temelja samca bitno je odrediti dopuštenu nosivost stijenske mase i predviđenu veličinu slijeganja, kod temelja uporka mosta bitno je da su blokovi stabilni
- Cijela konstrukcija mora zadovoljiti dva granična stanja
  - o Granično stanje nosivosti
    - Opterećenje od gornje konstrukcije mora biti manje od nosivosti odnosno dopuštenog opterećenja temeljne konstrukcije (stabilnost temelja)
  - o Granično stanje uporabivosti
    - Slijeganje konstrukcije uzrokovana deformacijom temeljne stijene mora biti manja od dopuštenih slijeganja za konstrukciju
- Pri projektiranju temelja na stijeni treba uzeti u obzir:
  - o Krutost i čvrstoću stijenske mase i dopušteno slijeganje gornje konstrukcije
  - o Prisutnost slabih slojeva, otapanja, rasjeda i slično ispod temelja
  - o Prisutnost naslaga i diskontinuiteta
  - o Stanje rastrošenosti i razlomljenosti stijene
  - o Promjena prirodnog stanja naprezanja uzrokovano izgradnjom
  - o Razinu i tlakove podzemne vode
- Nestabilnost temelja može biti inicirana aktiviranjem već postojećih diskontinuiteta ili stvaranjem ploha diskontinuiteta pod utjecajem vanjskih opterećenja
- Modeli ponašanja stijenske mase u proračunu plitkog temelja ovisi o efektu mjerila tako da razmatramo temeljenje kao na kontinuiranoj ili diskontinuiranoj sredini
- Modeli ponašanja se razvrstavaju u 5 grupa
  - o 1.grupa – stijensku masu promatramo kao intaktnu stijenu koja je homogena, izotropna, kontinuirana i linearno elastična
  - o 2. i 3. grupa – stijensku masu promatramo kao nehomogenu, anizotropnu, diskontinuiranu i nelinearno elastičnu
  - o 4. i 5. grupa – zbog velikog broja diskontinuiteta, stijensku masu možemo razmatrati kao uvjetno homogenu i izotropnu

### RASPODJELA NAPREZANJA ISPOD DJELUJUĆIH SILA

- Jednadžbe raspodjele naprezanja ispod chile poluprostora za ravninski slučaj vertikalnog i horizontalnog linijskog opterećenja
  - o Chile poluprostor – kontinuirani, homogeni, izotropni, linearnoelastični
  - o Radijalno naprezanje na udaljenosti  $r$  od linijskog opterećenja  $R$  i pod nagibom  $\theta$  u odnosu na ravninu djelovanja iznosi  $\sigma_r = \frac{2R \cos \varphi}{\pi \cdot r}$
  - o Silu koja djeluje u proizvoljnom nagibu u odnosu na površinu poluprostora možemo razdijeliti na horizontalnu i vertikalnu komponentu te pomoću B-C jednadžbe doći do raspodjele naprezanja
  - o Ukoliko je stijenska masa presječena sa sustavom diskontinuiteta, tada postoji mogućnost da neće moći podnijeti ni tlačno ni posmično naprezanje bez obzira na veličinu opterećenja



- o U slučaju slojevitosti stijenske mase i pojave diskontinuiteta, oblik konture radijalnog naprezanja se mijenja, a radjalna naprezanja se prenose na veće dubine

### NOSIVOST TEMELJA

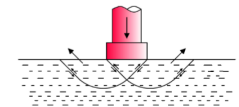
#### Pristup određivanju nosivosti temelja (primjenjuju se u teoriji plastičnosti)

