

**Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet**

Preddiplomski studij

GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

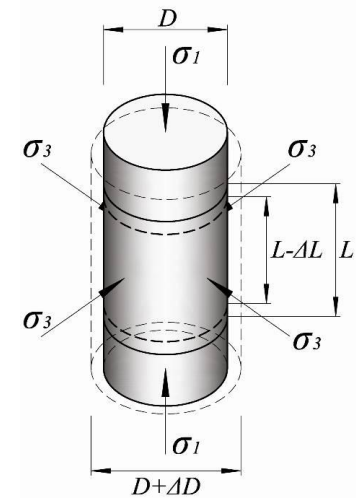
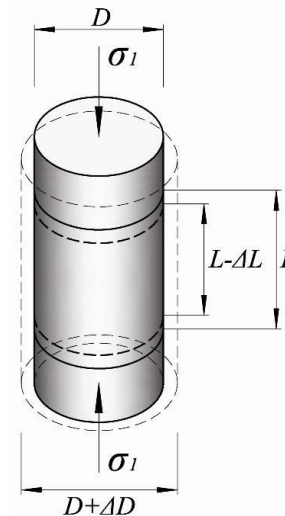
Predavanje 8.

Krutost stijenske mase

- **Krutost** reprezentira omjer naprezanja i deformacija.
- Modul elastičnosti stijenske mase neophodan je parametar za svaku numeričku analizu i prognozu deformacija geotehničkih konstrukcija.
- Stijena je u pravilu razlomljena, heterogena, anizotropna i diskontinuirana.
- 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.

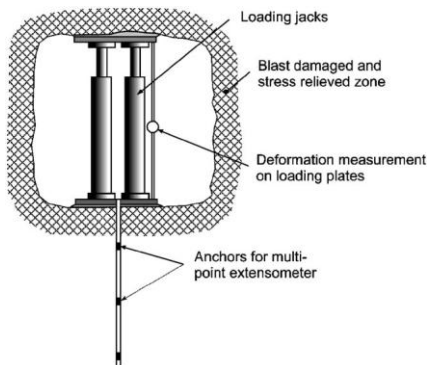
- Tri su vrste određivanja krutosti stijenske mase:
 - Laboratorijska ispitivanja krutosti
 - Terenska ispitivanja krutosti
 - Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

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



- Modul elastičnosti može se odrediti na više načina koji se koriste u inženjerskoj praksi.
- Laboratorijska istraživanja su detaljno opisana u:
3. predavanje – Laboratorijski istražni radovi

- Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM) preporuča slijedeća terenska ispitivanja krutosti stijenske mase:
 - *pokus opterećenja pločom,*
 - *pokus radijalnog opterećenja,*
 - *ispitivanja velikim tlačnim jastucima,*
 - *fleksibilni i kruti dilatometar*



- Terenska ispitivanja krutosti su detaljno opisana u:
4. predavanje – Terenski istražni radovi

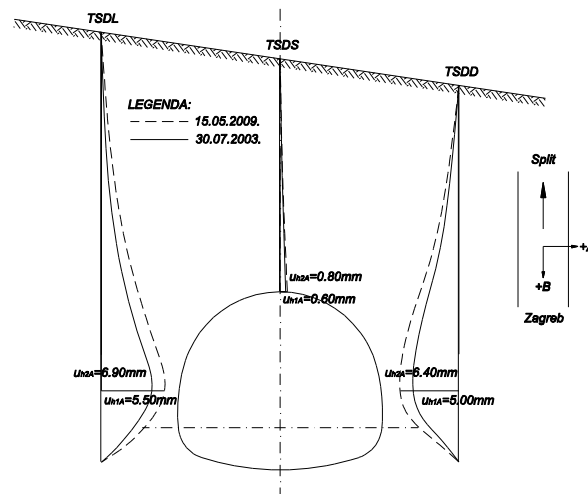
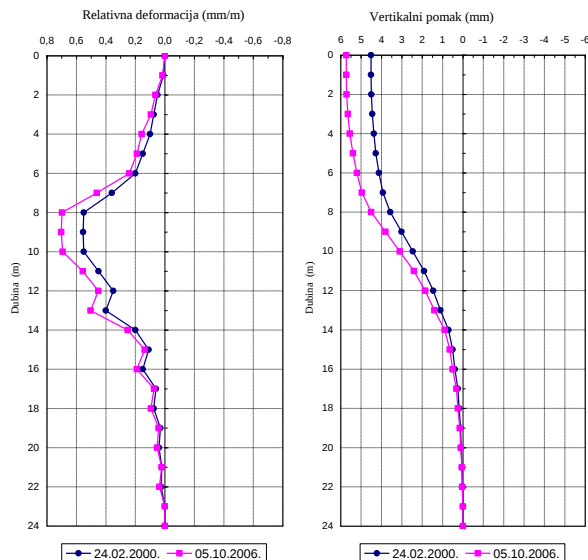


Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Ideju da se klasifikacije, kao kvantitativni pokazatelj inženjersko geoloških svojstava stijenske mase u cijelini, koriste kod određivanja krutosnih karakteristika stijenske mase dao je Bieniawski u cilju optimalnog određivanja broja, pozicija i tipa terenskih ispitivanja modula elastičnosti.
- Sugerirao je da se pomoću klasifikacija odredi očekivani modul unutar točnosti od 20%, a da se onda na temelju njega izrađuje program terenskih ispitivanja.
- Koncept koji je predložio Bieniawski, da se modul elastičnosti određuje preko uspostavljenih korelacijskih veza sa rezultatima klasificiranja stijenske mase, prihvaćen je u znanstvenim krugovima i inženjerskoj praksi kao standard za određivanje krutosti i bez provođenja terenskih ispitivanja.

- **Korelacijska veza** između krutosti i klasifikacija može se uspostaviti :
 - koristeći *rezultate terenskih ispitivanja* ili
 - pomoću *povratnih numeričkih analiza* na temelju rezultata *mjerena deformacija* geotehničkih konstrukcija izvedenih u stijenskoj masi.





Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

Bieniawski, 1978.

$$E = f(\text{RMR})$$

Serafim i Pereira, 1983.

$$E = f(\text{RMR})$$

Nicholson i Bieniawski, 1990.

$$E = f(\text{Ei}, \text{RMR})$$

Grimstad i Barton, 1993.

$$E = f(Q)$$

Hoek i Brown, 1997.

$$E = f(\sigma_c, \text{GSI})$$

Barton, 2000.

$$E = f(\sigma_c, Q)$$

Palmstrom i Singh, 2001.

$$E = f(\text{RMi})$$

Kayabasi et al., 2003.

$$E = f(\text{WD}, \text{Ei}, \text{RQD})$$

Zhang i Einstein, 2004.

$$E = f(\text{Ei}, \text{RQD})$$

Hoek et al., 2002.

$$E = f(D, \sigma_c, \text{GSI})$$

Hoek et al., 2006.

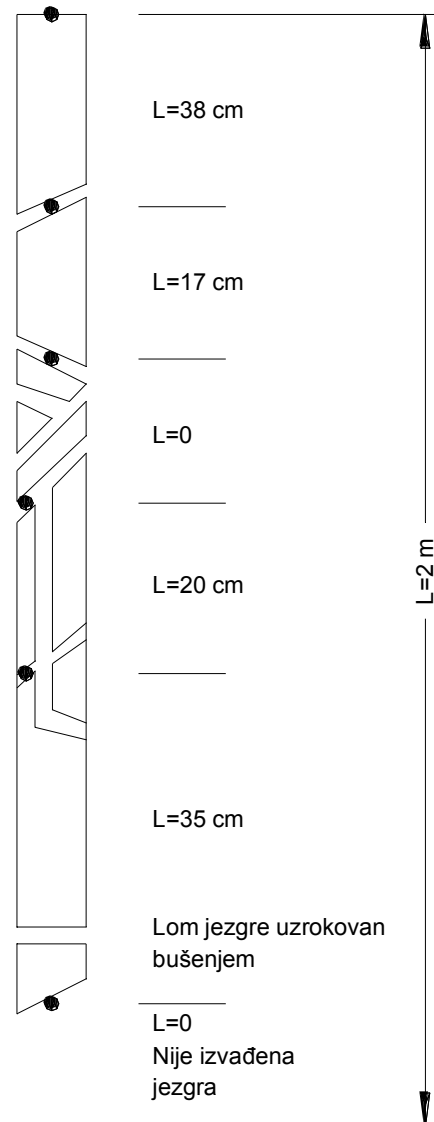
$$E = f(D, \text{Ei}, \text{GSI})$$

Jurić-Kaćunić, 2009.

$$E = f(\text{IKs}, \text{vp}, \text{GSI})$$

1) RQD

- Rock Quality Designation (RQD) index definiran je kao postotak intaktne jezgre koja sadrži odlomke dužine 100 mm ili duže u ukupnoj dužini izbušene jezgre.

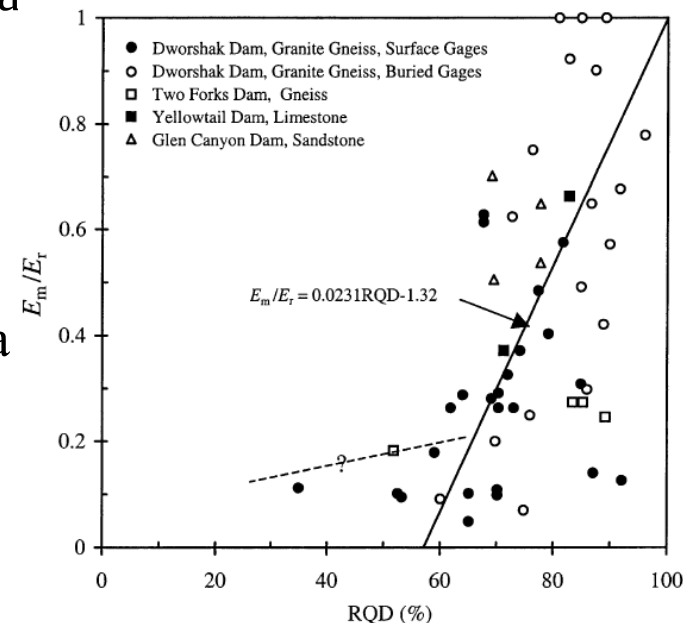


$$RQD = \frac{\sum \text{dužina odlomaka jezgre duže od 10 cm}}{\text{ukupna dužina jezgre}}$$

- Prva značajnija istraživanja povezanosti RQD i modula elastičnosti proveli su Coon i Merritt na temelju baze podataka od 54 terenska ispitivanja modula elastičnosti prilikom izvedbe nekoliko brana u SAD.
- Dodali su i rezultate terenskih ispitivanja na Dworshak brani koje su objavili Deere et al.
- Uključili su modul elastičnosti intaktnog uzorka (E_r) i uspostavili sljedeću linearna vezu:

$$E_m = E_r (0.0231 \text{ RQD} - 1.32)$$

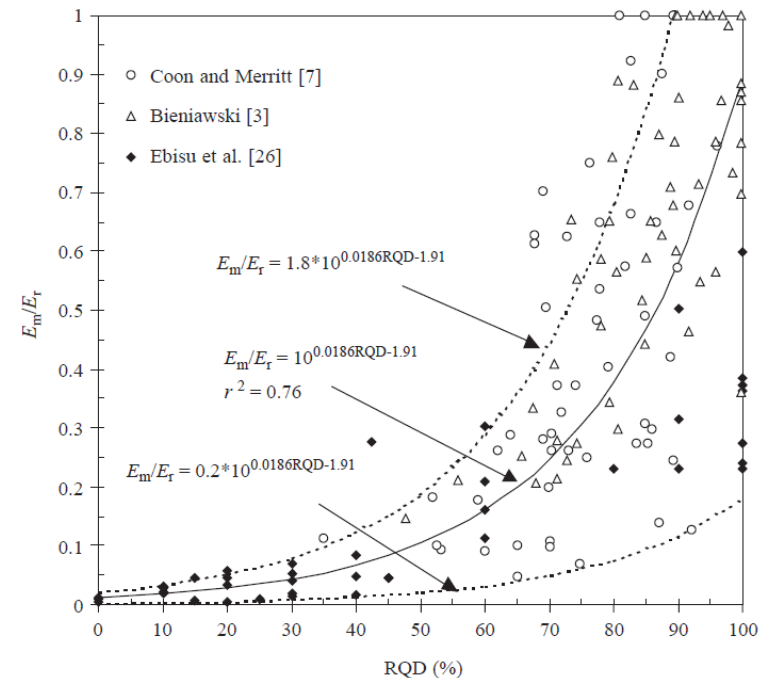
- Nedostatak leži u činjenici što su korišteni podaci za kvalitetnije stijene. Samo nekolicina podataka ima $\text{RQD} < 60\%$. Zbog toga izraz vrijedi za $\text{RQD} > 57\%$.



