

**Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet**

Preddiplomski studij

GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

1. predavanje

Uvod u mehaniku stijena i stijensko inženjerstvo

1	Uvod u mehaniku stijena i stijensko inženjerstvo
2	Stanje naprezanja i deformacija u stijenskoj masi
3	Laboratorijski istražni radovi
4	Terenski istražni radovi
5	Klasifikacije stijenske mase
6	Čvrstoća stijenske mase
7	Čvrstoća diskontinuiteta
8	Krutost stijenske mase
9	Temeljenje na stijeni
10	Stabilnost stijenskih pokosa
11	Stabilnost stijenskih odrona
12	Ojačanje stijenske mase štapnim sidrima
13	Tunelogradnja
14	Reologija stijenskog materijala



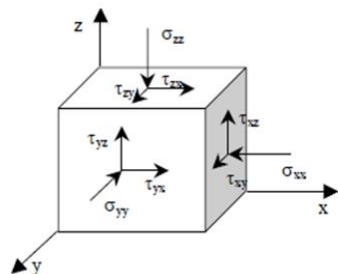
Tunel Pećine u Rijeci



U REDU SU KOMPONENTE KOJE
DJELOUJU NA ISTOJ RAVNINI

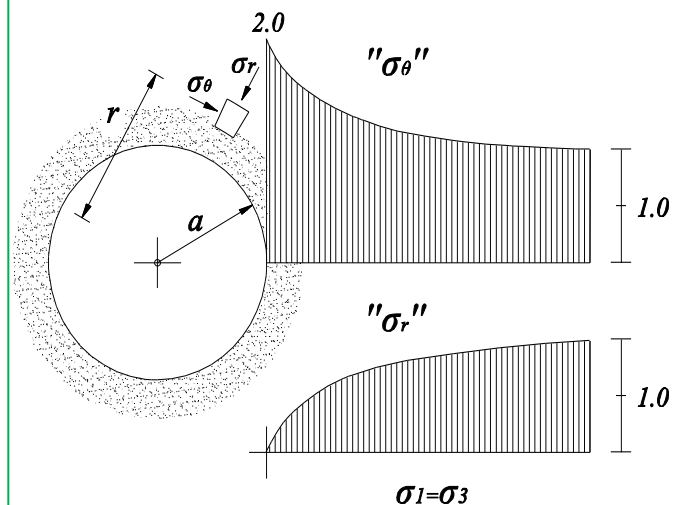
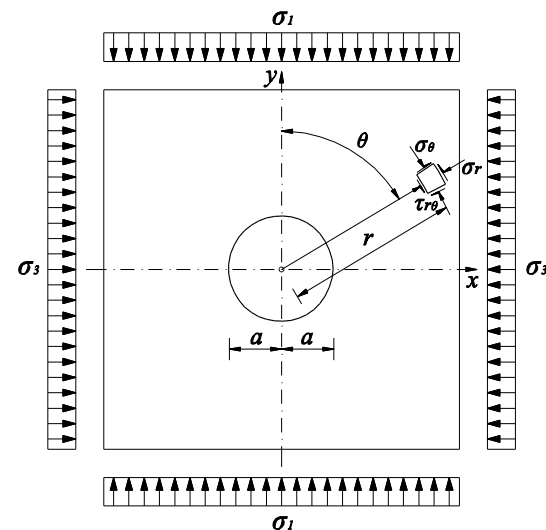
σ_{xx}	τ_{xy}	τ_{xz}
τ_{yx}	σ_{yy}	τ_{yz}
τ_{zx}	τ_{zy}	σ_{zz}

U STUPCU SU KOMPONENTE KOJE
DJELOUJU DUŽ ISTE OSI

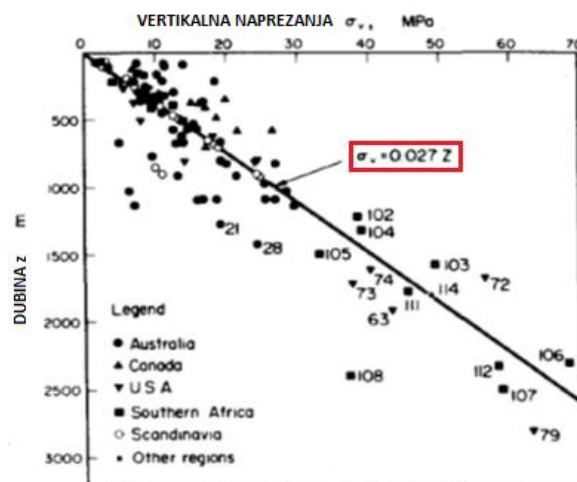
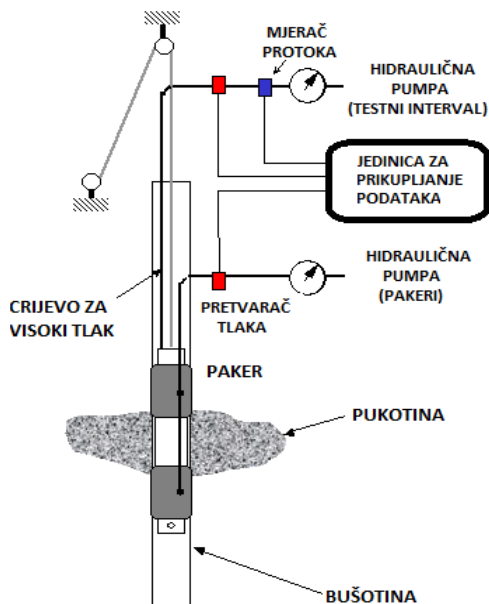


- TENZORI
I TRANSFORMACIJE
NAPREZANJA I
DEFORMACIJA
- GLAVNA
NAPREZANJA I
DEFORMACIJE
- MOHROVE KRUŽNICE

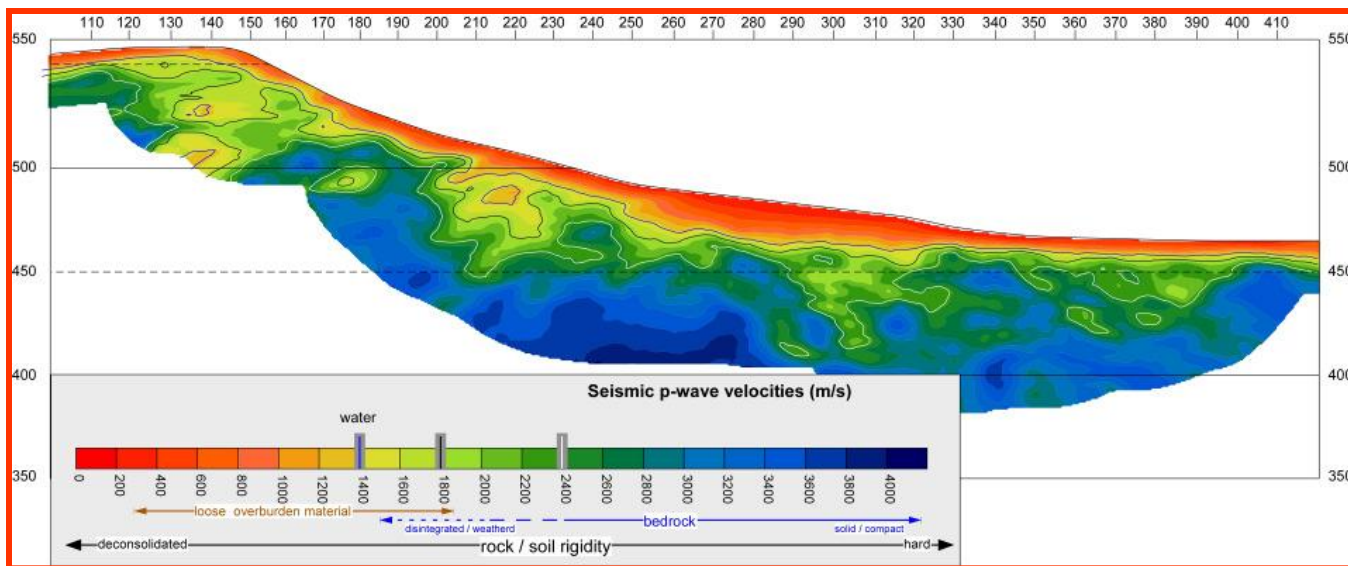
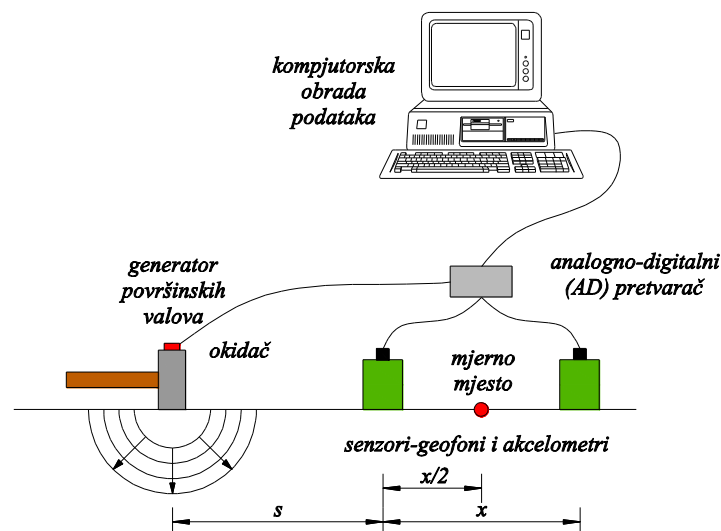
ANALIZA SEKUNDARNOG STANJA NAPREZANJA



MJERENJA PRIMARNOG STANJA NAPREZANJA







Terzaghijeva
klasifikacija (1946)

Laufferova klasifikacija
(1958)

Modificirana
Laufferova klasifikacija
(1974)

RQD (1967)

RSR (1972)

RMR (1989)

Q (1974)

RMi (1995)

GSI (1997)

A. Klasifikacijski parametri i njihovi bodovi									
Parametri			Vrijednosti parametara						
1	Čvrstoća intaktna stijene (MPa)	Indeks čvrstoće u točki	>10	4-10	2-4	1-2	Preporuča se ispitati jednoosnu tlačnu č.		
		Jednoosna tlačna čvrstoća	250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
		Bodovi	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
		Bodovi	20	17	13	8	3		
3	Razmak diskontinuiteta		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
		Bodovi	20	15	10	8	5		
4	Stanje diskontinuiteta (vidi E)	Vrlo hrapave površine		Nemamo hrapave površine		Nemamo hrapave površine		Slični ili ispuca<5 mm debljine	
		Nisu kontinuirani		Zijev<1 mm		Zijev<1 mm		ili	
		Zijev=0 mm		Stijena u zidovima nemamo rastresena		Stijena u zidovima jako rastresena		Zijev>5 mm	
		Zidovi nisu rastreseni				Kontinuirani		Kontinuirani	
Bodovi			30	22	13	6	0		
5	Podzemna voda	Dotok na 10 m dužine tunela (l/s)	nema	<10	10-25	25-125	>125		
		Odnos tlaka pukotinske vode i većeg glavnog naprezanja	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Općeniti uvjeti	kom pletno suho	vlažno	mokro	kapanje	tečenje		
		Bodovi	15	10	7	4	0		
B. Korekcija bodova s obzirom na orijentaciju diskontinuiteta (vidi F)									
Orijentacija diskontinuiteta			Vrlo povoljna	Povoljna	Dobra	Nepovoljna	Vrlo nepovoljna		
Bodovi	Tuneli i rudnici		0	-2	-5	-10	-12		
	Temelji		0	-2	-7	-15	-25		
	Kosine		0	-5	-25	-50	-60		
C. KATEGORIZACIJA STIJENSKE MASE NA OSNOVI UKUPNOG BROJA BODOVA									
Ukupni bodovi			100-81	80-61	60-41	40-21	<21		
Oznaka kategorije			I	II	III	IV	V		
Opis			VRLO DOBRA STIJENA	DOBRA STIJENA	POVOLJNA STIJENA	SLABA STIJENA	VRLO SLABA STIJENA		
D. ZNAČENJE POJEDINIH KATEGORIJA									
Ukupni bodovi									
Oznaka kategorije			I	II	III	IV	V		
Srednje vrijeme			20godina za 15 m raspona	1 godina za 10 m raspona	1 tjedan za 5 m raspona	10 sati za 2,5 m raspona	30 min za 1 m raspona		
Kohezija stijenske mase (kPa)			>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Kut trenja (stupnjevi)			>45	35-45	25-35	15-25	<15		

Coulomb (1776)

Griffith(1921, 1925)

Modificirani Griffith (1962)

Murrel (1965)

Hobs (1966)

Hoek (1968)

Bieniawski (1974)

Originalni Hoek-Brown (1980)

Ramamurthy (1985)

Pan i Hudson (1988)

Unaprijeđeni Hoek-Brown (1988)

Yoshida, Morgenstern i Chan (1990)