- Ravninskom slučaju linijskog opterećenja temelja pristupa se ili izračunom nosivosti iz ravnoteže sila na pretpostavljeni raspored diskrentnih blokova ili izračunom dostizanja nosivosti iz pretpostavljene distribucije naprezanja ispod opterećene zone
- Dva osnovna teorema plastične analize iz teorije plastičnosti su
  - o Teorem gornje granice
    - Pri procjeni sile plastičnog sloma izjednačavanjem promjene disipacije unutrašnje energije sa promjenom rada vanjskih sila pri bilo kojem pretpostavljenom mehanizmu diskrentnih blokova → dana procjena će rezultirati višoj ili točnoj vrijednosti sile sloma
    - Koristi se kod proračuna temelja kod kojega je nestabilnost uvjetovana pomacima krutih stijenskih blokova uzduž već postojećih diskontinuiteta
    - Primjena koncepta virtualnog rada
  - o Teorem donje granice
    - Ukoliko možemo odrediti distribuciju naprezanja u konstrukciji, pri čemu je ta distribucija u unutrašnjoj ravnoteži kao i u ravnoteži s vanjskim silama pri čemu su ta naprezanja manja od kritičnog naprezanja pri kojem počinje popuštanje, tada će stijenska masa sigurno nositi dane vanjske sile
    - Koristi se kod proračuna temelja kod kojega je nestabilnost uvjetovana popuštanjem jako opterećene slabe stijene
    - Osnova metode jest određivanje mogućnosti nastanka lokalnog plastičnog sloma

#### Metode određivanja nosivosti temelja u praksi

Ovisno o modelu ponašanja stijenske mase postoje različiti načini određivanja nosivosti stijenske mase za temelje na stijeni.

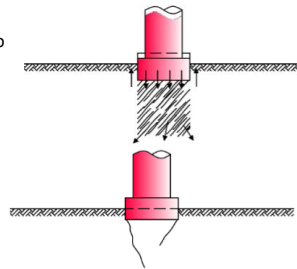
- Probno opterećenje
  - o **Najpouzdanija metoda**; ako se očekuje relativno velika slijeganja, veliki je broj elemenata koji utječu na nosivost te posebno ako se radi o problemu koji promatramo kao anizotropan
  - o Zbog relativne skupoće, isplativa su samo kod značajnih građevina
- Korištenje iskustvenih publiciranih tablica
  - o Za određene tipove stijenske mase karakteristično je kod jednostavniji konstrukcija na relativno dobrim stijenskim masama
  - o Pretpostavljene vrijednosti nosivosti određene su s relativno velikom rezervom, ali problem je što za istu stijensku masu postoje znatne razlike u vrijednostima prema različitim propisima
  - o Vrijednosti nosivosti stijenske mase najčešće su dovedene u korelaciju s jednoosnom tlačno čvrstoćom monolitne stijene, RQD indeksom ili RMR ili Q klasifikacijom
- Numeričke metode
  - o Kod složenih situacija u diskontinuiranoj stijenskoj masi
  - o Zahtijevaju uporabu odgovarajućih parametra čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase koje je potrebno izmjeriti
  - o Prednost: proračun obuhvaća utjecaje širine temelja, dubine temeljenja i utjecaj diskontinuiteta
- **Zatvorena analitička rješenja**
  - o Primjenjuju se u kontinuiranoj sredini
    - Kod izrazito razlomljene stijenske mase koja se može promatrati kao kvazihomogena, javlja se mehanizam loma vrlo sličan onom u tlu pa se za proračun granične nosivosti mogu primjenjivati teorije razvijene za tlo



$$q = c \cdot N_c + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma + \gamma \cdot D \cdot N_q$$

$N_c, N_\gamma, N_q$  – faktori nosivosti  $q$  – nosivost tla  $\gamma$  – efektivna težina stijene  $B$  – širina temelja  $D$  – dubina baze temelja  $c$  – kohezija stijenske mase

- Kod slabo cementiranih sedimentnih stijena ili izrazito poroznih stijena, mehanizam sloma se može opisati kao kolaps strukture pore; ispod opterećene površine u takvim je stijenama lom vidljiv kao utiskivanje u stijenu
- Kod čvrstih, malo poroznih i krutih stijena, koje imaju malu vlačnu čvrstoću, mehanizam sloma može se opisati širenjem vlačnih pukotina



- U početku nanošenja opterećenja na temelj odnos naprezanja i deformacije može se izraziti linearno elastičnim modelom
- Kada naprezanje u stijenskoj masi ispod temelja u nekom smjeru dosegne vlačnu čvrstoću počinje razvoj vlačnih pukotina
- Daljnjim povećanjem opterećenja pukotine se umnožavaju zbog čega se javlja zdrobljena zona ispod temelja
- Zbog učinka dilatacije, zdrobljeni se klin ispod temelja širi bočno, uzrokujući pojavu radijalnih pukotina
- Daljnjim širenjem te pukotine mogu izbiti na površinu u okolini temelja, pa se time formira izbačeni klin