- Da bi izbjegli uočene nedostatke Zhang i Einstein proširili su bazu podataka koje su koristili Coon i Merrit sa bazama podataka koje su publicirali Bieniawski te Ebisu et al. 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):

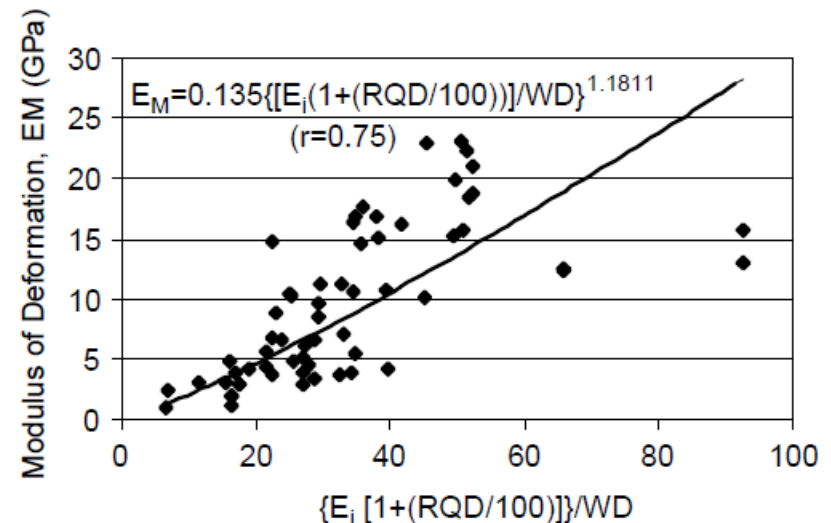
$$E_m = E_r 10^{0,0186RQD-1.91}$$

i predložena donja i gornja granica modula deformabilnosti ovisno o RQD.



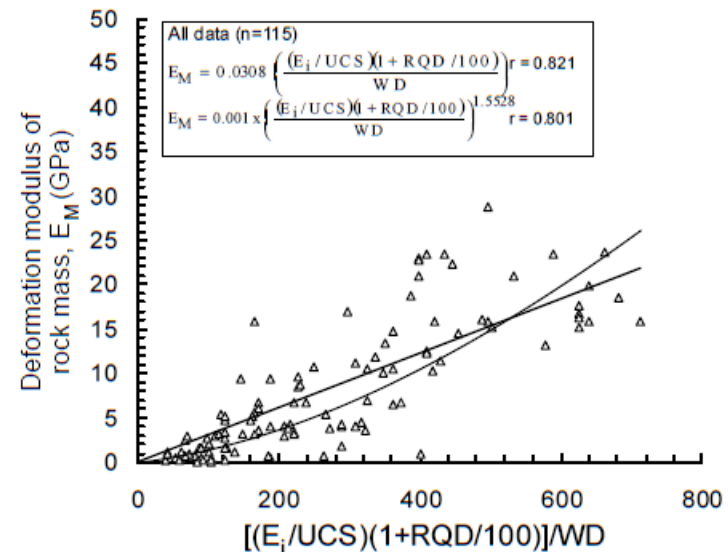
- Kayabasi, Gokceoglu i Ercanoglu uočili su da za određivanje modula deformacije stijenske mase **nije dovoljno** koristiti samo RQD indeks.
- Zaključili su da u redukciju modula elastičnosti intaktne stijene treba uključiti **trošnost stijenki diskontinuiteta (WD)** koja se standardno određuje u RMR klasifikaciji. Predložili su redukciju modula elastičnosti intaktne stijene (E_i):

$$E_m = 0,135 \left[\frac{E_i (1 + 0.01 \text{ RQD})}{\text{WD}} \right]^{1.1811}$$



- Gokceoglu, Sonmez i Kayabasi u redukciju modula elastičnosti intaktne stijene *osim trošnosti stijenki diskontinuiteta* (WD), uključili su i jednoosnu tlačnu čvrstoću intaktnog uzorka.
- Proširili su bazu podataka s 58 terenskih ispitivanja modula deformacija stijenske mase na jednoj hidroelektrani u Turskoj.
- Predložili su redukciju modula elastičnosti intaktne stijene (E_i):

$$E_m = 0,001 \left[\frac{E_i / \sigma_{ci} (1 + 0.01 RQD)}{WD} \right]^{1.5528}$$





Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

2) **Q klasifikacijski sustav** (Barton, 1974).

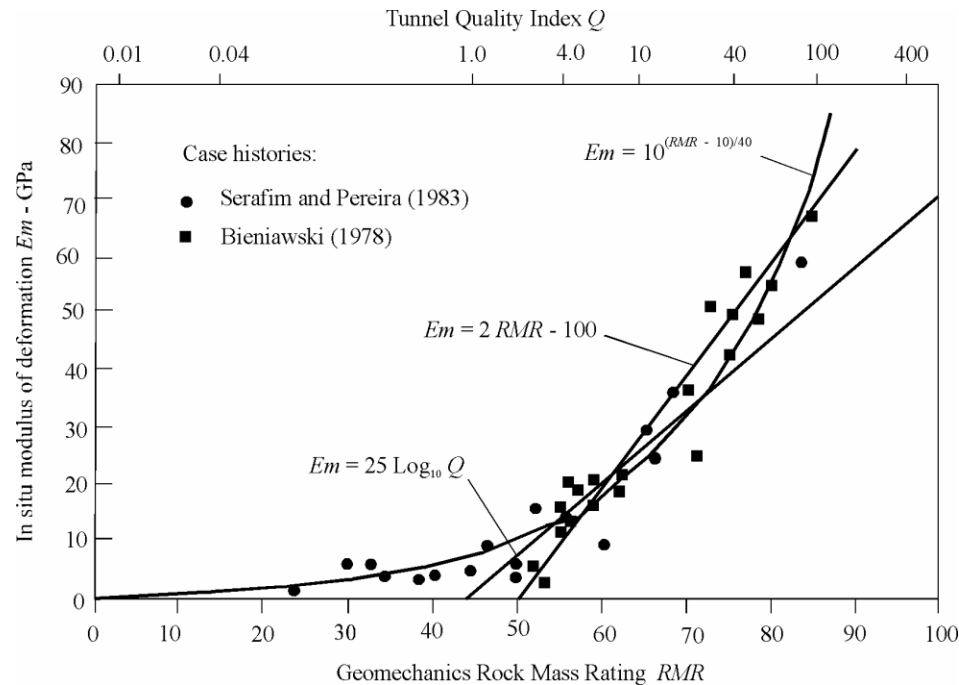
- Klasifikacijska procedura sastoji se od određivanja sljedećih 6 parametara:
 - RQD – Rock Quality Designation, indeks kvalitete jezgre,
 - J_n – broj skupova diskontinuiteta,
 - J_r – indeks hrapavosti diskontinuiteta,
 - J_a – indeks alteracije diskontinuiteta,
 - J_w – faktor pukotinske vode i
 - 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:

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

- Prva istraživanja određivanja modula deformacije na osnovi rezultata Q klasifikacije proveli su Barton et al., te Grimstad i Barton koristeći rezultate izmjerenih deformacija i povratne numeričke analize na velikom broju izvedenih podzemnih iskopa u Norveškoj, primjenjujući sljedeći izraz:

$$E_m = 25 \log Q \quad [\text{GPa}]$$

- Predloženi izraz vrijedi za stijenske mase kod kojih je $Q > 1$ jer bi u protivnom modul bio negativan.
- Iako su se prognozirane i izmjerene deformacije dobro poklapale u njihovim projektima ipak se ovaj izraz nije dobro uklapao u objavljena istraživanja provedena na drugim projektima.



- Na slici je prikazana predložena ovisnost zajedno sa rezultatima koje su objavili Bieniawski i Serafim i Perreira, s tim da je Q izražen preko RMR . Vidljivo je da bi se u te rezultate bolje uklapala ovisnost:

$$E_m = 10 \log Q \quad [\text{GPa}]$$

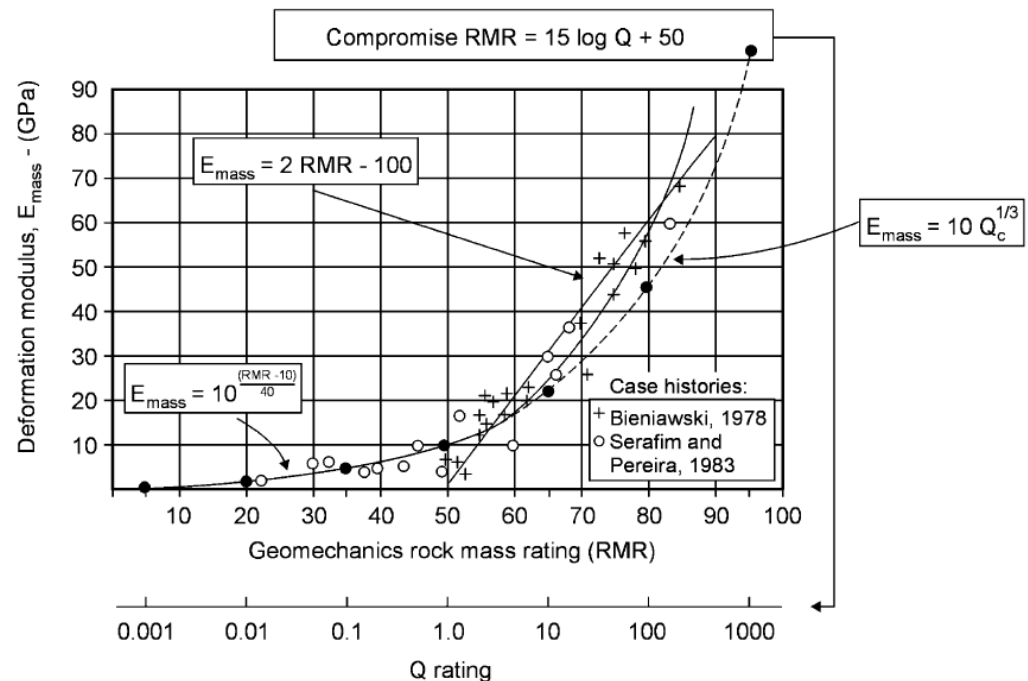
- U rezultate navedenih istraživanja bile su uključene *samo čvrste stijene* te *nisu uzeti u obzir dubina i početno stanje naprezanja*.
- Nakon što su uključene slabije i porozne stijenske mase te laboratorijska ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene, **Barton** je predložio novi izraz koji se znatno bolje uklapao kako u vlastita istraživanja tako i u prethodno provedena istraživanja Bieniawskog, Serafima i Perreire:

$$E_m = 10(Q_c)^{\frac{1}{3}} \quad [\text{GPa}]$$

gdje je:

$$Q_c = Q \times \frac{\sigma_{ci}}{100}$$

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća
intaktne stijene u MPa





3) R_{Mi} klasifikacijski sustav (Rock Mass index), Palmstrom (1995, 1996a, 1996b, 2000)

- Rock Mass index (R_{Mi}) predstavlja volumetrijski parametar koji ukazuje na približnu vrijednost jednoosne čvrstoće stijenske mase.
- R_{Mi} 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.