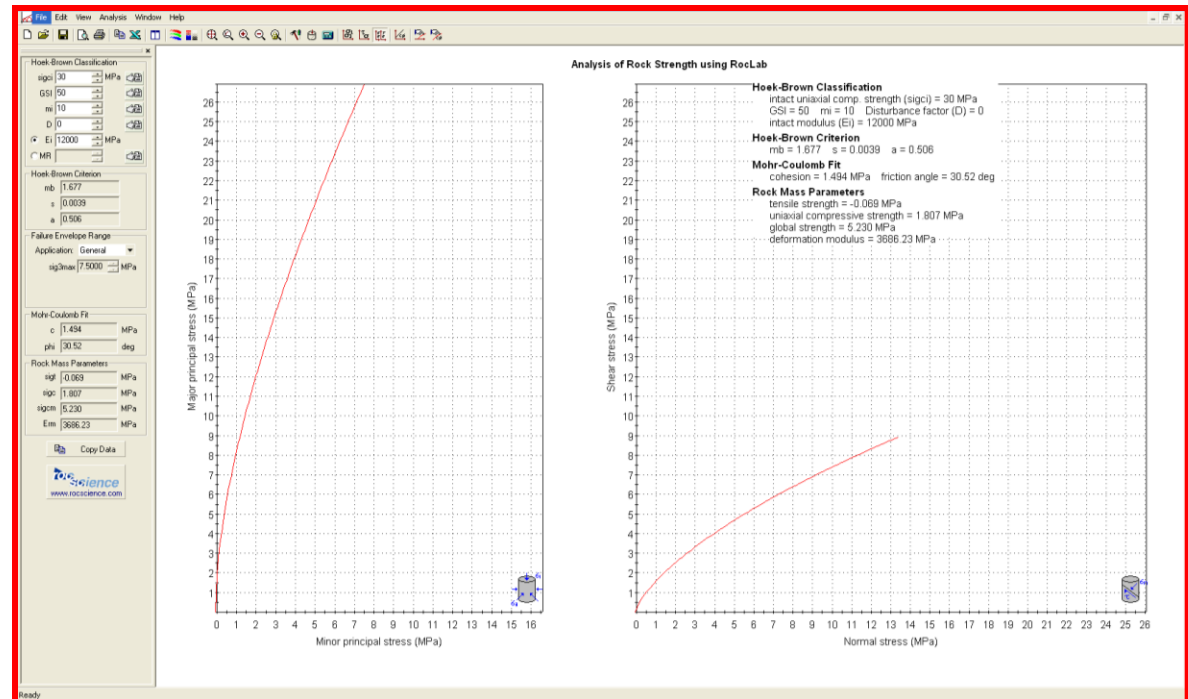
Modificirani Hoek-Brown (1992)

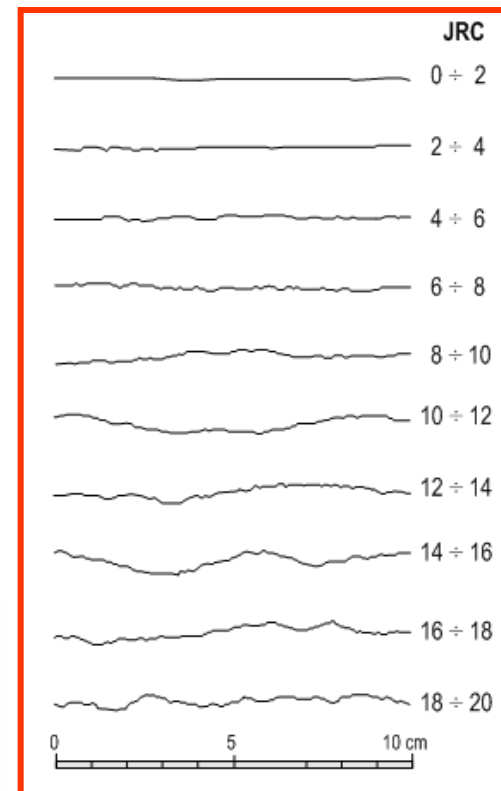
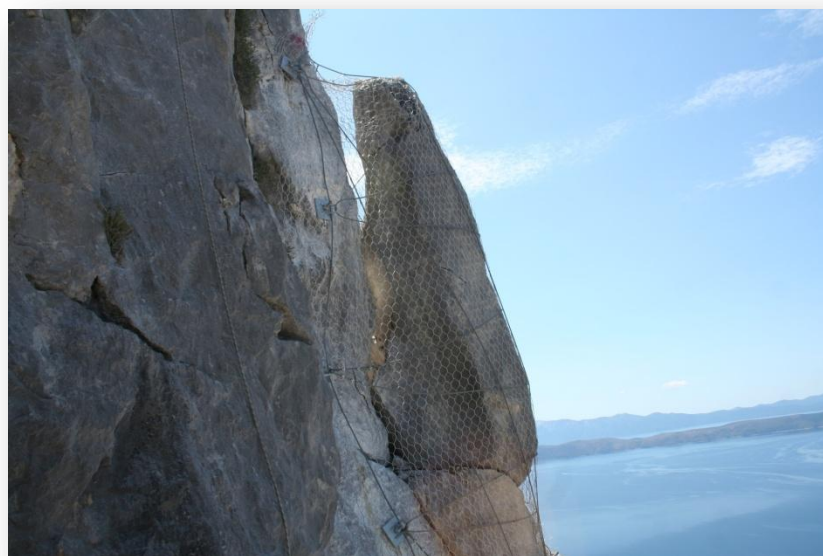
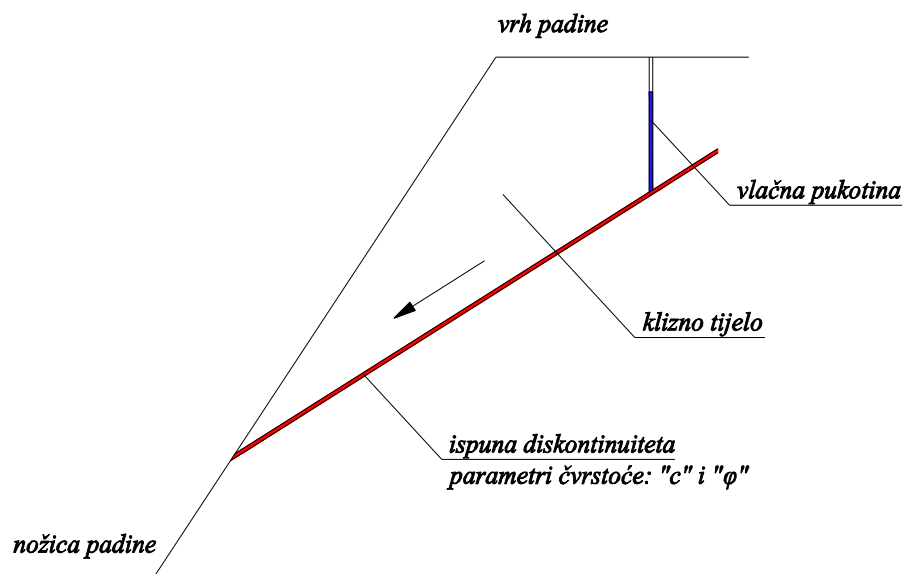
Opći Hoek-Brown (1995)

Hoek, Carranza-Torres i Corkum (2002)

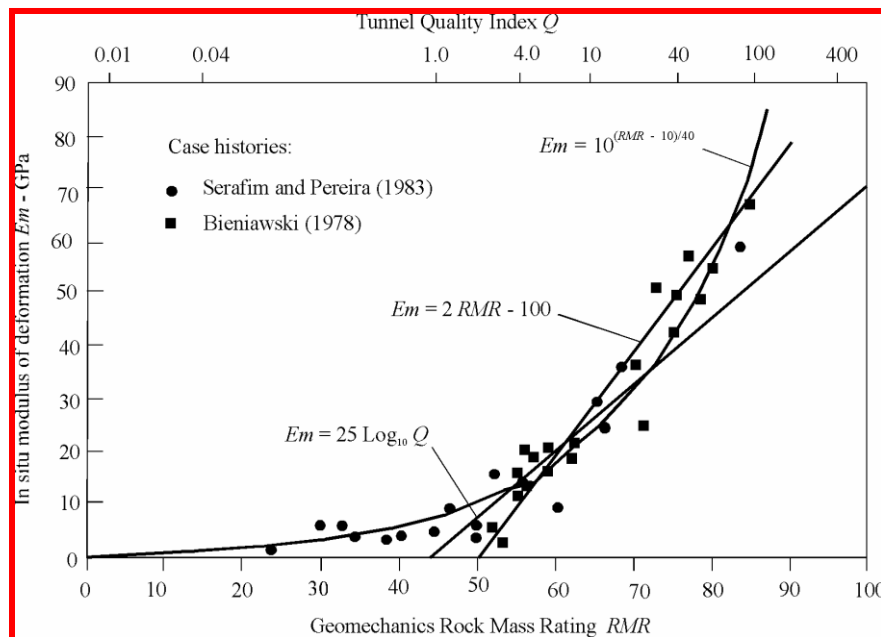
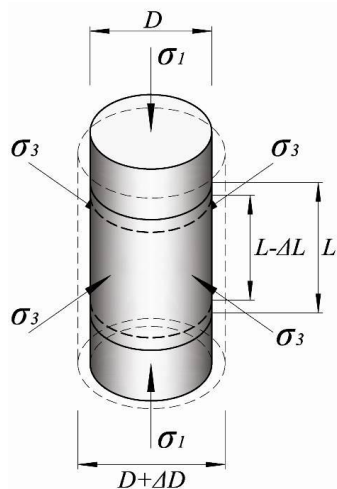
$$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3)$$

Rocscience Inc., Roclab,
www.rocscience.com



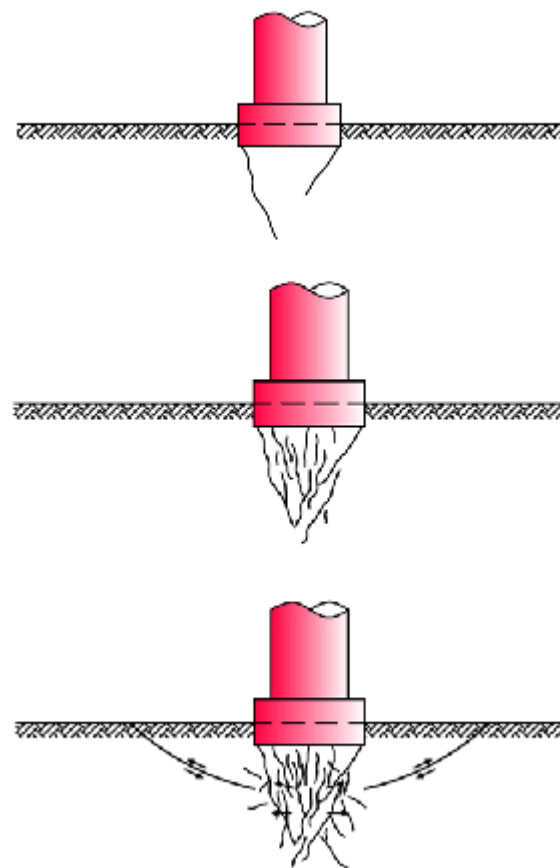
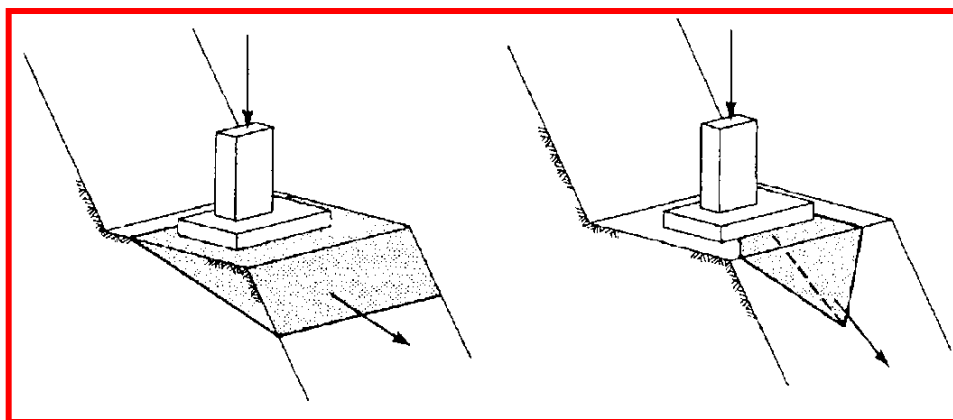
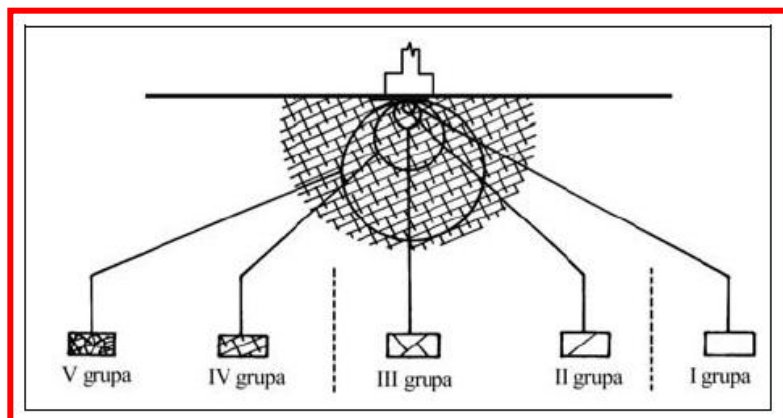


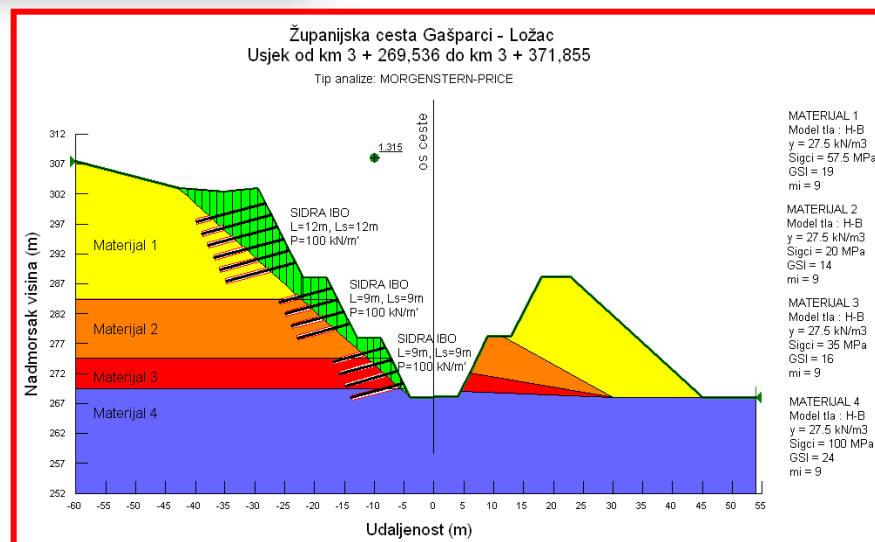
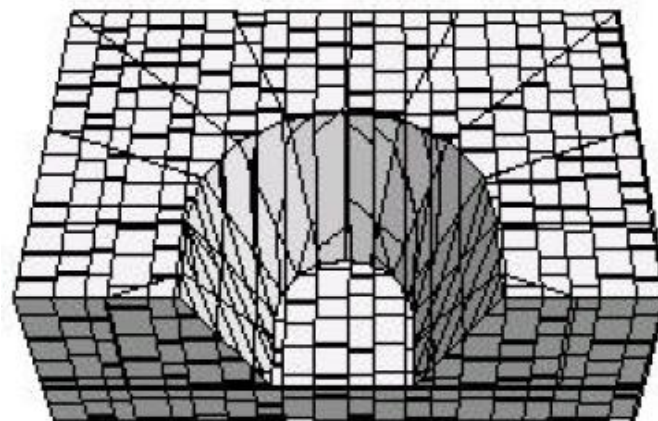
- Laboratorijska ispitivanja krutosti
- Terenska ispitivanja krutosti
- Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