#### Goodman prema Mohr-Coulombovom zakonu čvrstoće

Grafična nosivost plitkog temelja na stijenskoj masi:

$$q_f = q_u \cdot \left[ \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \right]$$

$$q_{dop} = \frac{q_f}{F_s}$$

$q_f$  – grafična nosivost stijenske mase  
 $q_{dop}$  – dopušteno opterećenje temelja  
 $q_u$  – jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase  
 $\phi$  – kut unutrašnjeg trenja za zdrobljenu stijenu  
 $F_s$  – faktor sigurnosti

#### Goodman prema Hoek-Brownom zakonu čvrstoće

Grafična nosivost plitkog temelja na stijenskoj masi:

$$q_f = \left[ m_b \cdot \sigma_c \cdot \left( s \cdot \sigma_c^2 \right)^a + s \cdot \sigma_c^2 \right]^a + \left( s \cdot \sigma_c^2 \right)^a$$

$q_f$  – grafična nosivost stijenske mase  
 $\sigma_c$  – jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase  
 $m_b, s, a$  – parametri stijenske mase

#### Xiao-Li, Jian-Hua(2005)

Grafična nosivost plitkog temelja, za stijensku masu čija se čvrstoća može opisati Hoek-Brownovim kriterijem:

$$q_u = s^{0,5} \cdot \sigma_c \cdot N_\sigma + q_0 \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B_0 \cdot N_\gamma$$

$N_\sigma, N_\gamma, N_q$  – faktori nosivosti  
 $q_0$  – površinsko opterećenje temelja  
 $B_0$  – širina temelja  
 $\gamma$  – jedinična težina stijenske mase

Za temelj na površini površinsko opterećenje je  $q_0$  i ako se analizira materijal bez težine  $\gamma=0$ , izraz postaje:

$$q_u = s^{0,5} \cdot \sigma_c \cdot N_\sigma$$

#### DOPUŠTENA NAPREZANJA

- Kada je određena granica nosivosti sljedeći korak je utvrđivanje dopuštenog opterećenja. Dopušteno opterećenje mora biti manja od grafične nosivosti da bi se osigurala prihvatljiva razina rizika od loma temelja
- Globalni faktor sigurnosti treba obuhvatiti
  - o Statističko variranje parametara stijenske mase s kojima je izvršen proračun grafične nosivosti
  - o Stupanj s kojim model loma stijenske mase upotrebljen u proračun odgovara stvarnom stanju
- **Globalni faktor je umnožak parcijalnih faktora**

- o  $F_m$  – razmatra mogućnost pojave krug loma, ovisi o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći stijenske mase, vrsti stijene i veličini temelja
- o  $F_p$  – uzima u obzir statističko variranje parametara stijenske mase
- Dopušteno naprezanje dobiva se dijeljenjem grafične nosivosti s globalnim faktorom sigurnosti

#### NOSIVOST TEMELJA NA STIJENSKOM POKOSU

- Mehanizmi sloma su kombinacija dva tipa sloma
  - o P – slom po plohama diskontinuiteta
  - o R – slom kroz stijensku masu
- Za stijensku masu bez težine, horizontalnu površinu stijenske mase oko temelja i vertikalno opterećenje temelja, vrijedi sljedeći izraz za grafičnu nosivost plitkog temelja

$$q_f = \beta_n \cdot (N_\beta - \zeta_n)$$

$q_f$  – grafična nosivost stijenske mase  
 $\beta_n, \zeta_n$  – faktori koji ovisi o kvaliteti stijenske mase  
 $N_\beta$  – faktor nosivosti (može se očitati iz tablice ili iz dijagrama)

$$\beta_n = A_n \cdot \sigma_c \quad A_n = (A_n^*)^{\frac{1}{2}} \quad A_n^* = m_b (1-a) \frac{1}{2^a} \quad k = (1-a) \frac{1}{a} \quad \zeta_n = \frac{s}{m_b \cdot A_n}$$