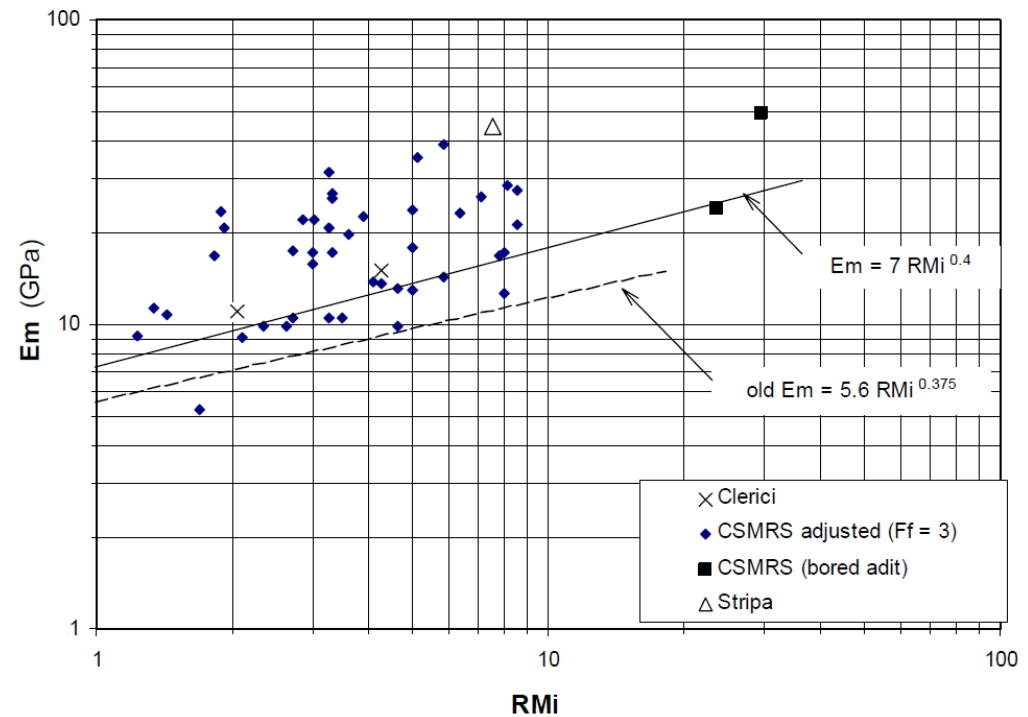
- Vezu između između modula deformacije stijenske mase i $RM_i > 1$ teoretski je izveo Palmstrom povezivanjem parametara RM_i i RMR klasifikacije te koristeći izraz Bieniawskog:

$$E_m = 5.6 RM_i^{0.375}$$

- Značajnije istraživanje proveli su Palmstrom i Singh na temelju baze podataka od 42 terenska ispitivanja modula deformacije prilikom izvedbe 8 hidroelektrana u Indiji, Nepal i Butanu. Uključili su bazu podataka i rezultate ispitivanja koje su objavili Clerici i Thorpe et al.
- Ustanovili su da **gornji izraz daje premale vrijednosti modula deformabilnosti** i da ga je **nužno korigirati** za veće vrijednosti RM_i .

- Predložili su da se stari izraz koristi za $0.1 < R_{Mi} < 1$, dok su za $1 < R_{Mi} < 30$ te $R_{Mi} > 30$ predložili nove izraze:

R_{Mi}	E_m
$0.1 < R_{Mi} < 1$	$E_m = 5.6 R_{Mi}^{0.375}$
$1 < R_{Mi} < 30$	$E_m = 7 R_{Mi}^{0.5}$
$R_{Mi} > 30$	$E_m = 7 R_{Mi}^{0.4}$





4) RMR (Geomehanička klasifikacija)

Bieniawski (1973)

- 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 i
 - orijentacija diskontinuiteta.



Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

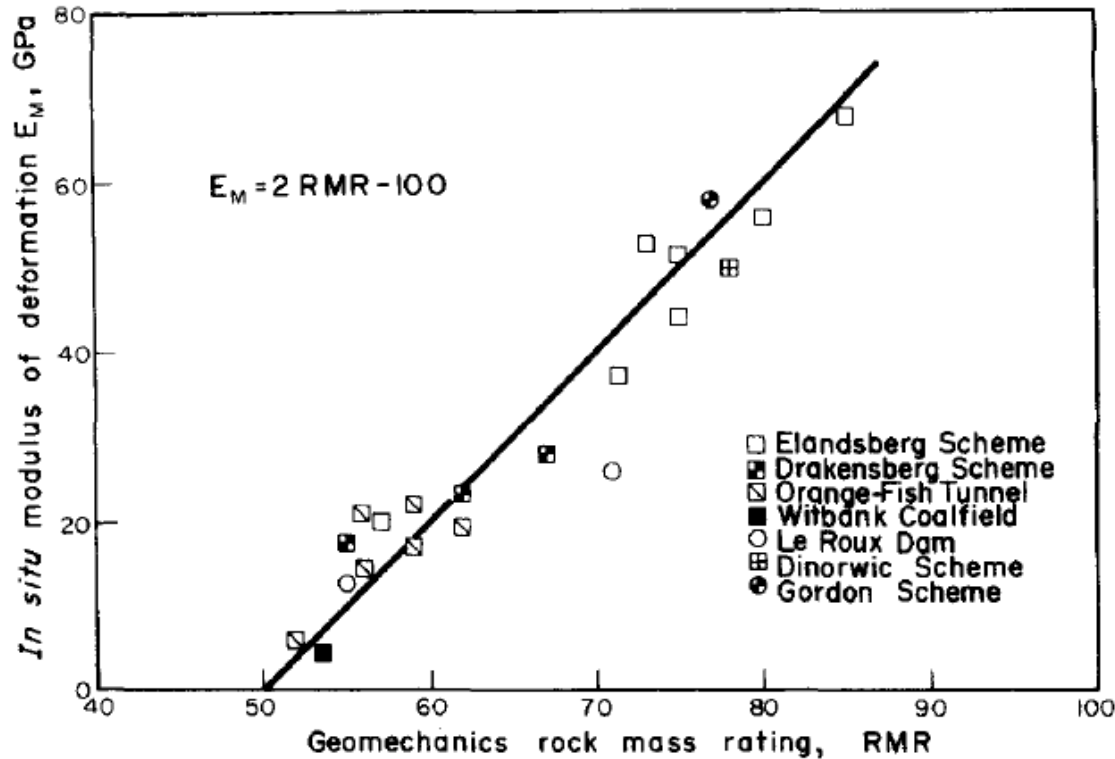
ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- 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 prilikom provedbe istražnih radova za tri velika hidrotehnička projekta u Južnoj Africi.
- Vrijednost RMR kretala se između 50 i 90, a vrijednost E_m između 5 i 80 GPa
- Primjenivši *metodu najmanjih kvadrata* uspostavio je linearnu vezu između rezultata RMR klasifikacije i modula deformacije u GPa:

$$E_m = 1.76 \text{ RMR} - 84.3$$

- 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:

$$E_m = 2 \text{ RMR} - 100$$



Veza između RMR klasifikacije i E_m (Bieniawski, 1978).

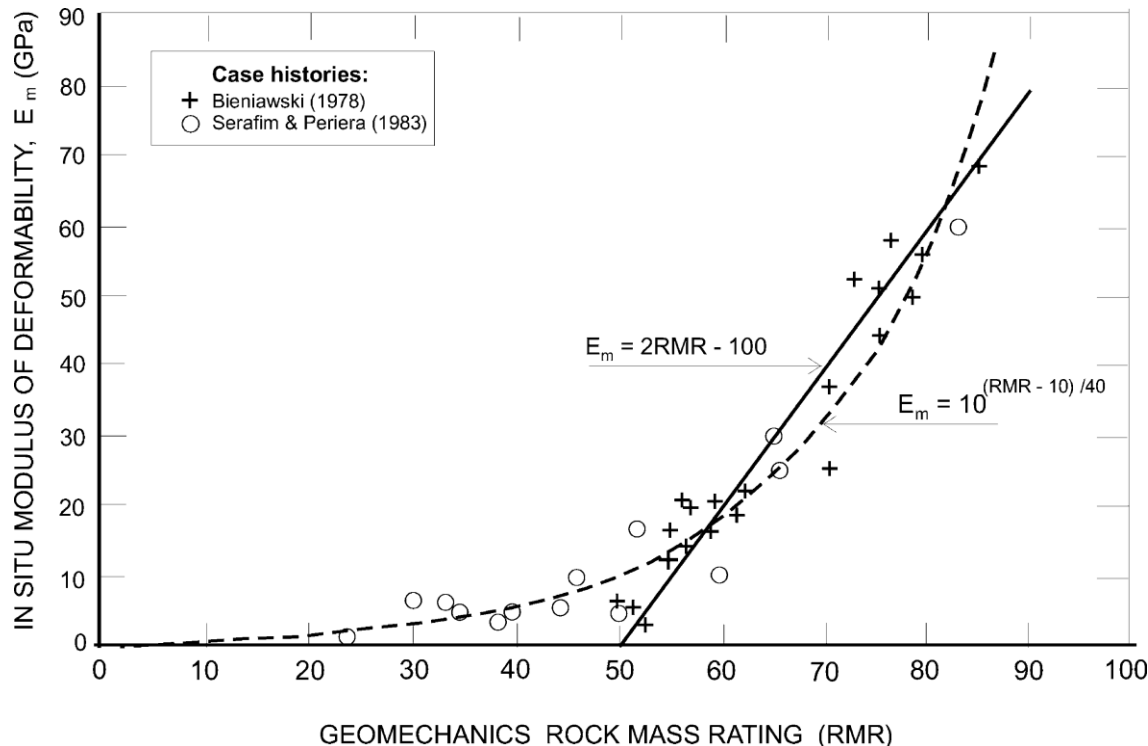
- Nedostatak izraza koji je predložio Bieniawski leži u činjenici da su ispitivanja vršena u kvalitetnim stijenskim masama pa izraz nije primjenjiv za stijenske mase slabije kvalitete gdje se očekuju inženjerski značajnije deformacije ($\text{RMR} < 50$).

- Serafim i Pereira proširili su bazu podataka koju je koristio Bieniawski sa modulima deformacije dobivenim na temelju opažanih slijeganja i povratnih numeričkih analiza nekoliko velikih brana u Portugalu. Vrijednost RMR kretala se između 20 i 90 a vrijednost E_m između 3 i 80 GPa. Dobili su nelinearnu vezu između rezultata RMR klasifikacije i modula deformacije u GPa:

$$E_m = 10^{\frac{\text{RMR}-10}{40}}$$

- Izrazi koje su predložili Bieniawski i Serafim i Pereira su u znanstvenoj i stručnoj literaturi najcitiranije, a u **projektantskoj praksi najčešće korištene** ovisnosti modula deformacije o rezultatima RMR klasifikacije.

- USA Federal Energy Regulatory Commission preporuča da se za vrijednosti $RMR > 58$ koristi izraz Bieniawskog a za $RMR < 58$ izraz Serafima i Pereire.
- $RMR = 58$ je apscisa presjecišta ovih dviju krivulja.

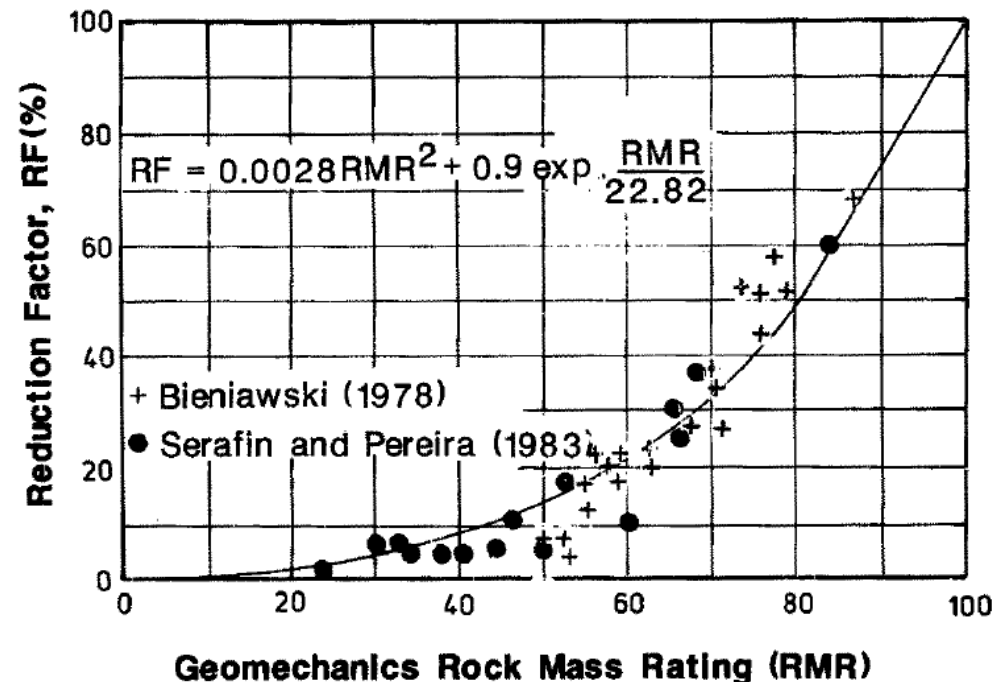


- Istu bazu podataka koristili su Nicholson i Bieniawski uzevši u obzir **dva bitna ograničenja** izravne veze modula deformacije stijenske mase i rezultata RMR klasifikacije:
 - volumen stijenske mase zahvaćen terenskim istražnim radovima znatno je manji od volumena stijenske mase u kojem se izvodi
 - 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*.
- Postavili su izraz:
$$E_m = E_i \cdot \text{RF}$$

E_m – modul deformacije stijenske mase,
 E_i – modul elastičnosti intaktne stijene iz pokusa jednoosnog tlaka i
RF – faktor redukcije komparabilan sa rezultatima terenskih istražnih radova

- Faktor redukcije RF dobiven je uspostavom 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.