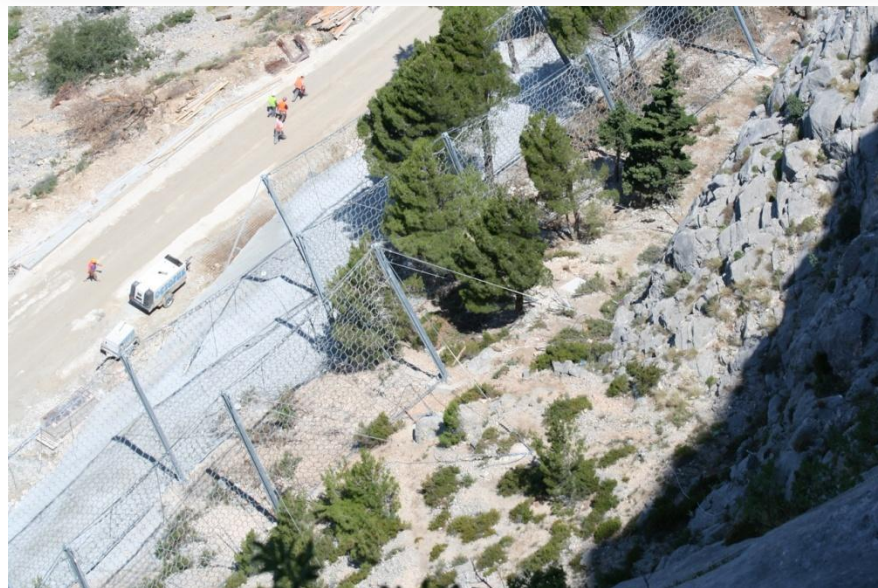
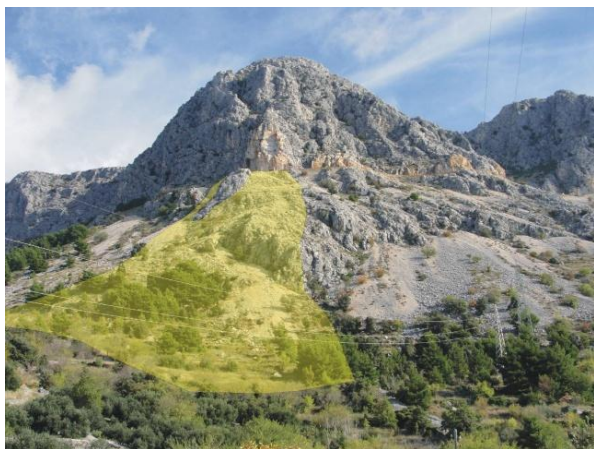
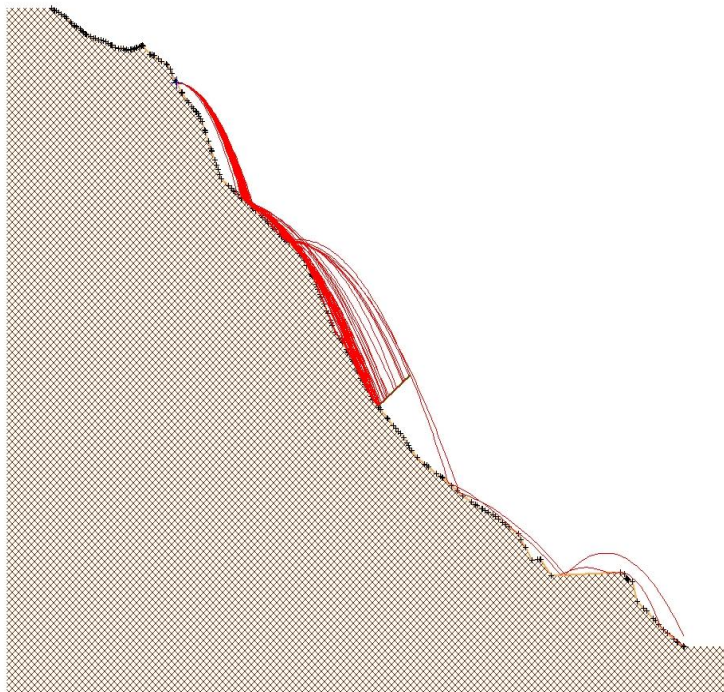


- Krutost stijena u kršu Hrvatske

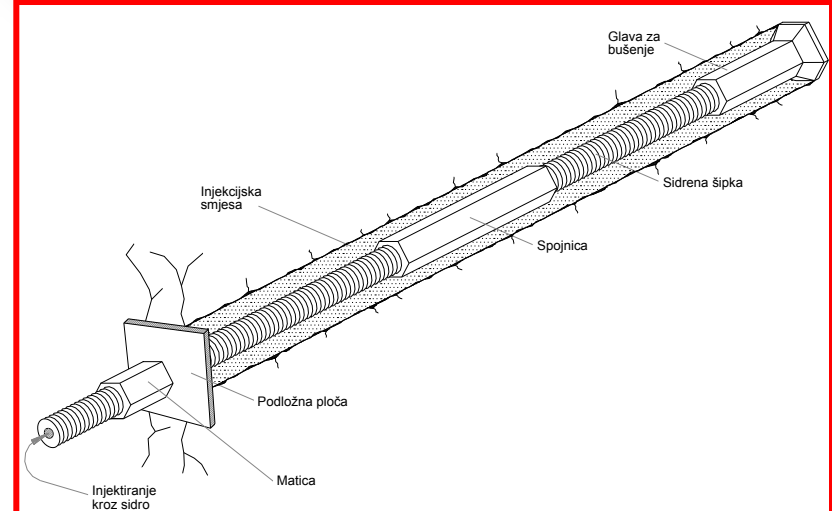
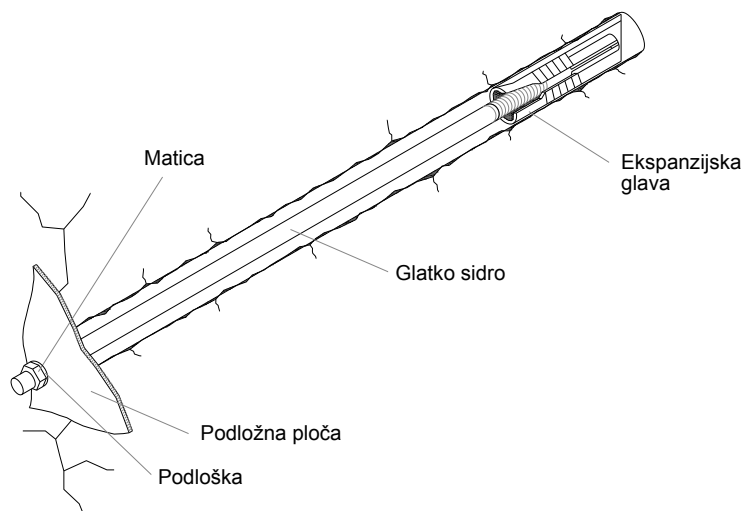
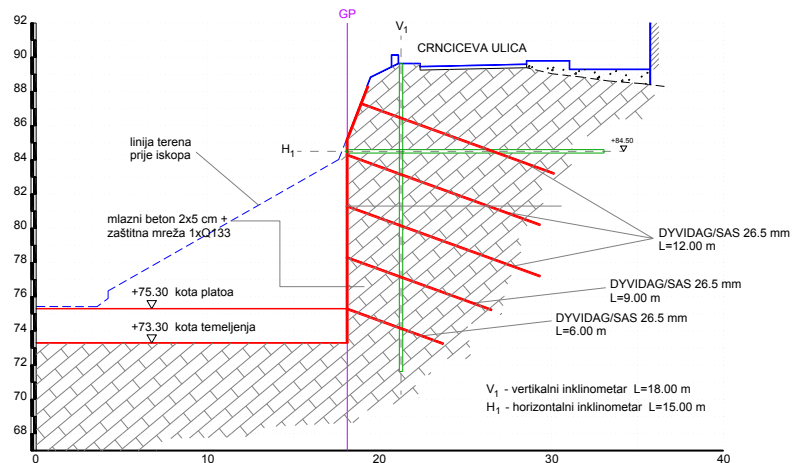
$$E_m = I K_s \cdot GSI^2 \cdot V_p^2$$

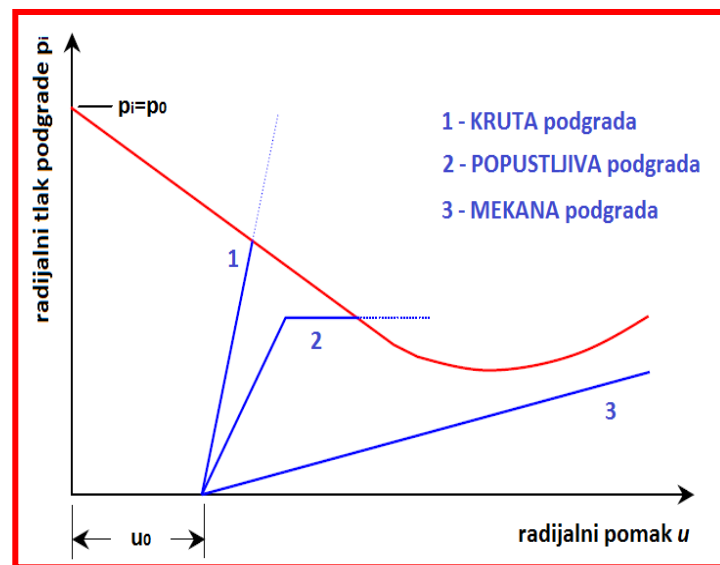
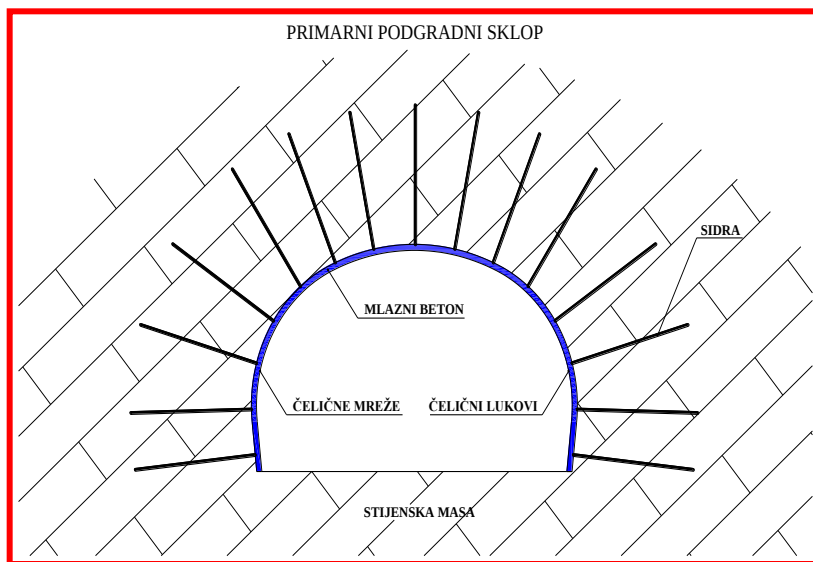


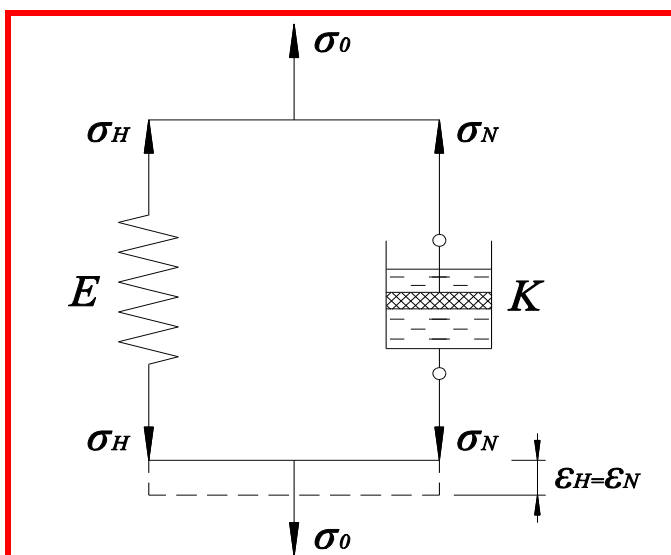
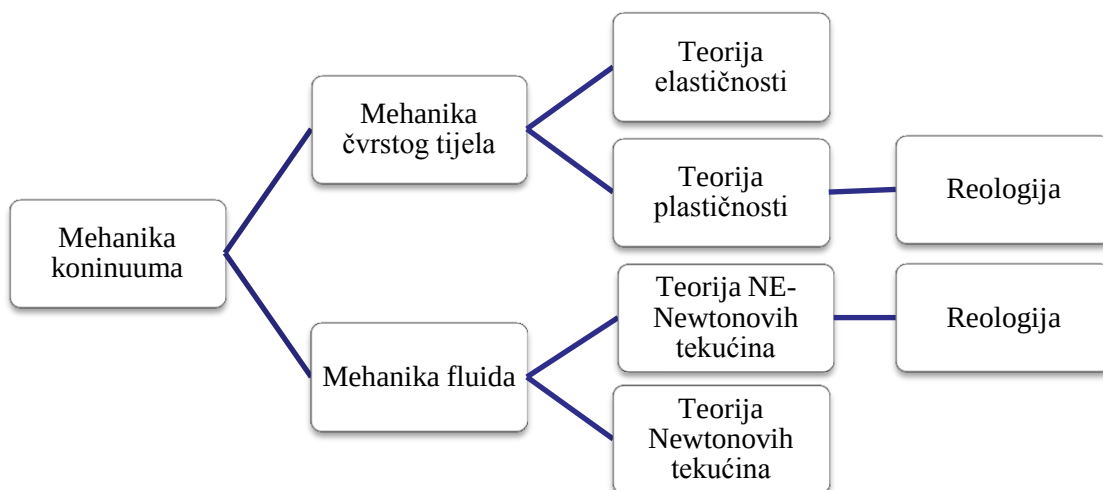