#### DUBOKO TEMELJENJE

- Ako temeljno tlo nema dovoljnu nosivost ili je podložno velikim slijeganjima, tada se opterećenje od konstrukcije prenosi u dubinu do stijene mase pomoću AB pilota
- Piloti se koriste kod temeljenja u tlu, rastrošenoj stijenskoj masi, stijenskoj masi s malom krutošću i čvrstoćom, stijenskoj masi s velikim opterećenjima
- **Dvije vrste pilota**
  - o Bušeni – kroz tlo se izvodi bušotina koja se nastavlja u stijeni gdje se izvodi AB pilot, minimalna dubina je 60 cm, dubina ovisi o opterećenju, dimenzijama pilota i karakteristikama stijenske mase; ne smije se trenje zaboraviti
  - o Zabijani – češće se izvode u tlu gdje najčešće završavaju u krutim šljuncima, ali mogu i kod podloge od mekših stijena
- Piloti mogu djelovati i u grupi spojeni naglavnom konstrukcijom koja prenosi i raspodjeljuje opterećenje od konstrukcije na pilote
- Učinak djelovanja svakog zasebnog pilota u grupi manji je nego kod individualnog pilota, a opterećena zona stijenske mase je veća ispod grupe pilota
- Izraz za nosivost stijenske mase ispod vrha temelja

$$\sigma_{np} = \beta (N_\beta - \zeta) s_\beta$$

gdje su:

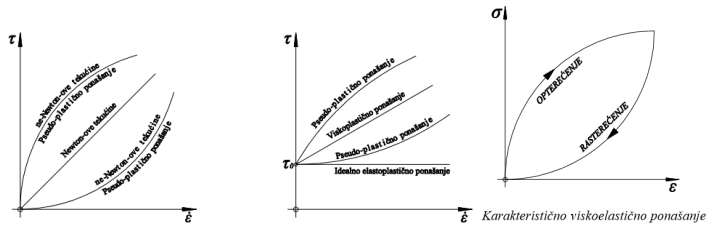
$$\beta = \frac{m \cdot \sigma_c}{8}, \quad \zeta = \frac{8s}{m^2}$$

$N_\beta$  – funkcija omjera duljine pilota u stijeni i pritiska nadsloja

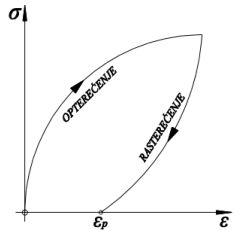
$s_\beta$  – faktor oblika

## REOLOGIJA

Reologija je znanost koja proučava deformaciju i tečenje materije - odnos između naprezanja i deformacije u ovisnosti o vremenu



- Idealno viskozno** - brzina deformacije materijala linearno se povećava s povećanjem naprezanja
- Idealno elastičan** - deformacija materijala linearno se povećava s povećanjem naprezanja
- Idealno plastičan** - deformacija materijala linearno se povećava pri konstantnom naprezanju
- Viskozni** materijali kada se podvrgnu određenom naprezanju, pružaju otpor posmičnom tečenju i linearno se deformiraju sa vremenom
- Elastični** materijali kada se podvrgnu određenom naprezanju, deformiraju se trenutno i vraćaju se u prvobitni položaj nakon uklanjanja opterećenja
- Plastični** materijali kada se podvrgnu naprezanju koje je iznad njihove čvrstoće počnu se nepovratno, plastično deformirati
- Viskoelastični** materijali posjeduju oba ta svojstva i kad su podvrgnuti naprezanjima, karakteriziraju ih vremenski ovisne deformacije
- Viskoplastičnost** je svojstvo materijala (polimeri, epoksidi, bitumeni, beton i drugi, ali i metali, naročito pri povišenim temperaturama) da iskazuje "neelastično" ponašanje kada ga se izloži promjeni stanja naprezanja. Neelastično ponašanje karakterizira plastična deformacija, što znači da se materijal počinje nepovratno, plastično deformirati kada je izložen razini naprezanja iznad čvrstoće materijala



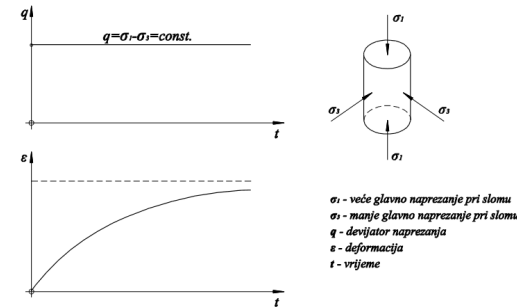
*Karakteristično viskopastično ponašanje*