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





Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

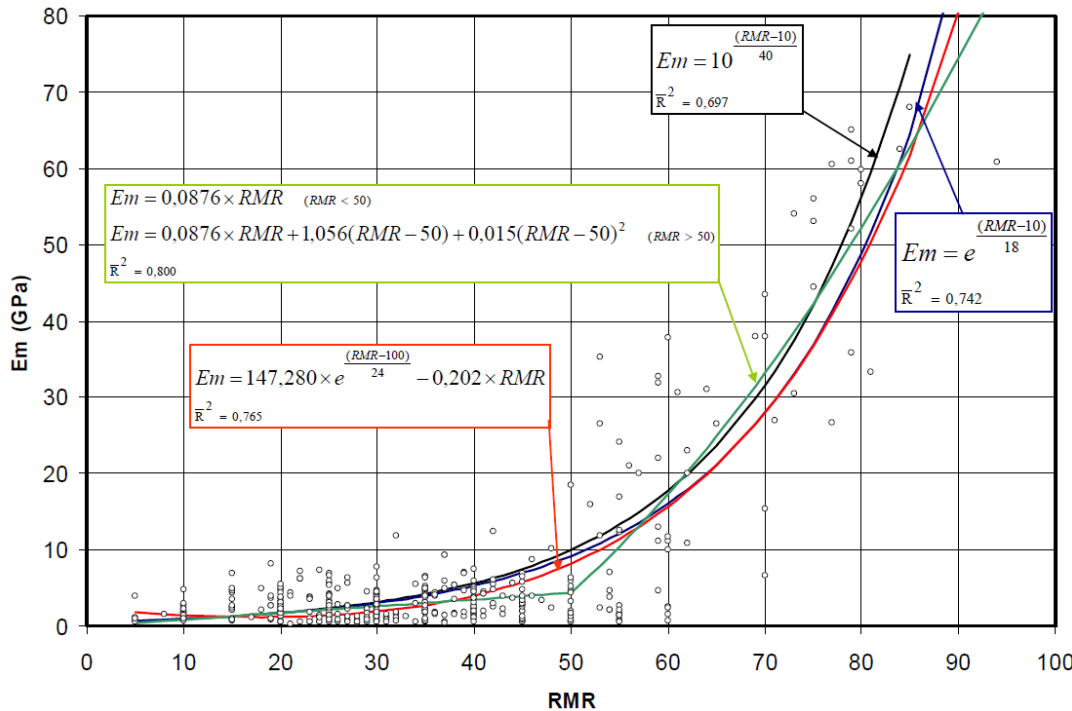
- Mitri, Edrissi i Hennig analizirajući podzemne iskope u rudnicima u Kanadi predložili su također redukciju modula deformacije intaktne stijene:

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

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

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

- 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.



- istraživanjem su razvili 4 različita izraza za ovisnost modula deformacije o rezultatu RMR klasifikacije (slika)



Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

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

$$E_m = e^{\frac{\text{RMR}-10}{18}}$$

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

$$E_m = 147.280 \cdot e^{\frac{\text{RMR}-100}{24}} - 0.202 \text{ RMR}$$

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

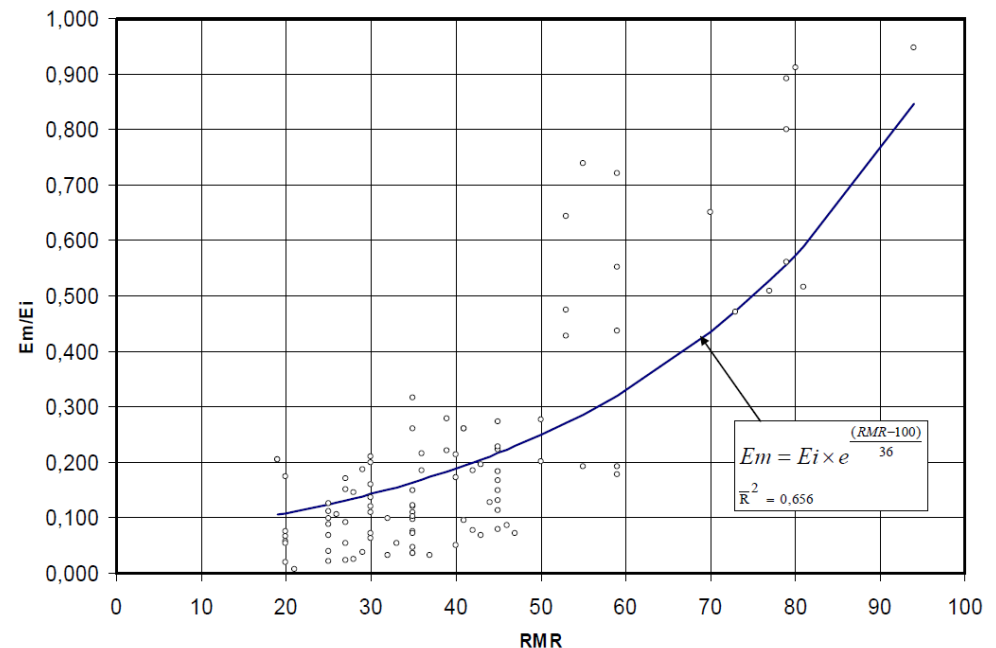
$$E_m = 0.0876 \text{ RMR} \quad (\text{RMR} < 50)$$

$$E_m = 0.0876 \text{ RMR} + 1.056(\text{RMR} - 50) + 0.015(\text{RMR} - 50)^2 \quad (\text{RMR} > 50)$$

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

$$E_m = E_i \cdot e^{\frac{RMR-100}{36}}$$

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.





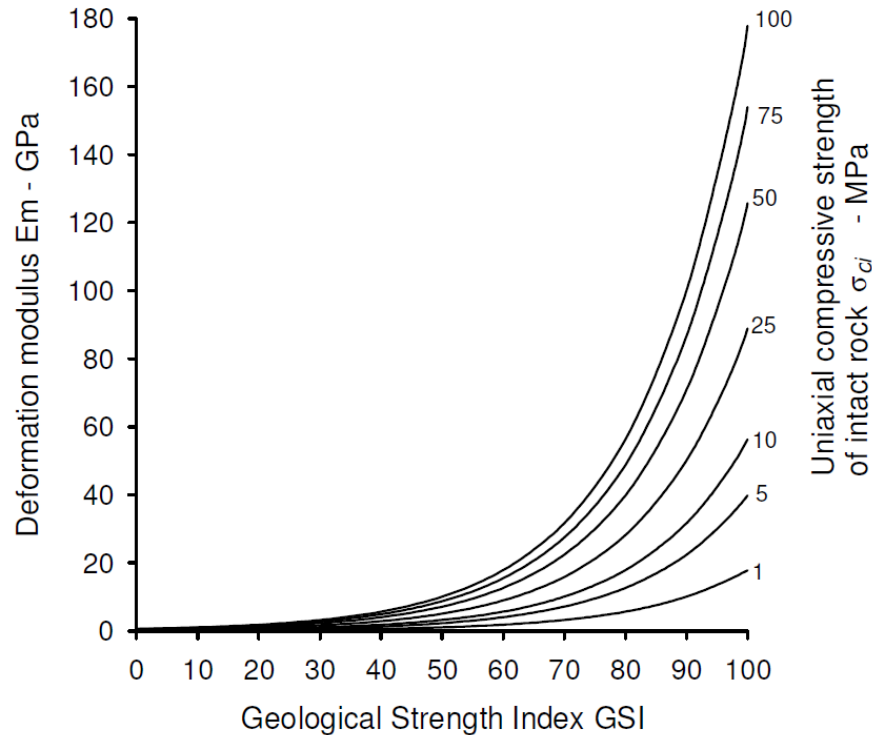
5) GSI

- Geološki indeks čvrstoće (GSI) razvio je Hoek (1994).
- 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: blokovitosti i značajkama diskontinuiteta, čime se na terenu vrlo jednostavno dobiva indeksni pokazatelj koji je u velikoj mjeri ovisan o osnovnim geološkim značajkama stijena

- 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 Pereire 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:

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}$$

- 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*.



- Primjena tog izraza kod projektiranja velikih iskopa, kod kojih dolazi do velike relaksacije naprezanja te kod onih koji se izvode miniranjem, rezultirala je u nekim slučajevima *značajno većim pomacima* od projektom predviđenih.

*Ovisnost modula deformacije o vrijednosti GSI
za različite vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće
intaktnog uzorka stijene σ_{ci} .*

- 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:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}$$

- gdje je **D** faktor poremećenosti koji ovisi o stupnju poremećenosti stijenske mase uslijed oštećenja nastalih miniranjem i relaksacijom.
- Vrijednost **D** varira od:
 - 0 za neporemećenu stijensku masu in situ
 - do 1 za znatno poremećenu stijensku masu

- Faktor poremećenosti D

Application: ☒ Tunnels ☐ Slopes



Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.



Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.

Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.



Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.

Application: ☐ Tunnels ☒ Slopes



Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.



Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal.

In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.

D=0

D=0

D=0.5
No Invert

D=0.8

D=0.7
Good Blasting

D=1.0
Poor Blasting

D=1.0
Production Blasting

D=0.7
Mechanical Excavation

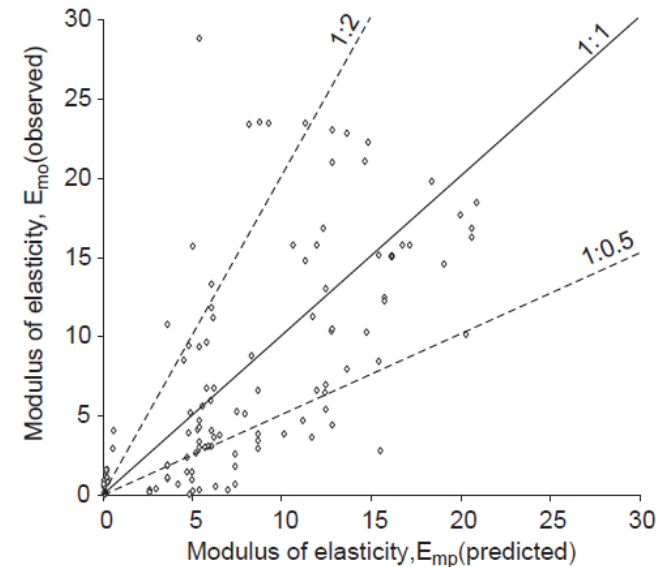
- **Sonmez, Gokceoglu i Ulusay** na bazi od 115 rezultata terenskih ispitivanja modula deformacije na branama i hidroelektranama u Turskoj predložili su izraz:

$$E_m = E_i (s^a)^{0.4}$$

gdje su s i a konstante
koje su dali Hoek,
Carranza-Torres i Corkum
(2002)