POPREČNI PRESJEK B-B'



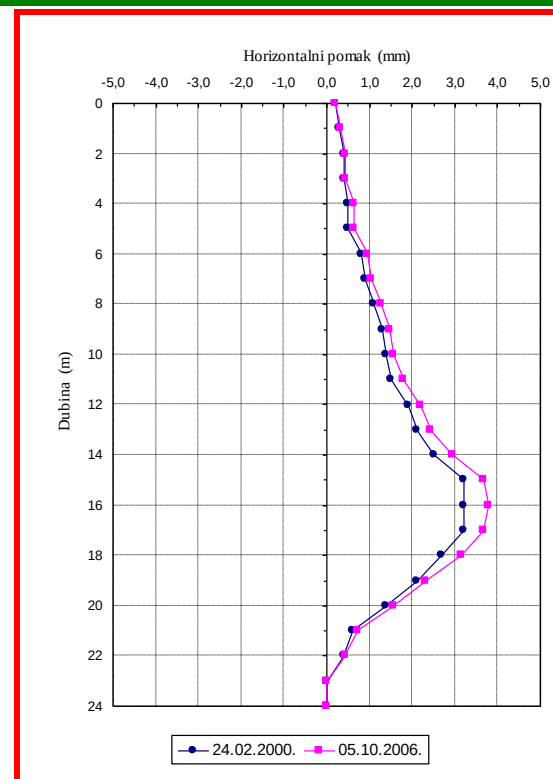




Kelvinov model

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon + K \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E}{K} \cdot t} \right]$$



Tunel Pod Vugleš



- Razvoj mehanike stijena
- Osnovni pojmovi
- Razlike između tla i stijena
- Stijene u Hrvatskoj – krš
- Osnovna fizičko-strukturna svojstva

- **Kameno doba** – izrada oružja i oruđa neophodnih za život, dobivanje korisnih minerala iz zemljine kore i podzemno rudarenje ne temelju intuicije i iskustva.
- **Brončano doba** – počeci tunelogradnje za potrebe rudnika bakra.



Great Orme, rudnik bakra

- **Antičko doba** – tuneli za dopremanje vode, podzemne prolaze, grobnice, vojne potrebe i dr.

- **Renesansa** – Georgius Agricola u djelu “De Re Metalurgija” 1556. na temelju dotadašnjih spoznaja opisao metode izvođenja podzemnih radova u rudnicima.
- **XVII. – XIX. stoljeće** – Pronalazak baruta (1612.), nitroglicerina (1847.) i bušaćeg čekića (1861.) oživljava radove na izradi tunela.
- **Prijelaz iz XIX. U XX. stoljeće** – formiranje mehanike stijena kao znanstvene discipline kroz djela Alberta Heima: “Mechanismus der Gebirgsbildung” 1878. i “Geologische Nachlese” 1905. u kojima je uočio i formulirao razliku između stijenske mase i molitine stijene te ukazao na mogući hidrostatski karakter primarnog stanja naprezanja.
- **Nakon 2. svjetskog rata** – brzi razvoj mehanike stijena kao znanstvene discipline potaknut je izgradnjom velikih hidroelektrana, visokih brana, cestovnih i hidrotehničkih tunela, velikih podzemnih hala i dr.

- **1960.** – mehanika stijena priznata kao znanstvena disciplina

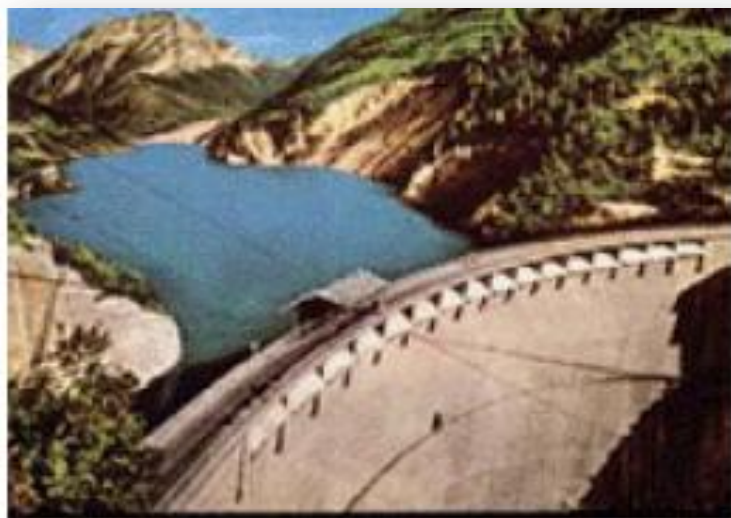
Dolazi do općeg razvoja mehanike stijena diljem svijeta zbog nekoliko katastrofa:

- Prosinac 1959. – popuštanje temelja betonske lučne brane Malpaseet u Francuskoj što je rezultiralo poplavom koja je odnijela približno 450 ljudskih života
- 1960. – Coalbrook, Južna Afrika – urušavanje rudnika ugljena pri čemu je život izgubilo 432 ljudi što je potaklo osnivanje intenzivnih razvojnih programa

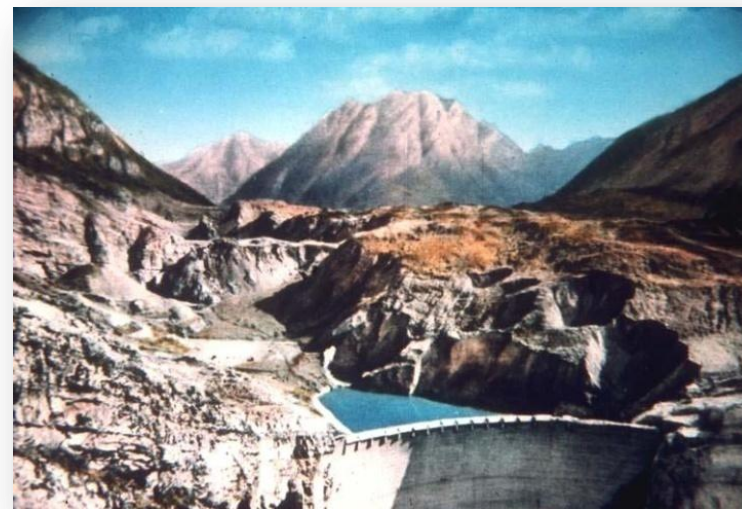


Brana Malpaseet

- Listopad 1963. – cca 268 000 000 m³ stijenske mase otklizilo je u akumulaciju što je uzrokovalo ogromni val koji je prešao preko visoke brane Vajont na zapadnom dijelu akumulacije. Iako brana nije oštećena, val je uzrokovao pogibiju 2500 ljudi iz talijanskog grada Langarone smještenog nizvodno.



*Brana Vajont prije
katastrofe*



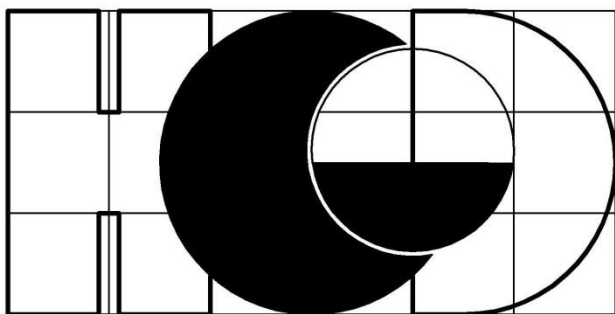
*Brana Vajont poslije
katastrofe*

- **1962.** – osnovano Međunarodno sruštvo za mehaniku stijena (International Society for Rock Mechanics – ISRM).



- **1965.** – početak organiziranog djelovanja hrvatskih znanstvenika na polju mehanike stijena kroz Jugoslovensko društvo za mehaniku stijena i podzemne radove (JDMSPR).
- **1991.** – osnovano Hrvatsko društvo za mehaniku stijena (HDMS).
- **1998.** – HDMS promijenio ime u Hrvatska udruga za mehaniku stijena (HUMS).

- **1999.** – osnovan smjer geotehnika na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.
- **2005.** – Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu na preddiplomski studij uvodi kolegij Mehanika tla i stijena.
- **2006.** – HUMS udružje se sa Hrvatskom udrugom za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo (HUMTGI) u Hrvatsko geotehničko društvo (HGD).
- **2009.** – osnovana Hrvatska udruga za podzemnu gradnju (HUPG).
- **2011.** – Mehanika stijena na prediplomskom studiju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.



- **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.

Mehanika stijena nalazi svoju primjenu u rješavanju mnogih inženjerskih problema od temeljenja brana do rudarstva pa sve do novijih problema koji uključuju iskorištavanje geotermalne energije ili odlaganje nuklearnog otpada.



Yosemite, SAD

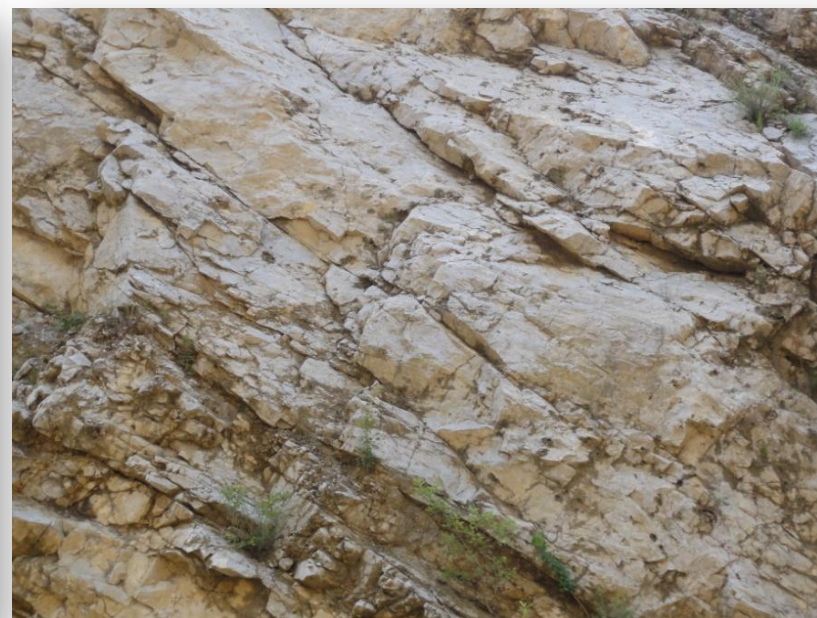
Kjeragbolten, Norveška



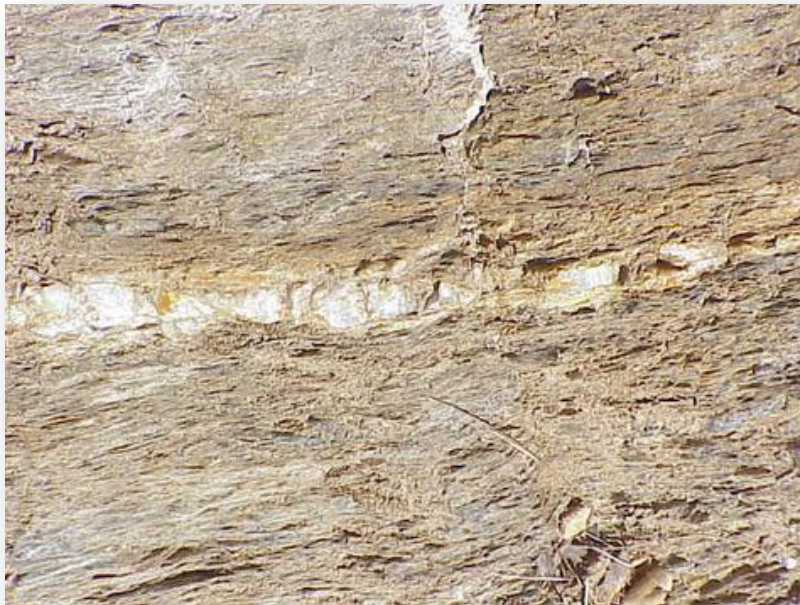
- **Stijenska masa** – prirodna geološka formacija čvrste stijene sa svim svojim oslabljenjima odnosno diskontinuitetima.
- **Monolitni uzorak stijene** – (‘intact rock’) izvađeni dio stijenske mase koji se koristi za utvrđivanje mehaničkih svojstava stijene.



- **Rasjed** – ('fault') zdrobljena zona uzduž koje je vidljiv pomak reda veličine nekoliko centimetara do nekoliko kilometara.
- **Pukotina** – ('joint') lom u geološkoj formaciji uzduž kojeg nije došlo do vidljivog pomaka. Može biti zatvorena, otvorena, ispunjena i neispunjena.



- **Prslina** – (‘fissure’) 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. To je zajednički naziv za rasjede, pukotine i prsline.



➤ Geološka starost

Stijene su redovito geološki starije formacije, a tla su znatno mlađa.

➤ Čvrstoća i deformabilnost

Čvrstoća tla je vrlo mala u odnosu na čvrstoću stijene. Stijenama se mogu smatrati materijali koji imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću veću od 1 MPa.

Deformabilnost tla je vrlo velika u odnosu na deformabilnost stijene.

➤ Sadržaj vlage

Mehaničke osobine kod koherentnih tala jako ovise o sadržaju vlage dok je to kod stijena relativno rijedak slučaj.

➤ Razlomljenost

Najvažnija razlika u polaznim postavkama mehanike tla i mehanike stijena. Dok se mehanika tla zasniva na mehanici kontinuuma, mehanika stijena bi se trebala zasnivati na mehanici diskontinuuma.