### DUGOTRAJNO PONASANJE STIJSKE MASE

- zakasniji slom
- bitno je razdvojiti dva pojma:
- **Puzanje** je proces kontinuiranog deformiranja materijala pod konstantnim opterećenjem
- **Dugotrajno deformiranje** je proces kontinuiranog deformiranja stijenske mase oko podzemnog otvora zbog konstantnog naprezanja koje je nastalo nakon preraspodjele naprezanja od iskopa. Tako nastale dugotrajne deformacije su kompleksan rezultat puzanja intaktnje stijene, puzanja mnoštva diskontinuiteta i zakašnjelog razvoja novih pukotina.

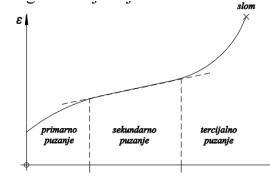
Dugotrajne deformacije se mogu analizirati iz rezultata:

1. Pokusa puzanja – devijatorsko naprezanje je konstantno u vremenu



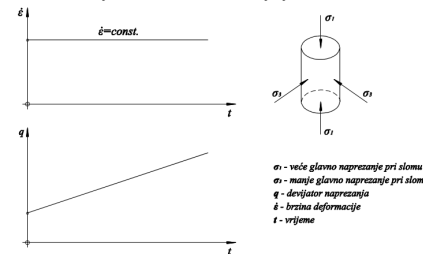
Dijagrami ovisnosti  $\epsilon - t$ ,  $\sigma - t$  za  $q = \sigma_1 - \sigma_3 = \text{const.}$

1. Primarno puzanje – brzina deformacije opada, a dugotrajne deformacije se stabiliziraju tokom vremena,
2. Sekundarno puzanje – brzina deformacije je konstantna,
3. Tercijalno puzanje – brzina deformacije se povećava zbog progresivnog oštećenja stijene



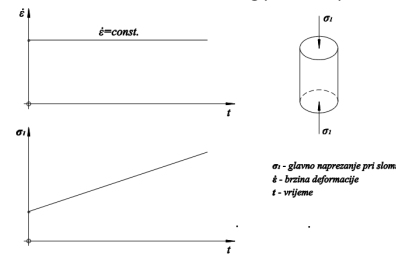
Karakteristična krivulja puzanja

2. Pokusa relaksacije – brzina deformacije je konstantna u vremenu



Dijagrami ovisnosti  $\epsilon - t$ ,  $\sigma - t$  za  $\dot{\epsilon} = \text{const.}$

3. Jednoosno monotono-kvazistatičnog pokusa u preši – opterećenje pri vrlo malim brzinama deformacije



Dijagrami ovisnosti  $\epsilon - t$ ,  $\sigma - t$  za  $\dot{\epsilon} = \text{const.}$

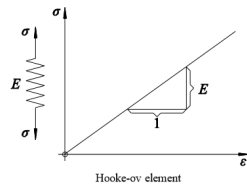
Osnovni elementi reoloških modela:

1. Hooke-ov element

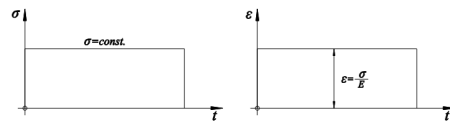
Mehanički model simboliziran je Hooke-ovom idealno-elastičnom oprugom. Ponašanje opruge je definirano linearnim, jednodimenzionalnim Hooke-ovim zakonom, koji kaže da je deformacija opruge proporcionalna primjenjenom opterećenju. Za idealno elastično tijelo pretpostavlja se da deformacija nastupa trenutno i to u konačnom iznosu, te se nakon uklanjanja opterećenja tijelo vraća u prvobitno položaj

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$\sigma$  [N/m<sup>2</sup>] – naprezanje  
 $E$  [N/m<sup>2</sup>] – Young-ov modul elastičnosti  
 $\varepsilon$  [%] – osna deformacija



Hooke-ov element



Dijagrami ovisnosti  $\sigma - t$  i  $\varepsilon - t$

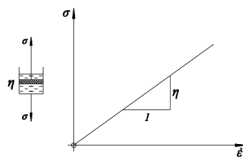
Tijela (stijene) sa takvim osobinama nazivamo "Hooke-ovim tijelima" i obilježavamo ih sa "H".