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$





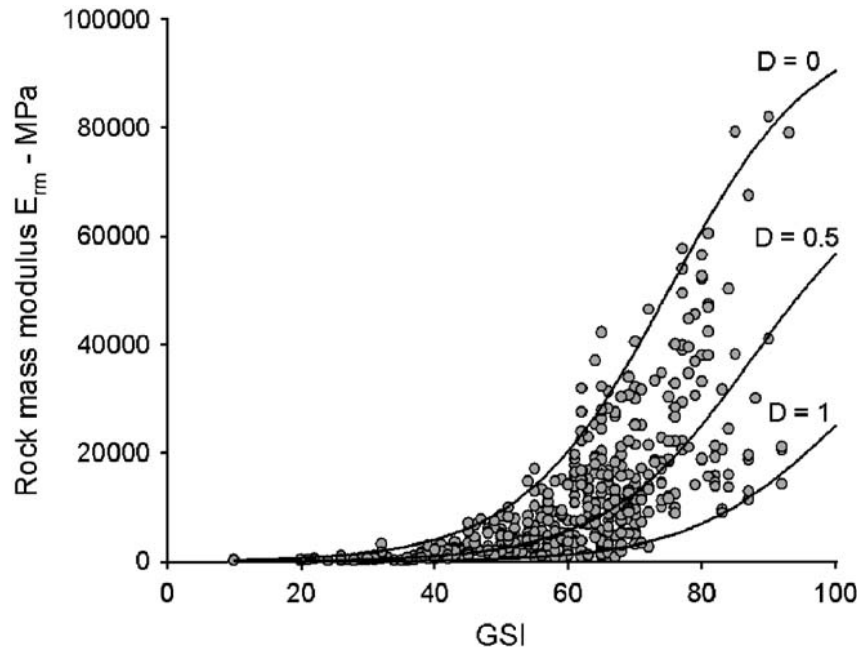
Određivanje krutosti pomoću klasifikacija stijenske mase

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- 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 slijedeći izraz za E_m (MPa):

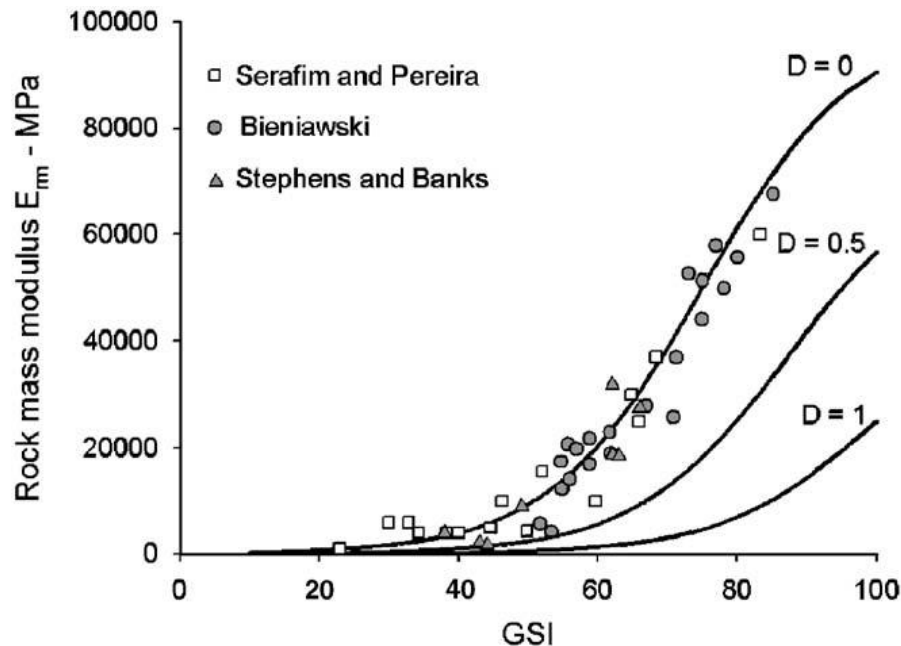
$$E_m = 100,000 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right)$$

- Izraz ne uključuje modul elastičnosti intaktnog uzorka (E_i)



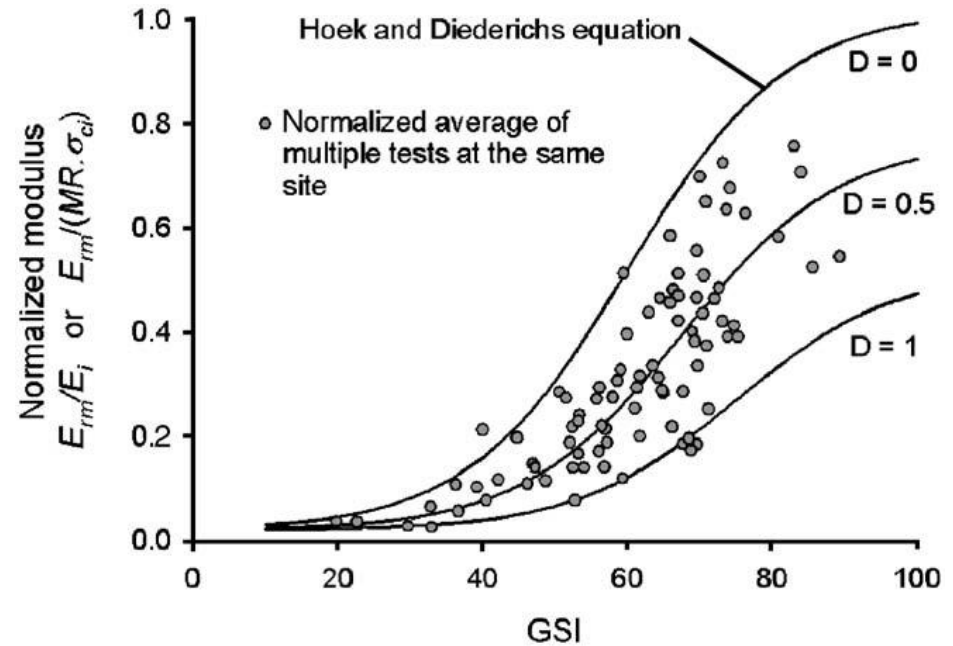
Ako se u dobiveni izraz stavi $D = 0.5$ (*djelomično poremećena stijenska masa*) dobija se središnja krivulja na slici lijevo koja najbolje aproksimira sve rezultate mjerenja. Gornja i donja krivulja predstavljaju *neporemećenu* ($D = 0$) i *potpuno poremećenu* stijensku masu ($D = 1$).

- Napravili su i **usporedbu** modula deformacije dobivenog pomoću prikazanog izraza sa rezultatima terenskih ispitivanja koje su objavili Bieniawski, Serafim i Pereira te Stephen i Banks i pokazali da se dobiveni moduli dobro poklapaju sa izmjerjenima ako se pretpostavi da za vrijeme pokusa nije došlo do poremećenja stijenske mase.



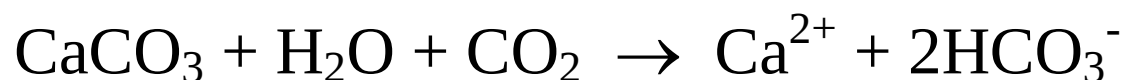
- U prošli izraz nije uključen modul elastičnosti intaktnog uzorka (E_i) što ima ranije opisana ograničenja. Da bi to prevladali napravili su analizu **uključivši** samo one rezultate za koje su imali E_i i predložili slijedeći izraz:

$$E_m = E_i \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$





- Karbonatne stijene, za koje su najčešće vezani krški prostori prostiru se na oko 30 milijuna km² ili na oko 20% ukupne svjetske kopnene površine.
- “Klasični krš” zauzima više od polovice površine (54%) Hrvatske ili preko 70% ako se uzme u obzir i hrvatsko Jadransko podmorje u kojem prevladavaju karbonatne stijene podložne okršavanju.
- Krš se razvija u topivim stijenama gdje voda kroz dugi niz godina, uz pomoć ugljičnog dioksida, otapa karbonatne stijene što dovodi do procesa okršavanja.
- Proces otapanja karbonatnih vapnenačkih stijena, okršavanje ili karstifikacija zove se još i korozija vapnenaca. Kemijska jednažba korozije vapnenca glasi:





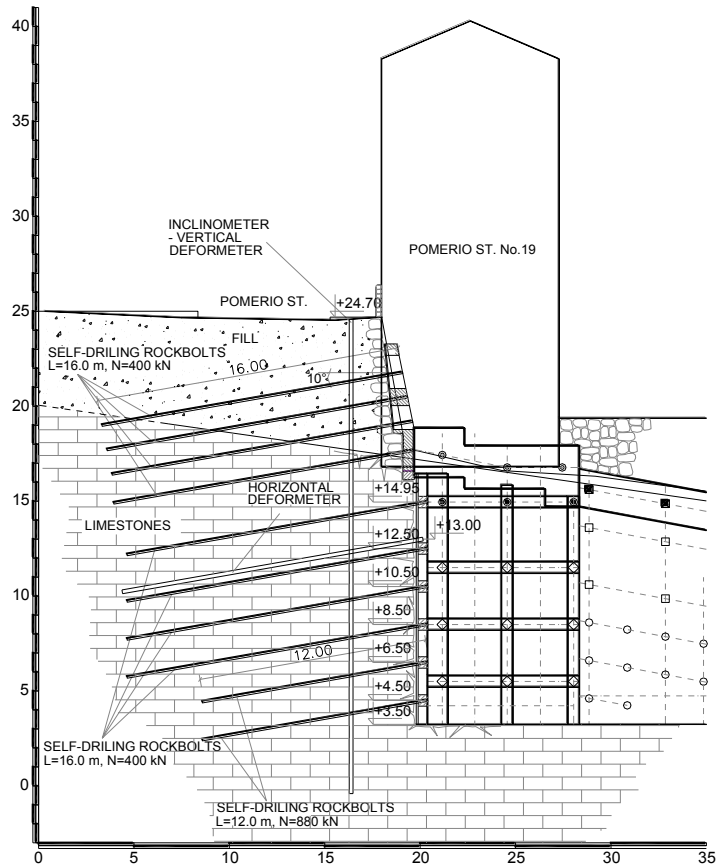
Primjenjivost klasifikacija za određivanje krutosti u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

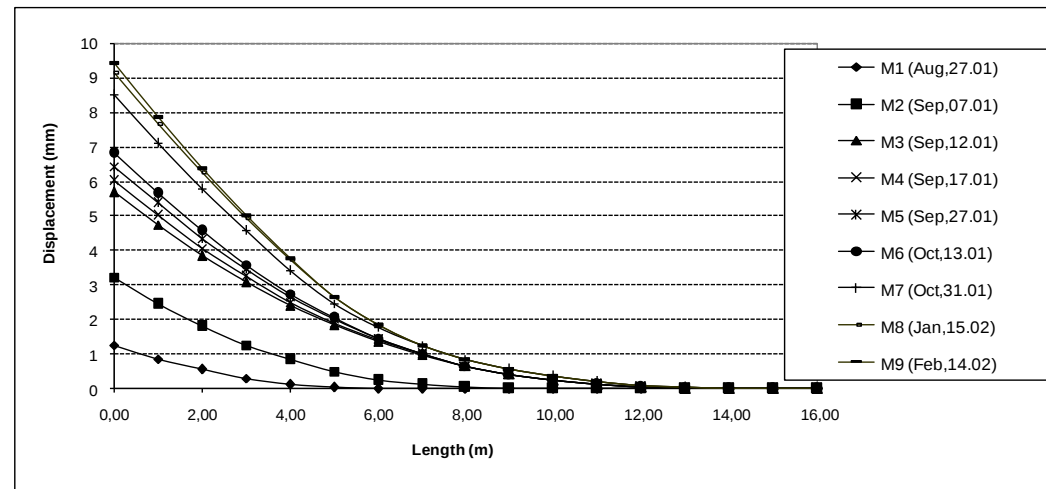
- Karbonatne stijene hrvatskog krša razlikuju se od ostalih stijenskih sustava, u kojima su provedena dosad spomenuta istraživanja koja su rezultirala korelacijama između krutosti i klasifikacije stijenske mase.
- U Hrvatskoj su u posljednjih 15 godina provedena vrlo intenzivna mjerenja na svim značajnijim geotehničkim objektima izvedenim u kršu Hrvatske. Stečena su iznimno velika iskustva i stvorena je značajna baza podataka neophodna za stjecanje novih spoznaja o krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske.