➤ Primarno stanje naprezanja

Radovi u tlu izvode se na ili blizu površine pa su primarna naprezanja relativno mala u odnosu na dodatna naprezanja izazvana građenjem. Kod stijena, posebno kod podzemnih građevina je obrnuto.

U tlu vlada relativno jednostavno primarno stanje naprezanja izazvano gravitacijom. U stijenama, posebno na velikim dubinama, vlada vrlo složeno primarno stanje naprezanja na koje, osim gravitacije, imaju utjecaja tektonika i erozija.



- U Hrvatskoj se krš pruža od Slovenije na sjeverozapadu do Crne Gore na jugoistoku dok mu sjeverna granica ide južno od Karlovca prema istoku gdje prelazi u Bosnu i Hercegovinu.
- Krš u Hrvatskoj zauzima 52 % njezine kopnene površine, a ako se uzme u obzir i hrvatsko Jadransko podmorje čak i preko 70 %



Bijele stijene, Velebit



Biokovo

- Karbonatne stijene, za koje su najčešće vezani krški prostori prostiru se na oko 30 milijuna km² ili na oko 20% ukupne svjetske kopnene površine.
- U svijetu se izdvaja nekoliko različitih tipova krša
 - **TROPSKI KRŠ** u područjima toplih i vlažnih klima (Indokina, Kina, Nova Gvineja, Malezija, Brazil itd.) – ističe se brзом korozijom i oblicima s naglašenim vodoravnim razvojem te prostranim podzemnim oblicima
 - **POLARNI KRŠ** u hladnim područjima u kojima snijeg i led ubrzavaju procese raspadanja (Kanada, Ural i sl.)
 - Poseban tip krša razvijen u slojevima evaporita i gipsa (Ukrajina) – karakteriziraju ga veliki speleološki objekti
 - **KRŠ UMJERENIH ŠIRINA** (Dinaridi, Alpe, Pirineji, gorje Australije i sl.) – ističe se debelim (i do 8 km) karbonatnim mezozojskim i paleogenskim sedimentima, što uz naglašenu tektonsku razlomljenost utječe na podjednaku zastupljenost horizontalnih i vertikalnih oblika – ovom području pripada i hrvatsko krško područje tzv. Dinarski krš.

- **Dinarski krš** je prostor krša koji se širi od Alpa u Italiji preko Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine i Crne Gore te završava u Albaniji kod rijeke Drima. Naziv je dobio prema planiskom lancu Dinarida koji se pruža u pravcu SZ-JI, a nosi ime prema planini Dinari koja se približno nalazi u njegovu središtu. Sastavljen je uglavnom od karbonatnih stijena.



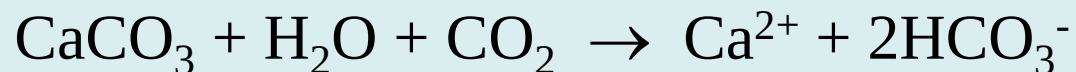
*Planina Dinara
Sinjal 1831 m - najviši
vrh Hrvatske*

- **Krš** je teren uglavnom pokriven vapnencem i dolomitom čija je topografija pretežno oblikovana od topivih stijena.
- Na takvom terenu javljaju se ponori, rijeke ponornice, zatvorene depresije, podpovršinsko dreniranje vode i špilje.
- Pojam krš uključuje morfološke i hidrološke oblike u topivim, pretežno karbonatnim stijenama.
 - Morfološki oblici uključuju škrape, doline, jame, ponore, uvale, polja, špilje, kaverne i sl.
 - Hidrološki oblici uključuju slivove s brzim dreniranjem, rijeke ponornice, estavele, ulazne izvore (vokliške), podmorske izvore (vrulje), manje ili više razdvojene vododjelnice.
- Krš je rezultat prirodnih procesa na i u kori Zemlje uzrokovan otapanjem i ispiranjem vapnenca, dolomita, gipsa, halita i drugih topivih stijena.

- Krš se razvija u topivim stijenama gdje voda dugi niz godina, uz pomoć ugljičnog dioksida, 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.
- Otjecanje površinske vode u okršeno podzemlje i bezvodnost na površini glavne su značajke svih krških prostora.
- Velika površina i velika debljina krša zaslužni su za bogatstvo površinskih i podzemnih oblika reljefa i drugih pojava u hrvatskom kršu.
- Proces okršavanja nastavlja se u karbonatnim naslagama po zakonu sile teže sve do postojeće vodonepropusne barijere, odnosno do pojave klastičnih sedimenata ili gromadasto-kompaktnih i tektonski neporemećenih slojeva.

- Vapnenci se sastoje od karbonatnih minerala: kalcita, magnezijevog kalcita i rjeđe argonita.
- Dolomitični vapnenci izgrađeni su od kalcita i dolomita, a dolomiti od minerala dolomita. Postoje svi oblici od vapnenca do dolomita. Vapnoviti lapori i laporoviti vapnenci razlikuju se prema postotku karbonatnih minerala u ukupnoj masi. Vapnencima se smatraju stijene koje sadrže preko 90 % karbonatnih minerala.

- Proces otapanja karbonatnih vapnenačkih stijena, okršavanje ili karstifikacija, zove se još i **korozija vapnenca**. Kemijska jednažba korozije vapnenca glasi:



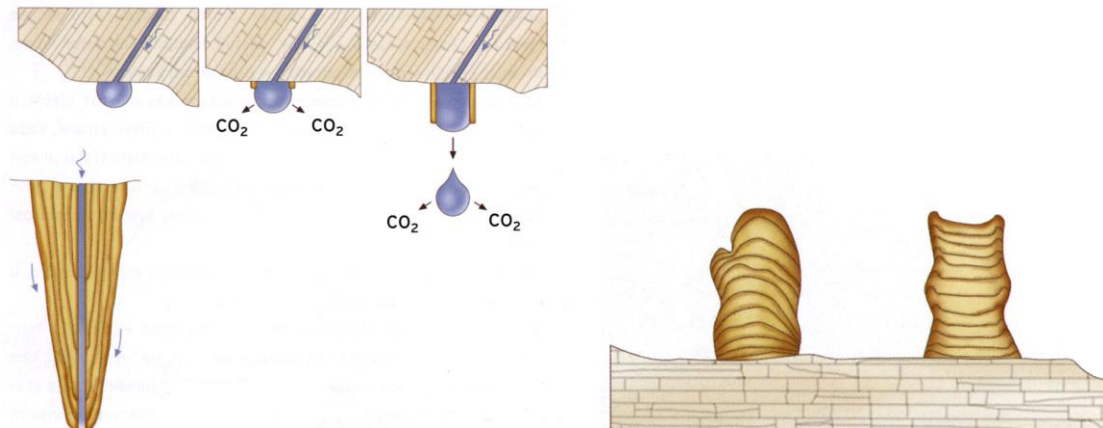
- Kalcijev karbonat, odnosno kalcit (CaCO_3) iz vapnenca se, u dodiru s vodom (H_2O) i ugljik-dioksidom (CO_2), raspada na ione kalcija (Ca^{2+}) i hidrogen-karbonata (HCO_3^-). Na taj način tope se karbonatne stijene. U geološkoj budućnosti uz postojeće klimatske uvjete, svi vapnenci će se prije ili kasnije otopiti.
- Na koroziju vapnenca utječu: topivost pojedinih minerala koji čine stijenu, postojanje inicijalnog pukotinskog sustava i klimatske karakteristike.

- U kršu, pod određenim okolnostima, dolazi do obrnutog procesa, odnosno **taloženja karbonata**.



- Kada voda koja sadrži ione Ca^{2+} i HCO_3^- dođe do špilje ispunjene zrakom ulazi u okoliš drugačije temperature, tlaka i vlage što uzrokuje izmjenu ugljikovog dioksida ili isparavanje te kristalizaciju kalcita. Izmjena CO_2 je najčešći mehanizam taloženja siga (stalaktita i stalgmita) u većini špilja odnosno sedre (tufa ili tavertina) na krškim rijekama.

- Sadržaj CO_2 u zraku dobro zračenih špilja je čak oko 10 puta viši nego u atmosferi. Međutim, pukotinske podzemne vode koje s površine prodiru kroz stijenski nadsloj i dopijevaju do špiljskog prostora, imaju čak 25 do 250 puta višu koncentraciju CO_2 nego što je ima zrak u špilji. Zbog toga kada voda dopiye u špilju, CO_2 izlazi iz nje sve dok se ne uravnoteži s koncentracijom CO_2 u zraku špilje. Pri tome dolazi do kristalizacije kalcita odnosno stvaranja siga. Isparavanjem podzemne vode pri ulasku u špilju otopina postaje prezasićena i kristalizira kalcit.



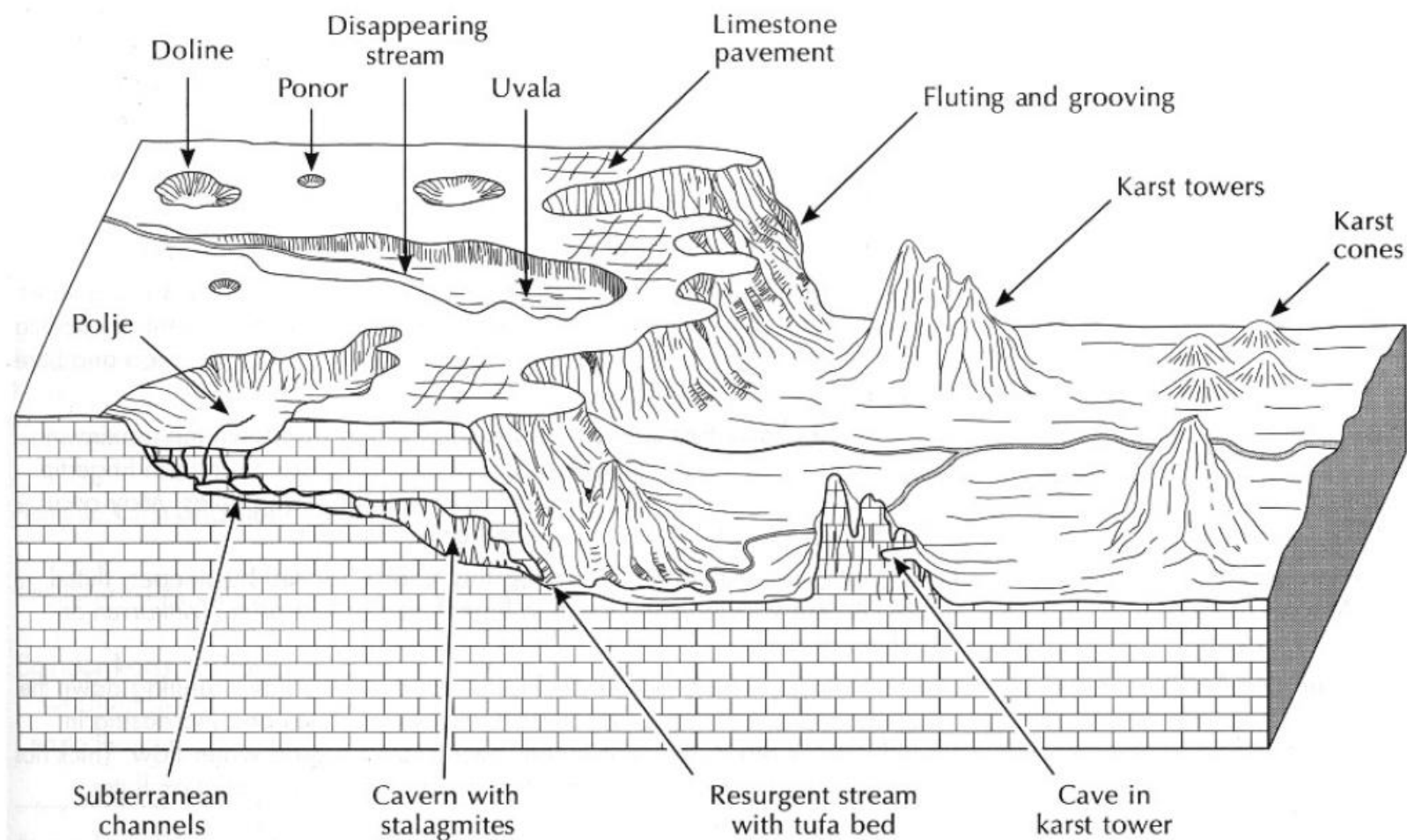
- Postojanje i svojstva šupljina u topivim stijenama, osnovni su preduvjet za nastanak i razvoj krša, ali i za kretanje i skladištenje vode u kršu. Krški tereni brzo gube vodu u podzemlju zbog čega su siromašni površinskim, a bogati podzemnim vodama. Da bi voda mogla cirkulirati kroz krš i otapati ga potrebna je tektonska razlomljenost stijene. S vremenom se poroznost odnosno broj i dimenzije pukotina povećava zbog kemijskog, ali i fizičkog djelovanja vode.
- Bitan utjecaj na propusnost krškog masiva imaju međusobna povezanost šupljina, poroznost i međuslojne pukotine. Za kretanje i skladištenje vode međusobna povezanost šupljina ima ključno značenje.

- Šupljine u kršu svrstavaju se prema poroznosti u ***tri skupine*** :
 - ✓ PRIMARNU
 - ✓ SEKUNDRANU
 - ✓ TERCIJARNU

Primarna poroznost se odnosi na međuzrnate šupljine koje malo pridonose cirkulaciji podzemne vode, a značajnije za njeno skladištenje. Voda se iz njih postepeno oslobađa te taj dio krškog vodonosnika sporo reagira na prihranjivanje intenzivnim oborinama.

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 stvarajući veće vršne protoke kod hidrograma krških izvora koji se prihranjuju iz vodonosnika u kojem se one nalaze.

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, osim u nekim lokalnim slučajevima, nije bitna.





- Ponornice
- Ponori
- Izvori (vrela)
- Estavele
- Vrulje

- **Ponornice** su tekućice koje nastaju koncentriranim procjeđivanjem oborinske vode u podzemlje. Najčešće se javljaju u uvjetima kontaktnog krša. Ponornice jakih vrela, kratka toka, sa završnim ponorom kad potpuno nestaju u podzemlju su prave krške rijeke.