## 2. Newton-ov element

Mehanički model simboliziran je Newton-ovim tijelom ili prigušivačem kojeg karakterizira svojstvo idealne viskoznosti i obilježava se oznakom "N". Ponašanje prigušivača je određeno jednodimenzionalnim Newtonovim linearnim zakonom koji kaže da je brzina deformacije proporcionalna primjenjenom opterećenju.

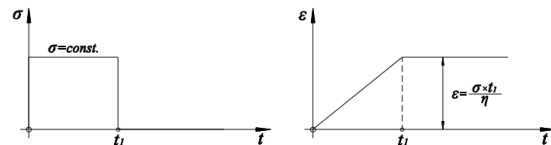
$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta} \Rightarrow \varepsilon(t) = \frac{\sigma \cdot t}{\eta}$$

$\sigma$  [N/m<sup>2</sup>] – naprezanje  
 $\eta$  [N·s/m<sup>2</sup>] – dinamička viskoznost  
 $\dot{\varepsilon}$  [%/s] – brzina deformacije odnosno prva derivacija deformacije



Newtonov element

Ponašanje elementa određeno je viskoznošću „ $\eta$ “, kojom se definira otpor materije tijekom promjene naprezanja. Taj otpor je proporcionalan djelovanju unutrašnjeg trenja. Nakon rasterećenja elementa ostaje trajna (nepovratna) deformacija.

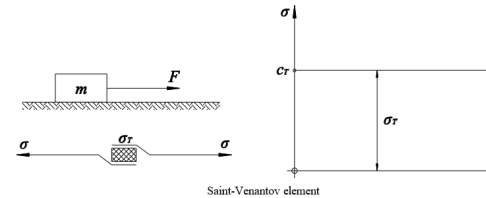


Dijagrami ovisnosti  $\sigma - t$  i  $\varepsilon - t$

Materijale idealno viskoznih osobina nazivamo "Newton-ovim tijelima" i obilježavamo ih oznakom "N".

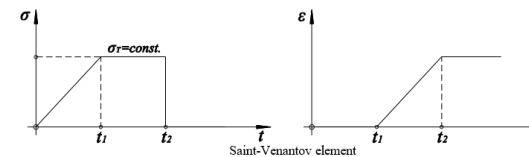
## 3. Saint-Venant-ov element

Saint Venant je predložio model idealno kruto-plastičnog materijala, koji ima svojstvo da ne pokazuje nikakve deformacije  $\varepsilon$  dok vrijednost naprezanja  $\sigma$  ne dosegne izvjesnu kritičnu vrijednost. Mehanički model simboliziran je klizačem, a njegovo ponašanje se opisuje situacijom u kojoj na tijelo mase "m" djeluje silom F, a nalazi se na hrapavoj, horizontalnoj površini.



Saint-Venantov element

Sve dok je primjenjeno naprezanje manje od granične sile trenja, tijelo je nepomično. Prekoračenjem granične sile trenja tijelo se počne gibati, odnosno plastično deformirati pri konstantnom naprezanju. Materijali koji imaju takve osobine se nazivaju "idealno plastičnima", pri čemu nakon rasterećenja ostaje trajna (nepovratna) deformacija.



Saint-Venantov element

Materijale idealno plastičnih osobina nazivamo "St. Venant-ovim tijelima" i obilježavamo ih oznakom "St. V".

Složeni reološki modeli (visko-elasto-plastični modeli)

- složeni reoloski modeli dobijaju se kombinacijom reoloskih elemenata koji se mogu slagati **serijski** (opisane pojave događaju se jedna za drugom) i **paralelno** (opisane pojave događaju se istovremeno)

H = Hooke-ovo tijelo

N = Newton-ovo tijelo

St. V = Saint-Venant-ovo tijelo

— serijska veza

| | paralelna veza

- Kelvin-Voigt-ov model (K) - K = H | | N
- Maxwell-ov model (M) - M = H — N
- Bingham-ov model (B) - B = St.V | | N
- Loonen-ov model
- Generalizirani Kelvin-ov model
- Generalizirani Maxwell-ov model
- Burgers-ov visko-elastični model
- Burgers-ov visko-plastični model