- **Poslovno-stambeni kompleks “Zagrad”** u Rijeci u svom podzemnom dijelu je javna garaža, a u nadzemnom dijelu poslovno stambena građevina.





Za vrijeme izvedbe profila sjever kontinuirano su vršena mjerenja horizontalnih i vertikalnih deformacija stijenske mase vertikalnim inklinometrom/deformetrom duljine 25 m i horizontalnim deformetrom duljine 16 m.

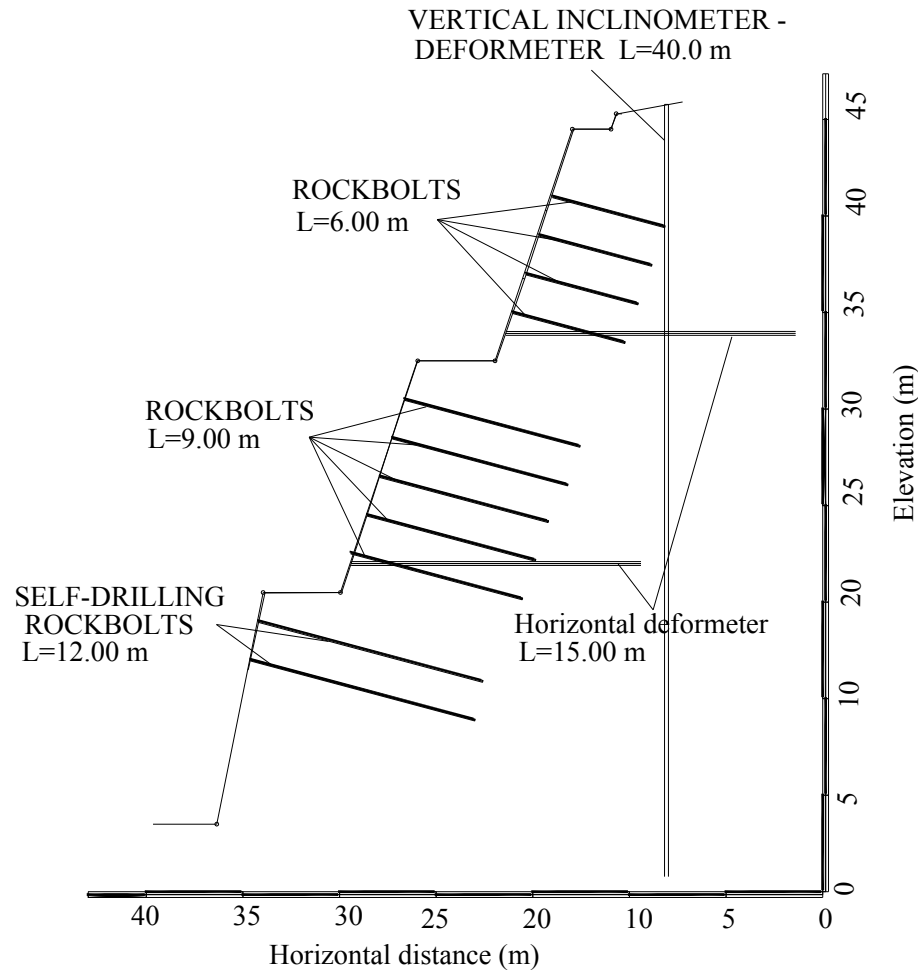


Dobiveno je da je stvarni modul deformabilnosti **32 puta manji** od dobivenog preko izraza koji su predložili Serafim i Pereira.

- **Brodogradilište “Viktor Lenac”** – izveden je stijenski pokos visine 35 do 55 m.



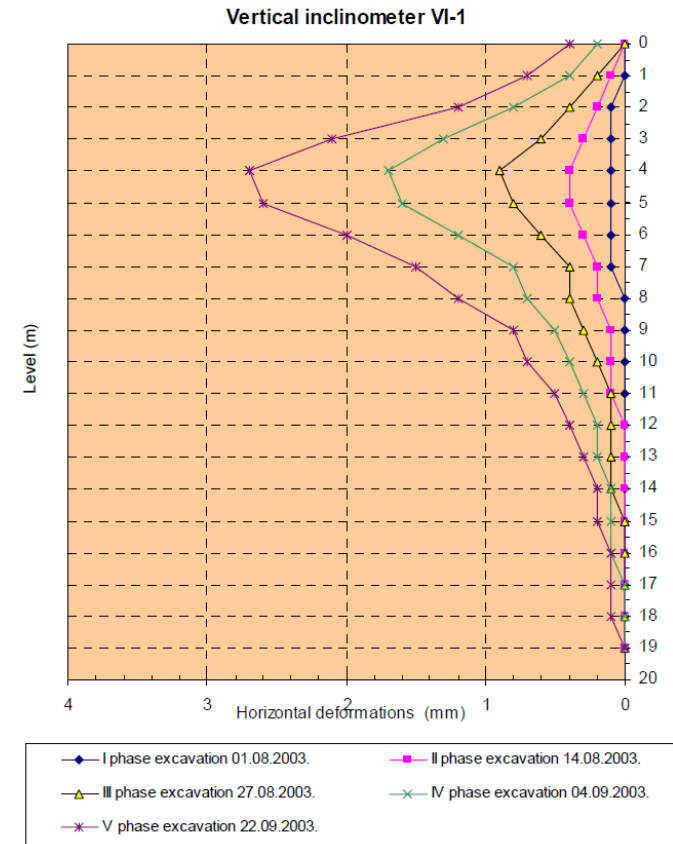
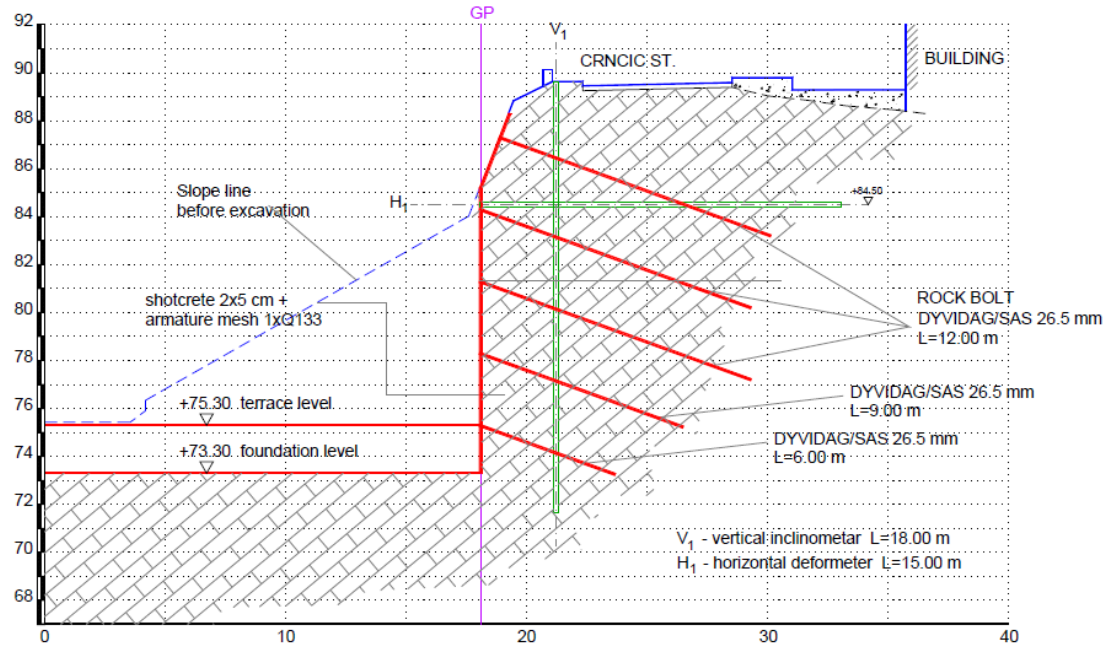
- Vršena su mjerenja horizontalnih i vertikalnih deformacija stijenske mase vertikalnim inklinometrom/deformetrom duljine 40 m i 2 horizontalna deformetra duljine 15 m.



- Dobiveno je da je stvarni modul deformabilnosti **24 puta manji** od dobivenog preko izraza kojeg su predložili Serafim i Pereira.

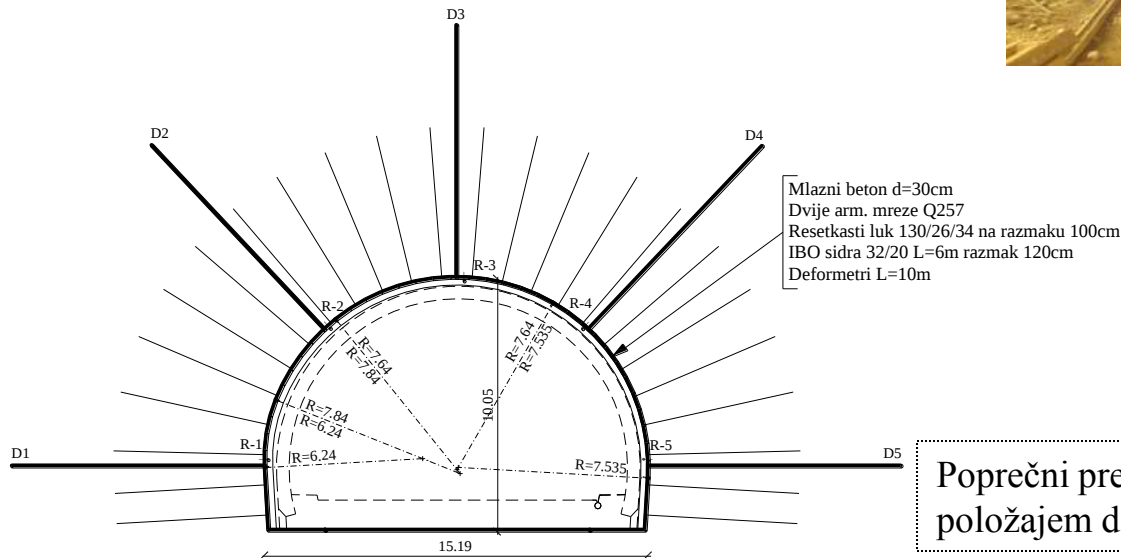
- Trgovački centar “Kaufland”, Rijeka



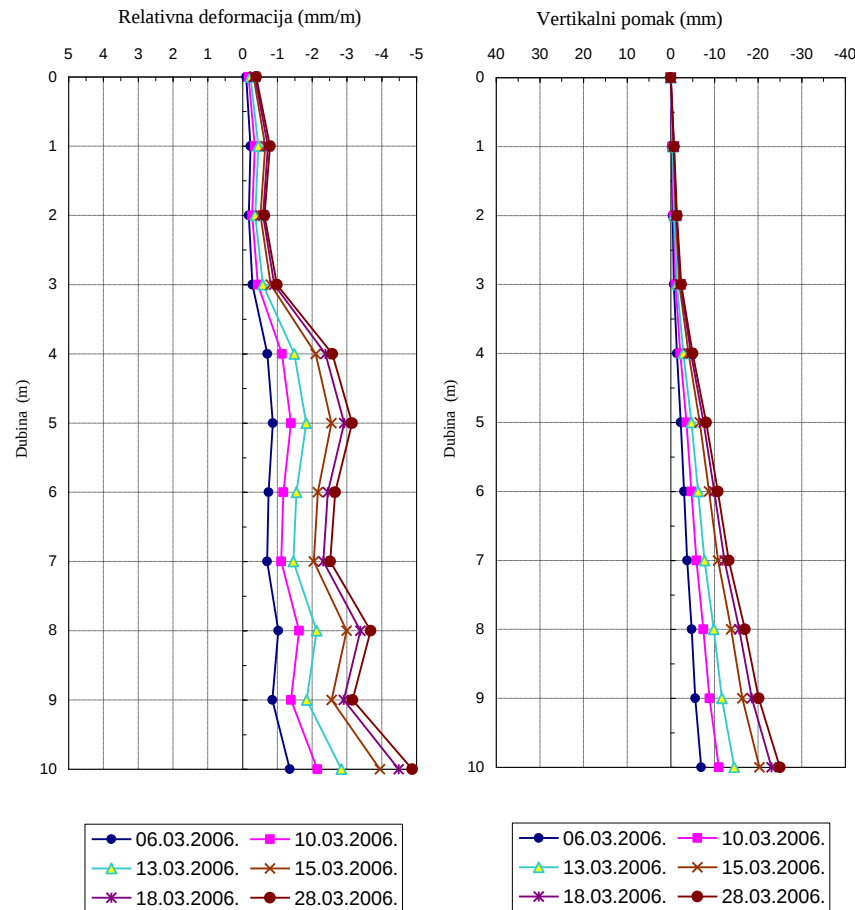


- Dobiveno je da je stvarni modul deformabilnosti **28 puta manji** od dobivenog preko izraza koji su predložili Serafim i Pereira.