Ponornica Gacka

- **Ponori** su veći ili manji otvori na površini u kojima nestaju površinski tokovi odnosno ponornice.
- Do poniranja dolazi zbog različitog stupnja okršenosti i propusnosti podzemlja.

- U početnom dijelu najčešće su vertikalni, a dalje kaskadno odводе podzemne vode do erozijske baze. Konačna erozijska baza je razina mora.
- Mogu biti ponikvasti, pukotinski, aluvijalni, sitasti, spiljski, jamski itd.



Dulin Ponor – ponor rijeke Dobre

- **Izvori** (vrela) su otvori na kopnu gdje voda istječe na površinu.

➤ Nadmorska visina izvora određuje i razinu vodnog lica na izlasku iz vodonosnika, dok hidraulička vodljivost i izdašnost izvora određuju nagib vodnog lica uzvodno od izvora i njegove promjene ovisno o različitim protocima.

➤ Izvori mogu biti silazni, preljevni i uzlazni (arteški).



Izvor Kupe, NP Risnjak – izvor je vezan na rasjedni kontakt između dobro propusnih jurskih vapnenaca, slabo propusnih trijaskih dolomita i nepropusnih paleozojskih škriljavaca

- **Estavele** su mjesta koja za visokih vodostaja imaju funkciju vrela, a za niskih vodostaja funkciju ponora.
- Najčešće se nalaze u rubovima zavalata polja u kršu.
- U sušnom periodu postoji samo izvor na razini mora. Uslijed oborina razina podzemne vode raste pa estavela počinje funkcionirati kao izvor. Nakon prestanka oborina estavela radi kao ponor.



Modro jezero, Imotski

- **Vrulje** su podmorski izvori, a povremeno i obalni ponori.
- Javljaju se u koncentriranim krugovima.
- Uočljiva je vidljiva razlika od površine morske vode.
- Mogu egzistirati pojedinačno ili u skupinama podalje od obale.



*Vrulja Jurlina kod
Zadra*



- Škrape
- Kamenice
- Ponikve
- Uvale
- Polja
- Zaravni
- Humci

- **Škrape** nastaju površinskim otapanjem vodotopljivih karbonatnih stijena. To su žljebovi nastali tečenjem kišnice i vode nastale otapanjem snijega po stijeni.
- Veličina škrapa varira od 1 cm do 10 m, iako katkada dužina može biti i veća.

➤ Morfološki se razlikuju pukotinske, mrežaste i meandrirajuće škrape.

➤ Sustavi više škrapa čine škrapare i mogu pokrivati značajne površine.



Škrape, Sjeverni Velebit

- **Kamenice** nastaju na padinama malog nagiba ili na horizontalnim površinama i predstavljaju poseban oblik škrapa.
- Najčešće su veličine od nekoliko centimetara do jednog metra u promjeru.
- U početku nastaju manje udubine u kojima se zadržava voda koja postupno otapa vapnenac.
- Prema postanku dijele se na:
 - korozijske – nastaju djelovanjem kišnice na vapnenac
 - biogene – kada manja udubljenja u stijeni zapuni organski materijal koji biokemijskim procesima otapa stijenu.



Kamenica, sjeverni Velebit

- **Ponikve ili vrtače** su osnovni reljefni oblici u kršu i daju mu njegov specifičan izgled. To su izolirane okrugle ili ljevkaste udubine promjera od 10 do 500 m, čija relativna dubina rijetko prelazi 100 m.



➤ Mogu nastati korozijom, otapanjem odozgo ili urušavanjem zbog ispiranja odozdo do kojeg često dolazi zbog snižavanja razine podzemne vode i gubitka uzgonske potpore.

Ponikva ili vrtača, Crveno jezero, Imotski

- **Uvale, zaljevi ili drage** su 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 kilometara, dok im je širina znatno manja.



Uvala Blato na Mljetu

➤Kroz uvale ne prolaze stalni vodotoci. Zbog snažne okršenosti podzemna voda se nikada ili vrlo rijetko izdigne do površine pa je prihranjivanje površinskog toka podzemnom vodom nemoguće.

- **Polja** su 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 stalan 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 tzv. izvornoj zoni.



Ličko polje – najveće krško polje u Hrvatskoj, 465 km²

- **Zaravni** su prostrane, kilometrima dugačke i široke zaravnjene karbonatne površine.
- Na sebi ponekad imaju razvijene ponikve ili su se u njih usjekla krška polja ili riječni kanjon. Vezane su za korozijsko oblikovanje uz razinu temeljnice, ali česte su i uz zone navlačenja.



Slunjska zaravan

➤ Kako za nastanak zaravni nije potreban mehanički rad, zaravni se mogu razviti pod vrlo blagim nagibom.

➤ Proces korozijskog zaravnjanja se uspije dovršiti na onim mjestima gdje intenzitet djelovanja krške denudacije nadmašuje intenzitet tektonskog izdizanja.

- **Humci, brežuljci, glavice ili krški tornjevi** poseban su oblik zaostajanja krškog procesa odnosno neerodirani ostaci karbonatnih naslaga.



Hum Zir u Lici

- **Doline u kršu** mogu nastati na više načina.
 - **Slijepa dolina** nastaje kad ponornica iz nekrškog područja doteče u krško područje i nestane u podzemlju. Rijeka može proći kroz krško područje i stvoriti krški kanjon.
 - **Viseća dolina** nastaje u slučaju kad je razina vode u rijeci viša no što je razina temeljnica.
 - Ukoliko je dolina u kršu nastala riječnom erozijom, a danas u njoj nema vodotoka, onda je to **suha dolina**.



*Kanjon
Zrmanje*

*Limski
most
iznad
Limske
Drage*



- Tijekom poniranja vode i njezinog korozivnog utjecaja u dubini nastaju brojni podzemni oblici:
 - Jame
 - Špilje
 - Kaverne – speleološki objekti

- **Špilje, spilje ili pećine** su pretežno horizontalne ili subhorizontalne podzemne šupljine u koje može ući čovjek.
- Nastaju pretežno erozijskim i korozijskim radom podzemnih voda.
- Veći špiljski oblici imaju više različito nagnutih kanala, hodnika i dvorana koji mijenjaju položaj i dimenzije ponekad i u različitim razinama.
- Temperatura je u špiljama promjenjiva s obzirom na dubinu, količinu vode, godišnje doba i vezu s površinom. U pravilu, temperatura je u špilji ljeti niža od prosječne dnevne, a zimi viša.



Špilja Đulin ponor – najdulja hrvatska špilja, 16 936 m dugačak špiljski sustav Đulin ponor- Medvedica nalazi se ispod grada Ogulina

- **Jame** su pretežno vertikalne udubine ili pukotine relativno manjeg promjera koje samo ponekad sežu do razine podzemne vode.
- Nastale su erozijskim i korozijskim radom vode duž sustava pretežno vertikalnih pukotina.
- Hrvatski krš poznat je u svijetu po dubokim jamama.

Jamski sustav Lukina jama- Trojama	1392 m
Slovačka jama	1320 m
Jamski sustav Velebita	1026 m



- **Kaverne** su speleološki objekti koji nemaju prirodan ulaz s površine terena.
 - Načinom postanka i geomorfološkim osobinama, kaverne se ne razliku od špilja i jama, osim što je ulaz u njih umjetno otvoren.
 - Kaverne se isključivo nalaze građevinskim radovima, najčešće prilikom izgradnje tunela.
- U Hrvatskoj je istraženo preko 1000 kaverni.
 - 85% su vertikalni, a 15% horizontalni speleološki objekti.

*Kaverna u tunelu Vrata –
tlocrtnih dimenzija 73 x 66 m i
visine 37 m*





OSNOVNA FIZIČKO-STRUKTURNA SVOJSTVA STIJENA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

Mehanika stijena proučava stijenske mase onakve kakve se javljaju u prirodi, tj. kao realne sredine.

Stijenske mase u prirodi su u pravilu razlomljene (diskontinuirane), heterogene, anizotropne i već se nalaze u nekom prirodnom stanju naprezanja.

Osnovna fizičko-strukturna svojstva su prema tome:

- Razlomljenost (diskontinuiranost)
- Nehomogenost (heterogenost)
- Anizotropija

Razlomljenost je prožetost stijenske mase pukotinama odnosno pukotinskim sustavima.

Kada naprezanja, čijem je djelovanju izložena neka stijenska masa, prijeđu njenu čvrstoću dolazi do pojave loma odnosno kidanja međumolekularnih veza i gubljenja kohezije duž plohe loma.

Uzroci nastanka razlomljenosti su:

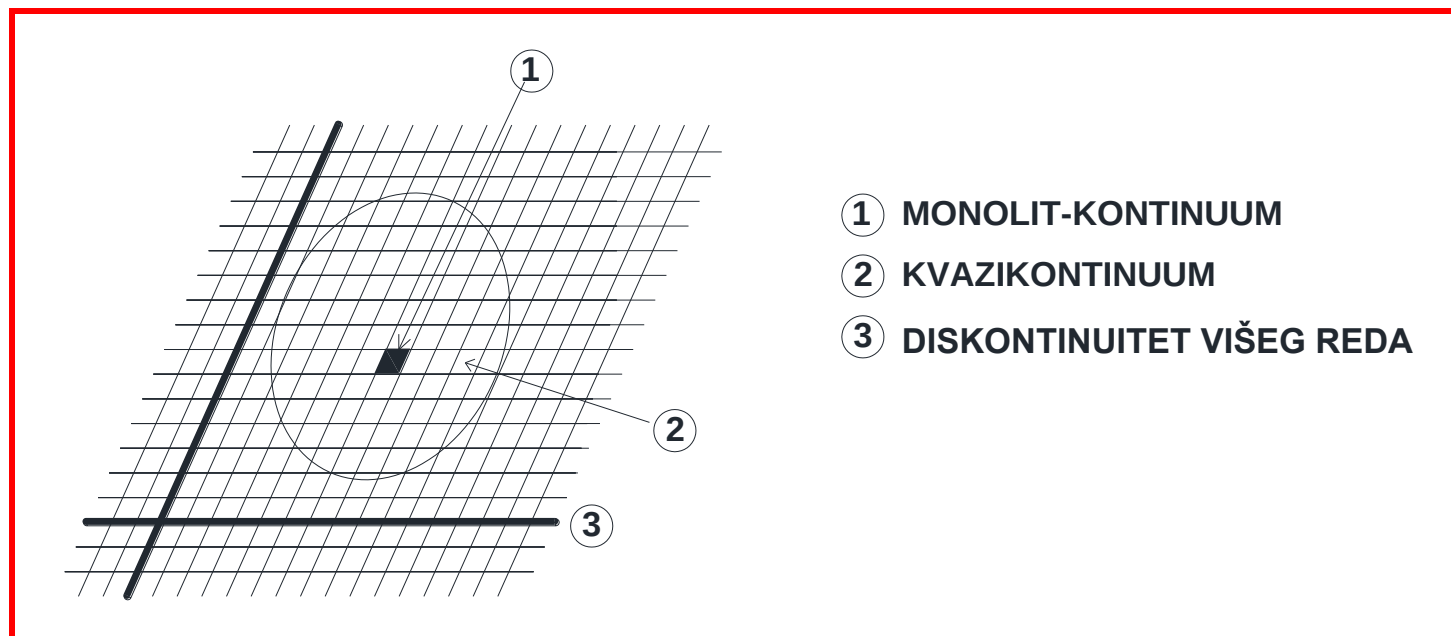
- djelovanje tektonskih sila,
- smanjenje volumena zbog hlađenja magme,
- skupljanje masa zbog sušenja,
- djelovanje naprezanja zbog vlastite težine,
- rasterećenje zbog erozije,
- djelovanje temperaturnih promjena,
- rasterećenje zbog iskopa, miniranja i dr.

Stijenska masa može se promatrati kao čvrsto tijelo razdijeljeno sa jednim ili više familija kontinuiranih ili diskontinuiranih razdjelnica koje čine pukotinske sustave.

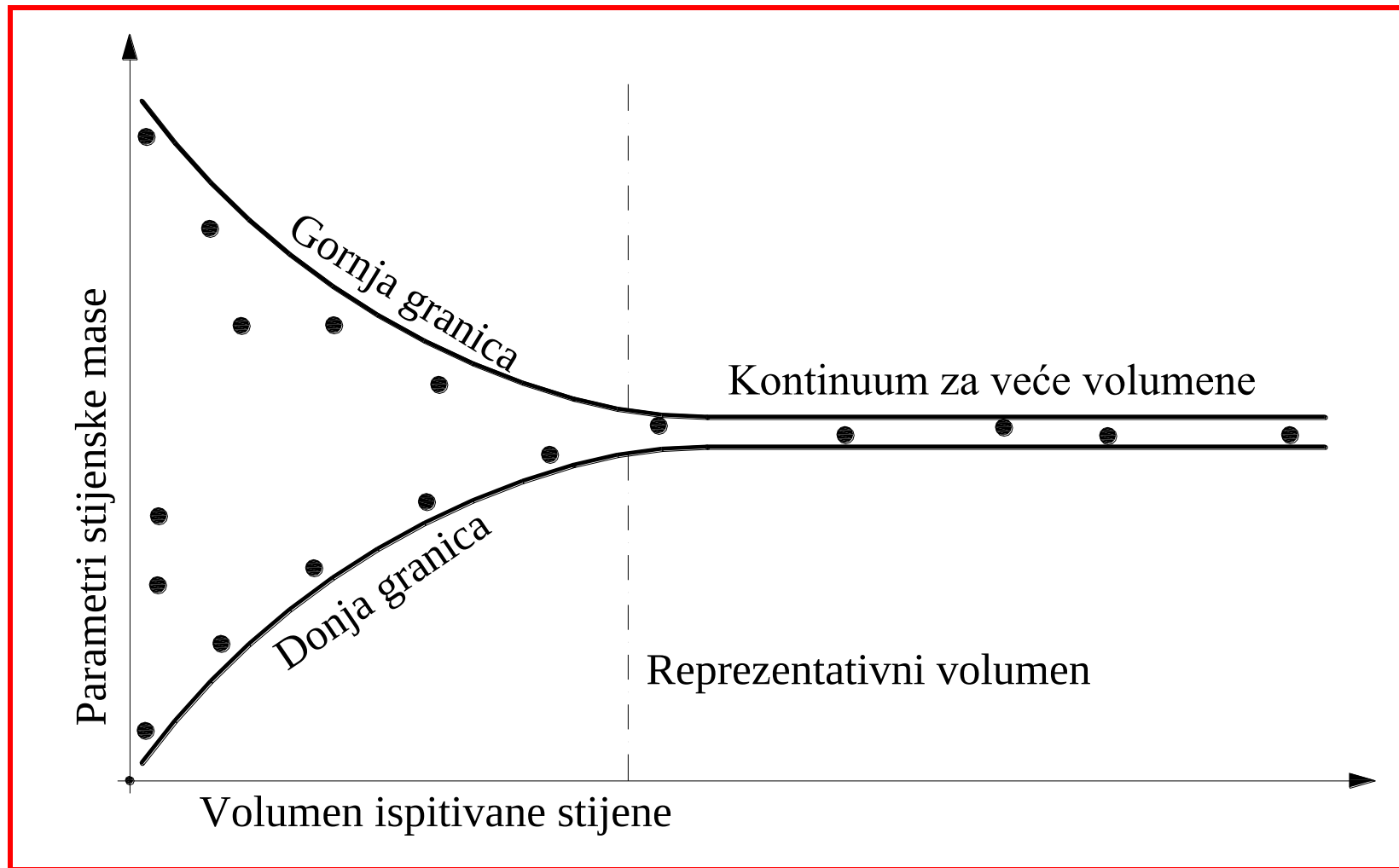
Diskontinuum se javlja kao relativna kategorija u odnosu na veličinu promatranog područja.

Učinak razmjere – odnos volumena promatranog područja i modela stijenske mase. Za mali volumen promatranog područja stijenska masa se najčešće ponaša kao diskontinuum. Nakon postizanja *reprezentativnog volumena* stijenska masa se ponaša kao kontinuum odnosno kvazikontinuum.

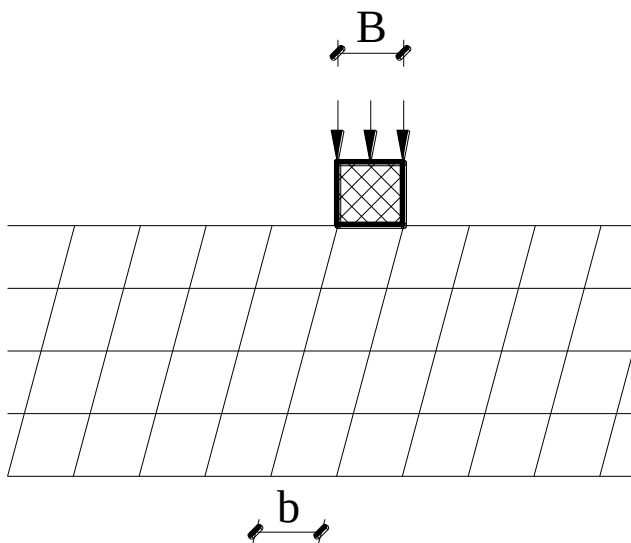
Učinak relacije – odnos veličine monolita i objekta koji treba graditi na stijenskoj masi.



Unutar kvazikontinuiranog područja značaj malih diskontinuiteta pada u odnosu na velike.

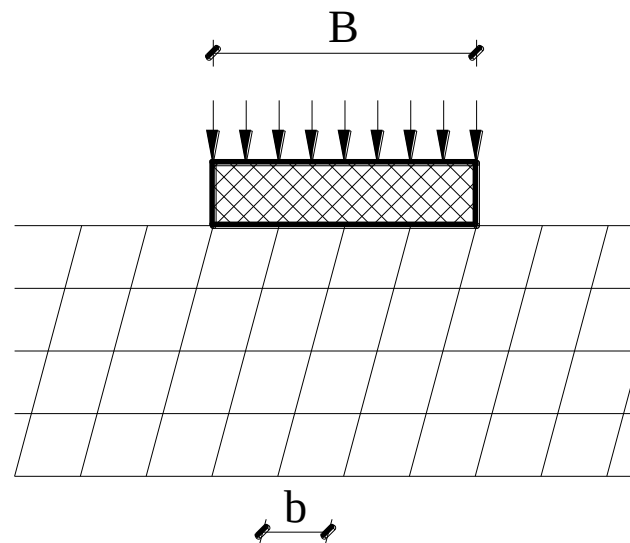


Učinak razmjere i reprezentativni volumen



UČINAK RELACIJE

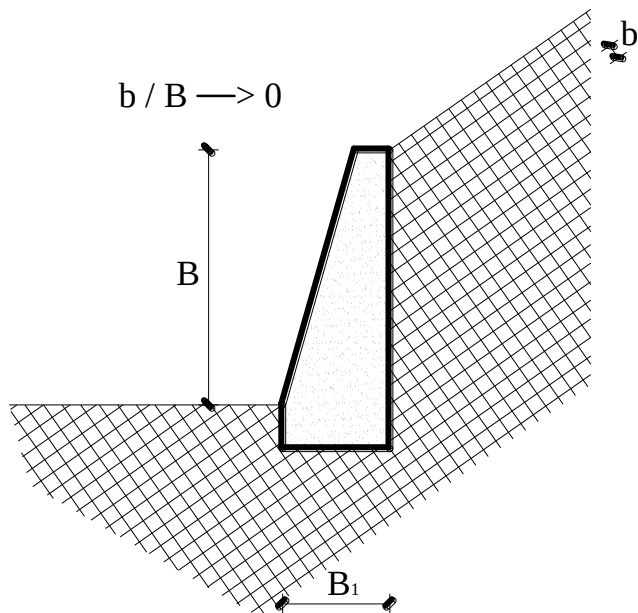
$$r = b / B$$



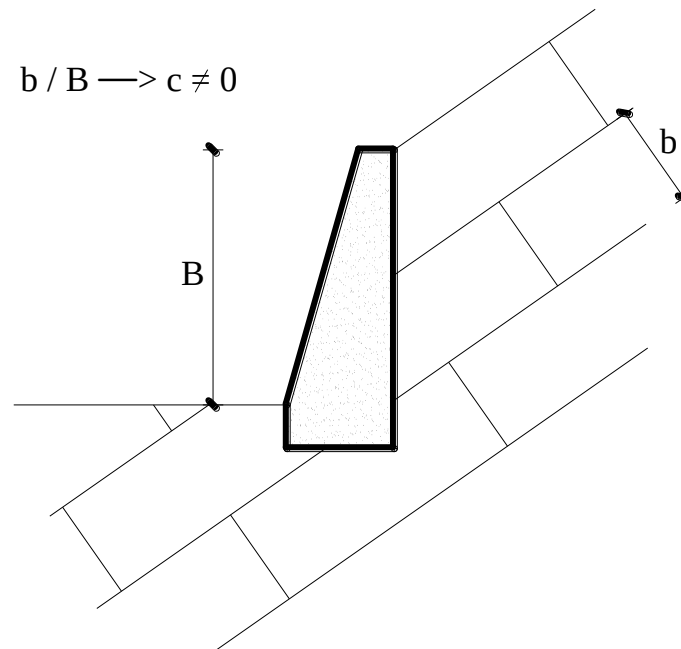
b - dimenzija monolita [m]

B - dimenzija objekta [m]
(odnosno temelja objekta)

Učinak relacije za slučaj temeljenja na stijeni

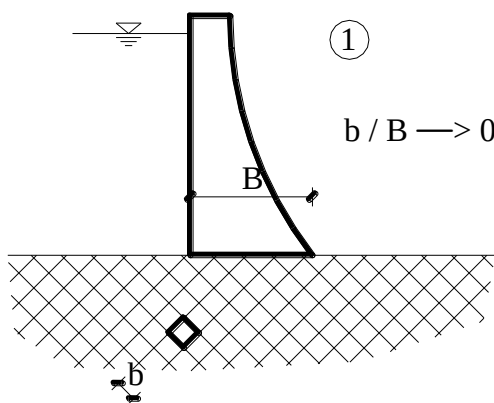


① KVAZIKONTINUUM

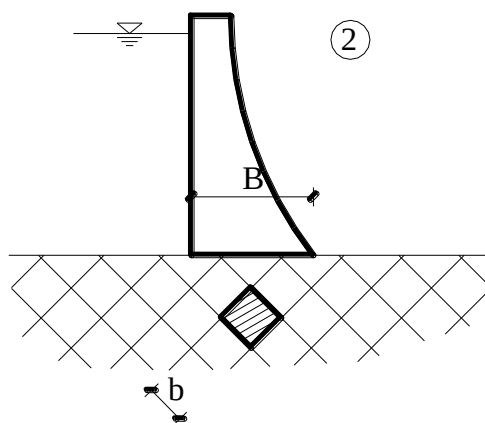


② DISKONTINUUM

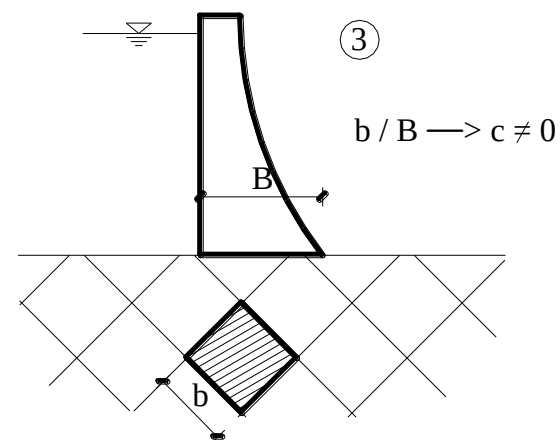
Učinak relacije za slučaj potpornog zid



① KVAZIKONTINUUM



② GRANICNO PODRUCJE
KVAZIKONTINUUM - DISKONT.



③ DISKONTINUUM

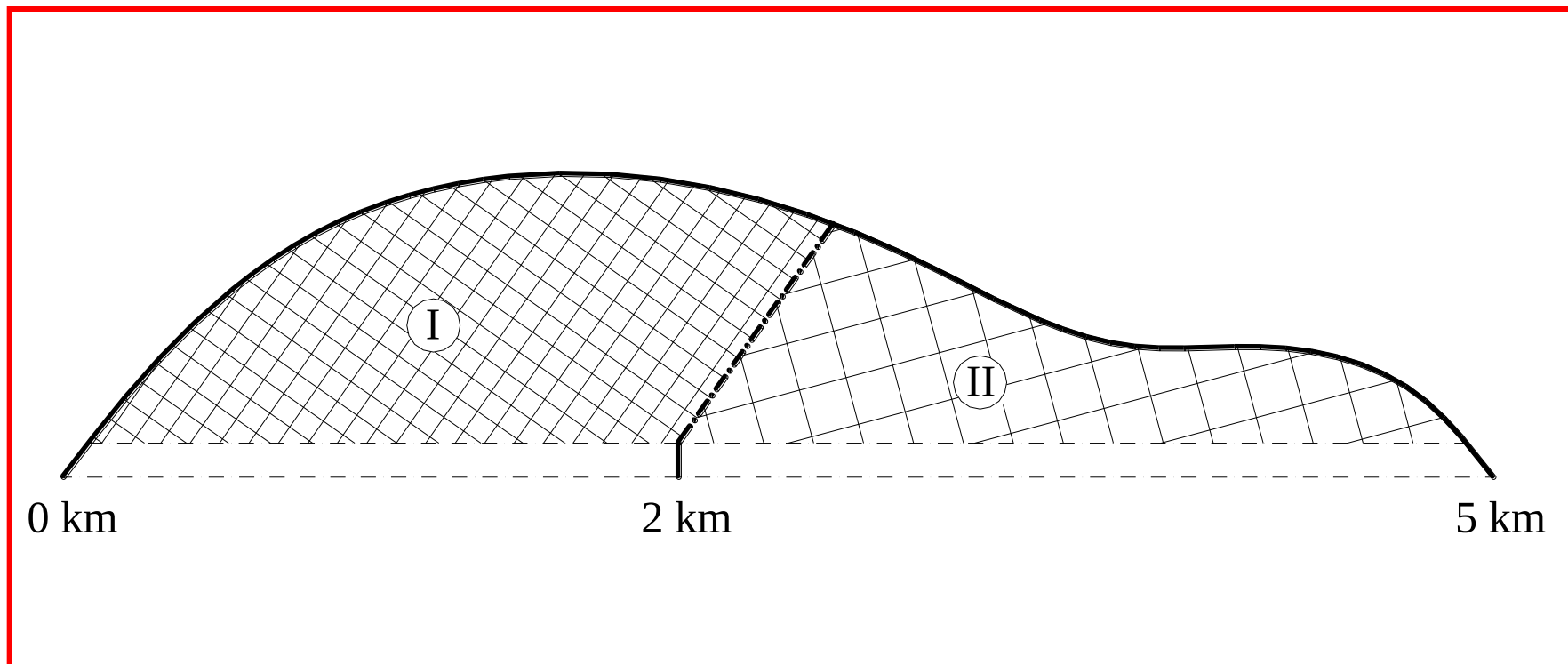
Učinak relacije za slučaj gravitacijske brane

Homogenost je svojstvo materijala odnosno sredine da u svim točkama ima jednaka svojstva. U suprotnom se radi o **nehomogenoj** odnosno **heterogenoj** sredini.