- **Tunel “Pećine”** građen je kao 4-tračni tunel s vrlo malim nadslojem.



Poprečni presjek tunela s naznačenim položajem deformetara



- Dobiveno je da je stvarni modul deformabilnosti **22 puta manji** od dobivenog preko izraza koji su predložili Serafim i Pereira.



Primjenjivost klasifikacija za određivanje krutosti u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- 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, provedena za vrijeme izvedbe, pokazala su da su izmjerene *deformacije znatno veće* od onih dobivenih proračunima te da su *izmjereni oblici deformacija po dubini značajno različiti* od proračunatih.
- Istraživanja vezana uz problematiku krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu rezultirala su **izrazom Jurić-Kaćunić (2009)** čije dobivanje je detaljnije objašnjeno u nastavku.



Parametri koji utječu na krutost karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Na osnovi svojih istraživanja Pollak zaključuje da opis trošnosti stijenki diskontinuiteta, koji preporučuje Bieniawski, ne odgovara značajkama karbonatnih stijenskih masa i preporučuje modificirani opis trošnosti stijenki diskontinuiteta.
- Iako su za GSI klasifikaciju Marinos i Hoek izradili tablicu procjena GSI vrijednosti u karbonatnim vapnenačkim stijenskim masama, Pollak ističe da je problem u tomu što na taj način nije moguće odrediti značajke ispune diskontinuiteta karakteristične za karbonatne stijene u kršu Hrvatske, ali i kvantificirati širine diskontinuiteta, koje se značajno povećavaju u trošnijim zonama karbonatnih stijena.
- 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.**



Parametri koji utječu na krutost karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- 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.**



Parametri koji utječu na krutost karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Trošenjem karbonatnih stijena, kao i izvedbom građevinskih radova dolazi do značajne *promjene u krutosti* stijenske mase, što je dobar je pokazatelj stupnja poremećenosti odnosno oslabljenja 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

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Da je sekantni modul elastičnosti odnosno **modul deformacije** stijenske mase za karbonatne krške naslage vapnenaca i dolomita **ovisan o kvadratu brzine širenja uzdužnih valova** i u području velikih deformacija pokazao je više ispitivanja.
- Ta ispitivanja imaju poseban značaj jer se sa velikom sigurnošću može tvrditi da se u zoni ispitivanja ne mijenjaju drugi parametri koji utječu na krutost kao što su: rezultati klasificiranja stijenske mase, moduli elastičnosti odnosno čvrstoća intaktne stijene ili stupanj trošnosti odnosno model 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.*



Određivanje krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Već je istaknuto da su mnoga istraživanja širom svijeta pokazala da se krutost **ne može izravno povezati** s rezultatima klasificiranja stijenske mase. No, zato su vrlo relevantna istraživanja pokazala da se **brzina širenja uzdužnih valova može izravno povezati s rezultatima klasificiranja**.
- Na temelju rezultata opsežnih istražnih radova provedenih za gradnju Norveške olimpijske podzemne dvorane u Gjøviku i nekih drugih lokacija Barton je predložio izraz koji **povezuje rezultat GSI klasifikacije i brzinu širenja uzdužnih valova**:

$$\text{GSI} = 15V_p - 7.5$$

- Vidljivo je da rezultati vrlo opsežnih istraživanja ukazuju na **linearnu povezanost** rezultata GSI klasifikacije i brzine širenja uzdužnih valova.



Određivanje krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Na temelju terenskih i geofizičkih ispitivanja te rezultata klasificiranja Jašarević i Kovačević su povezali module deformacije sa rezultatima klasificiranja i brzinama širenja uzdužnih valova.
- Uspostavili su sljedeće ovisnosti:

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

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

- Pomoću izraza koji povezuju V_p , RMR i GSI, dobili su izraz:

$$\text{GSI} = 11.1V_p - 11.7$$

- Ova istraživanja provedena upravo u karbonatnim stijenama u kršu Hrvatske *potvrđuju linearnu povezanost* rezultata GSI klasifikacije i brzine širenja uzdužnih valova.



Određivanje krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Obzirom da je pokazano da je krutost proporcionalna kvadratu brzine širenja uzdužnih valova, a da je brzina širenja uzdužnih valova linearno proporcionalna rezultatima GSI klasifikacije, matematički je jasno da je krutost proporcionalna kvadratu rezultata GSI klasifikacije.
- Na temelju prethodnih razmatranja, 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:

$$E_m = IK_s \cdot GSI^2 \cdot V_p^2$$

izraz Jurić-Kaćunić (2009)

- gdje je E_m u [GPa], GSI u [%] i V_p u km/s.



Verifikacija određivanja krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu prema izrazu Jurić-Kaćunić

- Pouzdanost prognoze deformacija izvedenih geotehničkih konstrukcija korištenjem novog pristupa za određivanje krutosti testirana je na primjerima izvedbe zaštite građevne jame dvoranskog plivališta Kantrida u Rijeci te iskopu i ugradnji primarne podgrade u tunelu Bobova na državnoj cesti D404.
- Oba složena geotehnička zahvata izvedena su u karbonatnim stijenama hrvatskog krša. Usporedba proračunatih i izmjerenih deformacija obje geotehničke građevine omogućila je verificiranje postavljene hipoteze u ovom istraživanju.
- Za numeričko modeliranje odabran je komercijalni program FLAC kojim se omogućava da se za svaki konačni element neovisno zadaju potrebni parametri za proračun.



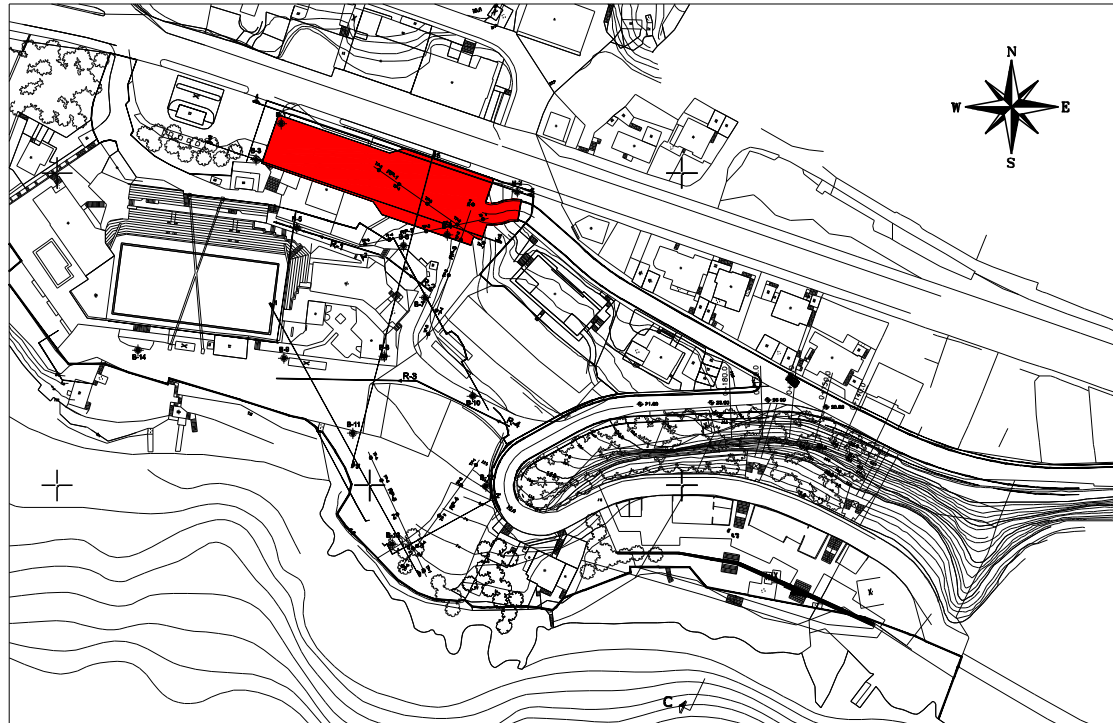
Određivanje krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- 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-Kaćunić, 2009.

Dvoransko plivalište Kantrida

- Za potrebe izvedbe građevne jame tlocrtnih dimenzija 74x24 m i najveće dubine iskopa 14 m, provedeni su sondažni, geofizički, inženjersko-geološki i geotehnički terenski i laboratorijski istražni radovi.

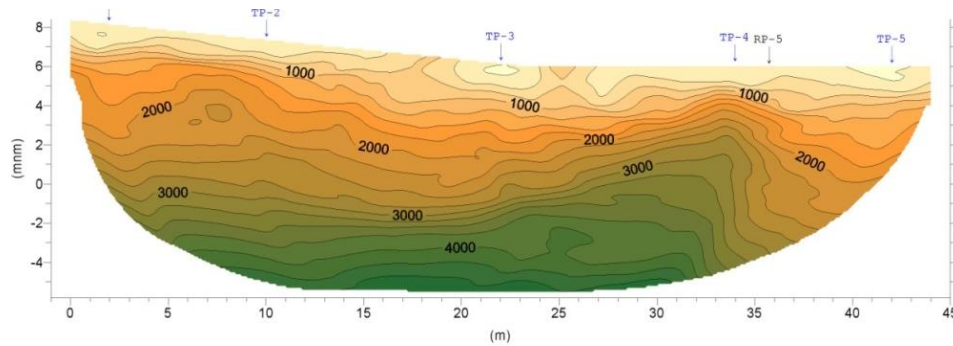




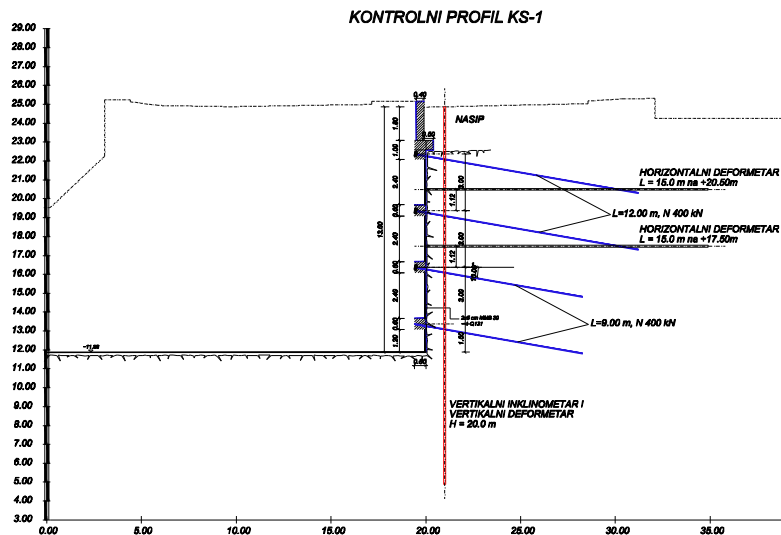
Određivanje krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

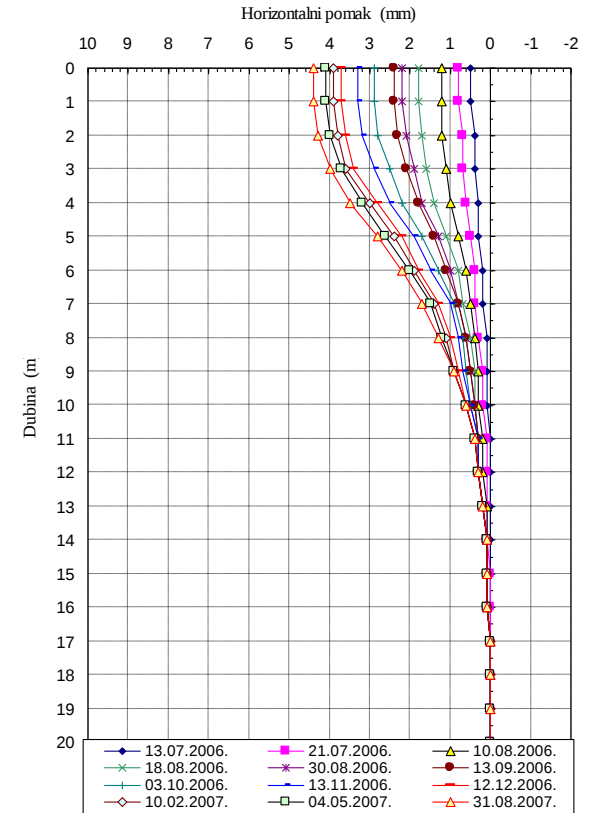
- Obzirom na rasprostiranje i trošnost stijenske mase u području građevne jame, definirano je postojanje gornje površinske trošne zone stijenske mase debljine površinskih 6 do 8 m te relativno manje trošne zone stijenske mase na većoj dubini.
- Prema rezultatima laboratorijskih istražnih radova i klasifikacije stijenske mase, za gornju zonu odabran je **GSI=29 i IKs=0.3**, a za donju zonu **GSI=40 i IKs=0.4**.