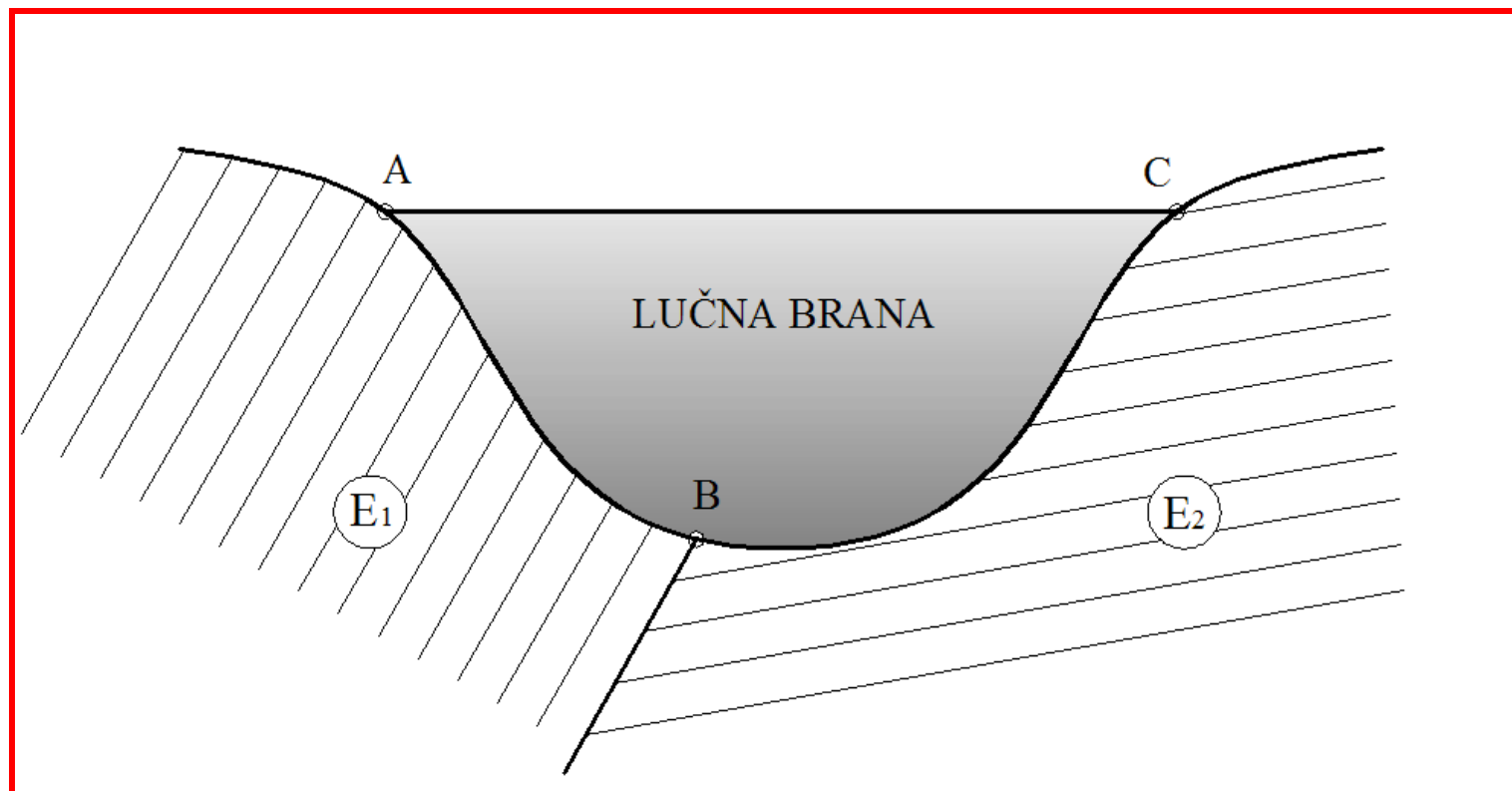
Heterogenost stijenskih masa uvjetovana je prije svega njihovim litološkim sastavom. Međutim i litološki homogene stijene odlikuju se heterogenošću koja je uvjetovana nepravilnim ili neujednačenim mehaničkim svojstvima zbog prostornog rasporeda diskontinuiteta odnosno razlomljenosti.

Obzirom na učinke razmjere i relacije može se također govoriti o kvazihomogenoj sredini.

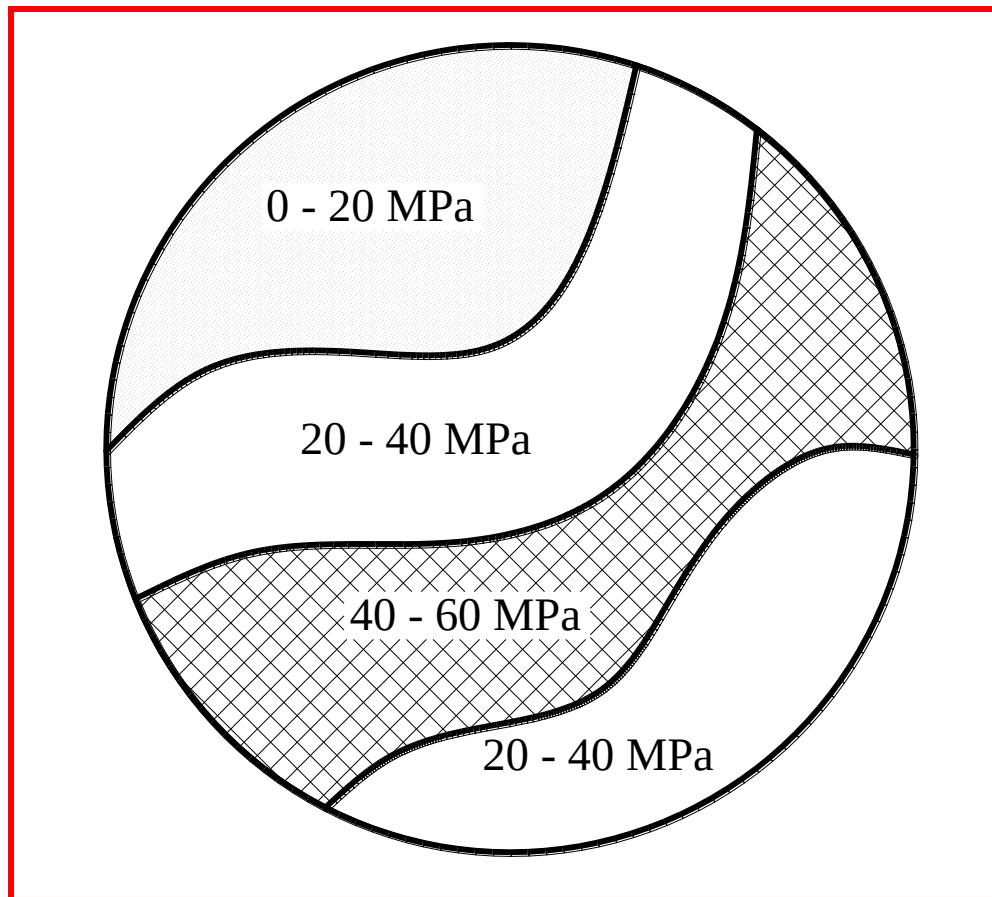
Stijenska masa se može smatrati kvazihomogenom obzirom na neki parametar koji se promatra (razlomljenost, deformabilnost, čvrstoća i dr.).



Kvazihomogenost po parametru razlomljenosti



Kvazihomogenost po parametru deformabilnosti



Kvazihomogenost po parametru čvrstoće

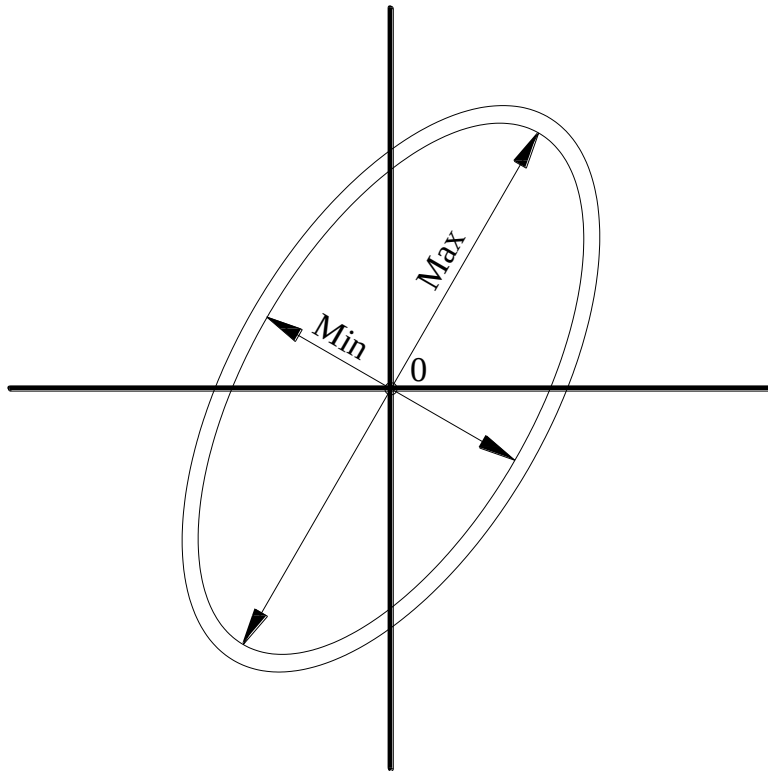
Izotropija je svojstvo materijala, odnosno sredine da u svim pravcima ima jednaka svojstva. U suprotnom se radi o **anizotropnoj** sredini.

Anizotropija se može odnositi na više različitih svojstava stijenske mase, npr. modul deformabilnosti, čvrstoću, propusnost, frekvenciju diskontinuiteta.

Pri tome se svojstva mogu mijenjati od točke do točke odnosno od zone do zone ako sredina nije homogena već heterogena.

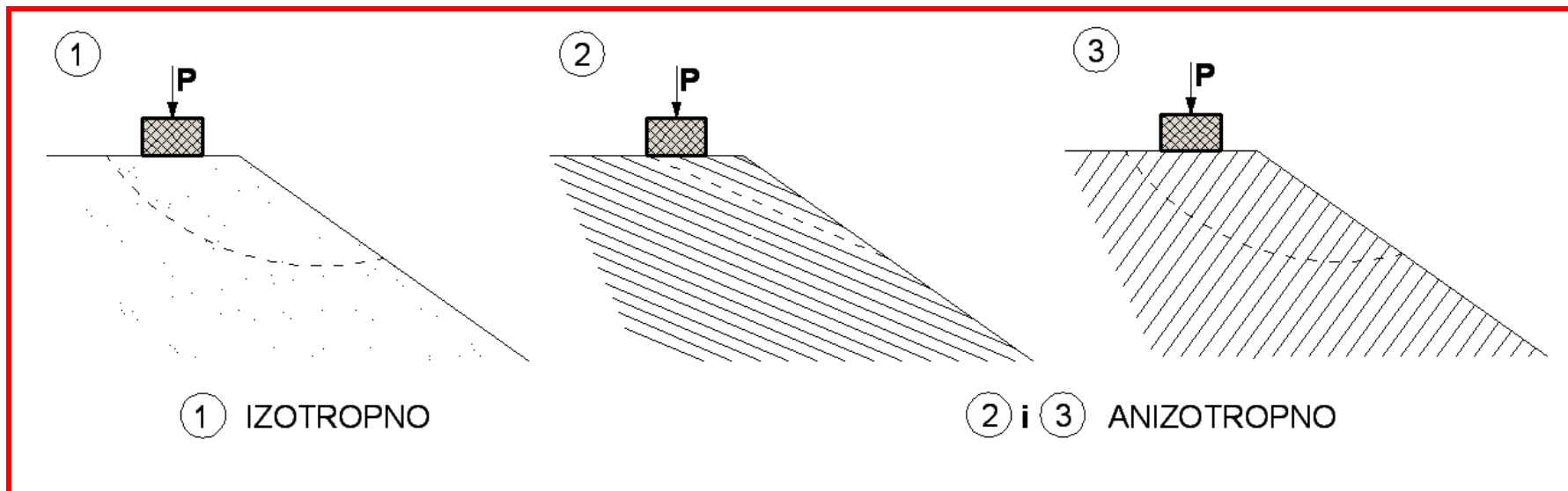
Anizotropija stijenskih masa uvjetovana je prije svega njihovom razlomljenošću i slojevitošću.

Anizotropija se može izraziti kvantitativno usporedbom određenih fizičko-mehaničkih karakteristika duž privilegiranih pravaca. Na taj način uvodi se *stupanj anizotropije*.

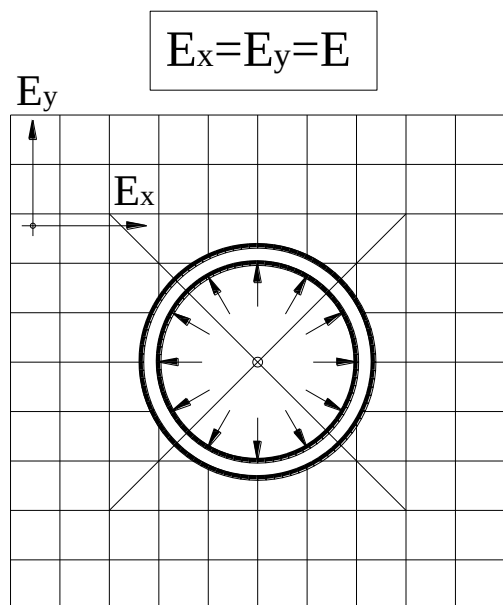


Anizotropija u dva
privilegirana pravca

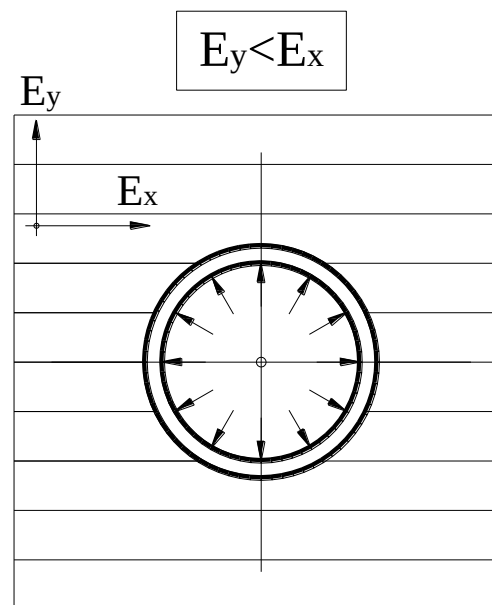
Stupanj anizotropije
 $= 1: (\text{Max}/\text{Min})$



***Stijenski pokos u izotropnoj i anizotropnoj sredini
(anizotropija smicanja)***



IZOTROPNO



ANIZOTROPNO

Hidrotehnički tunel u izotropnoj i anizotropnoj sredini