Rezultati mjerenja profila brzine širenja uzdužnih valova po dubini metodom seizmičke refrakcije

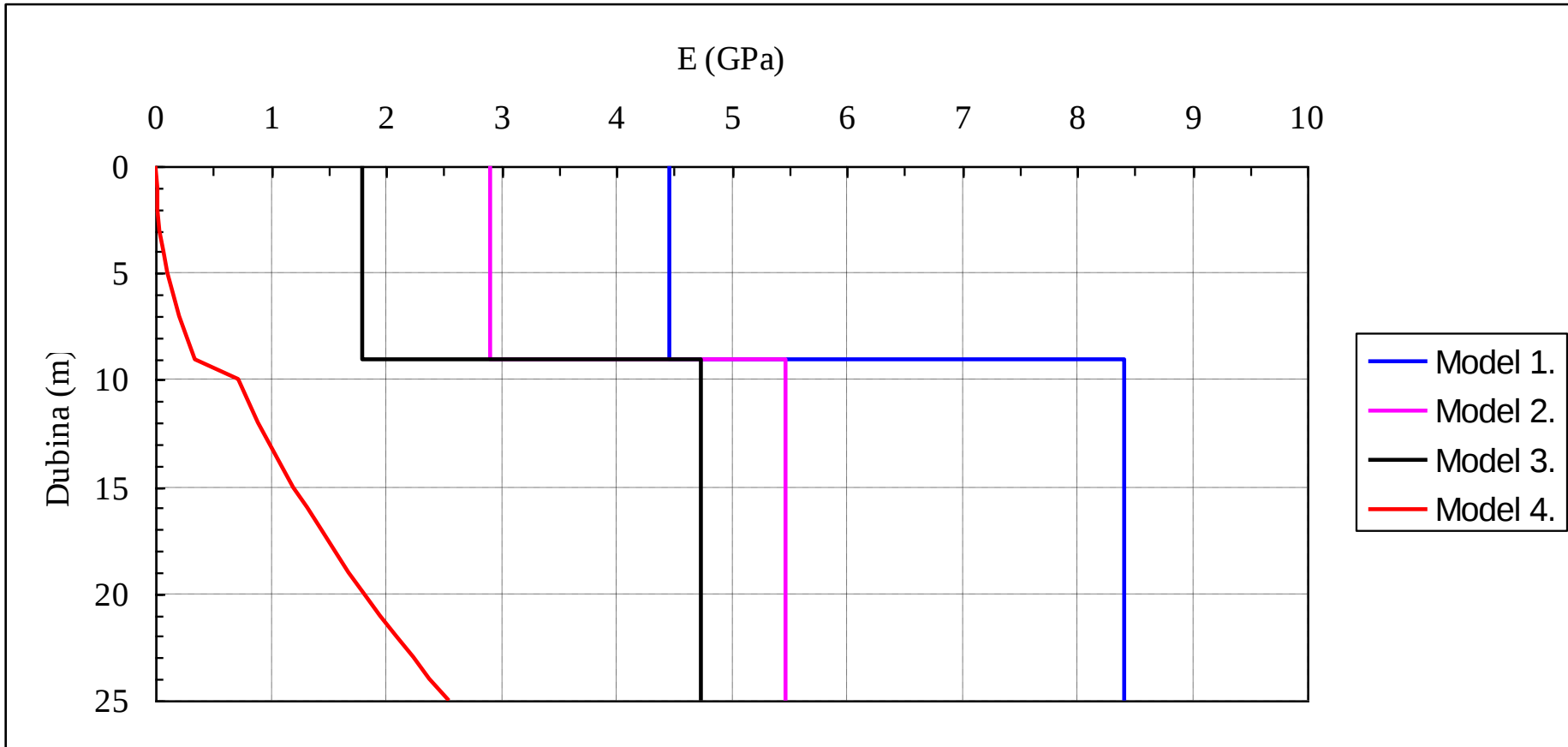


Pozicije mjerne opreme na profilu KS-1

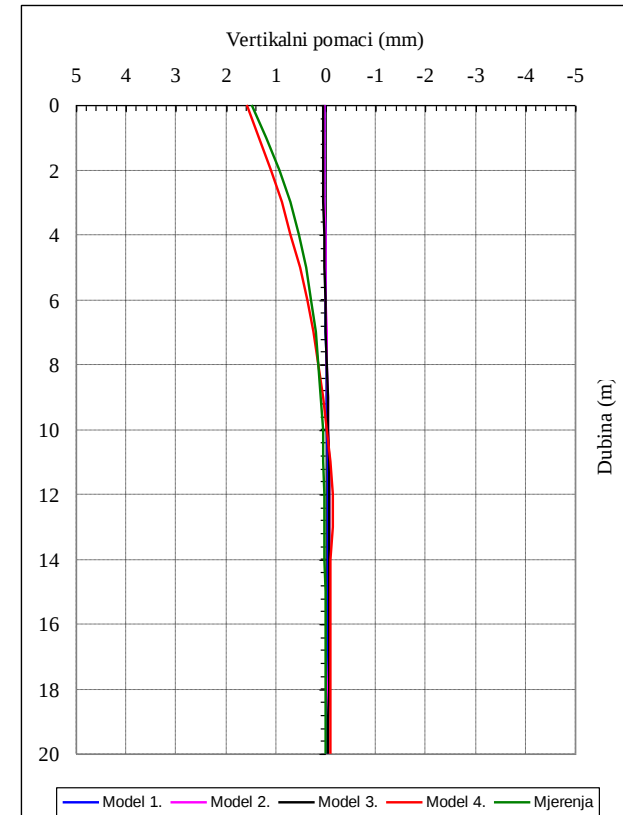
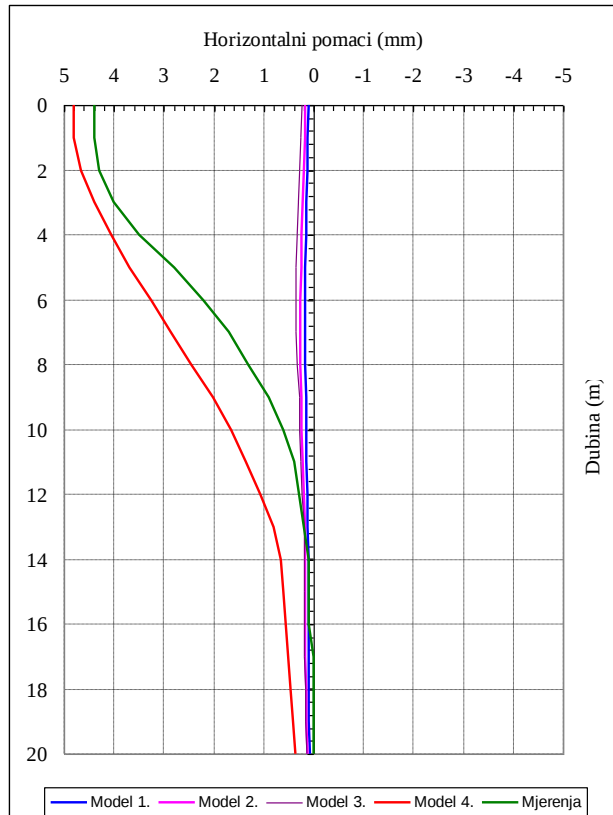


Rezultati mjerenja vertikalnog inklinometra na profilu KS-1

- Korištena su otprije navedena 4 modela određivanja krutosti stijenske mase

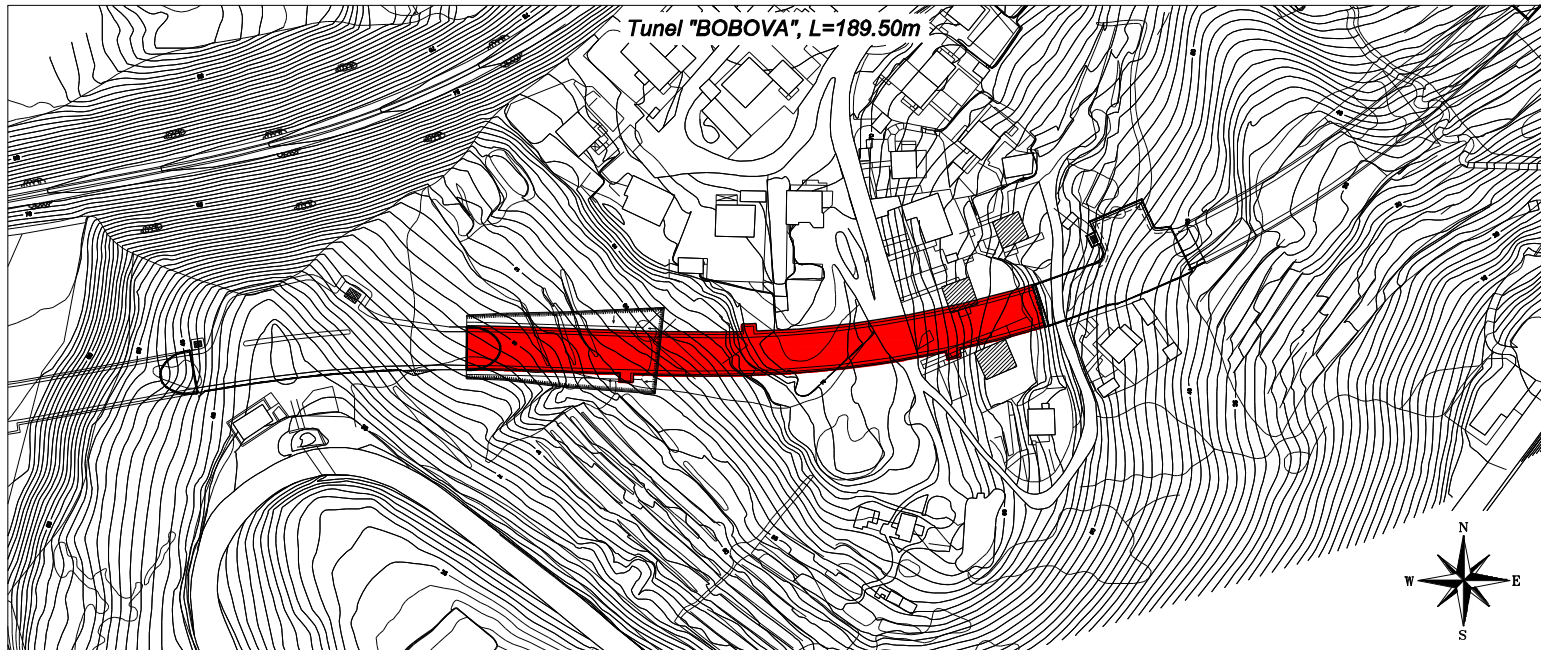


- U programskom paketu FLAC korištena su usporedno sva 4 modela i tako dobiveni rezultati pomaka stijenske mase za svaki od modela su uspoređeni s podacima mjerenja.

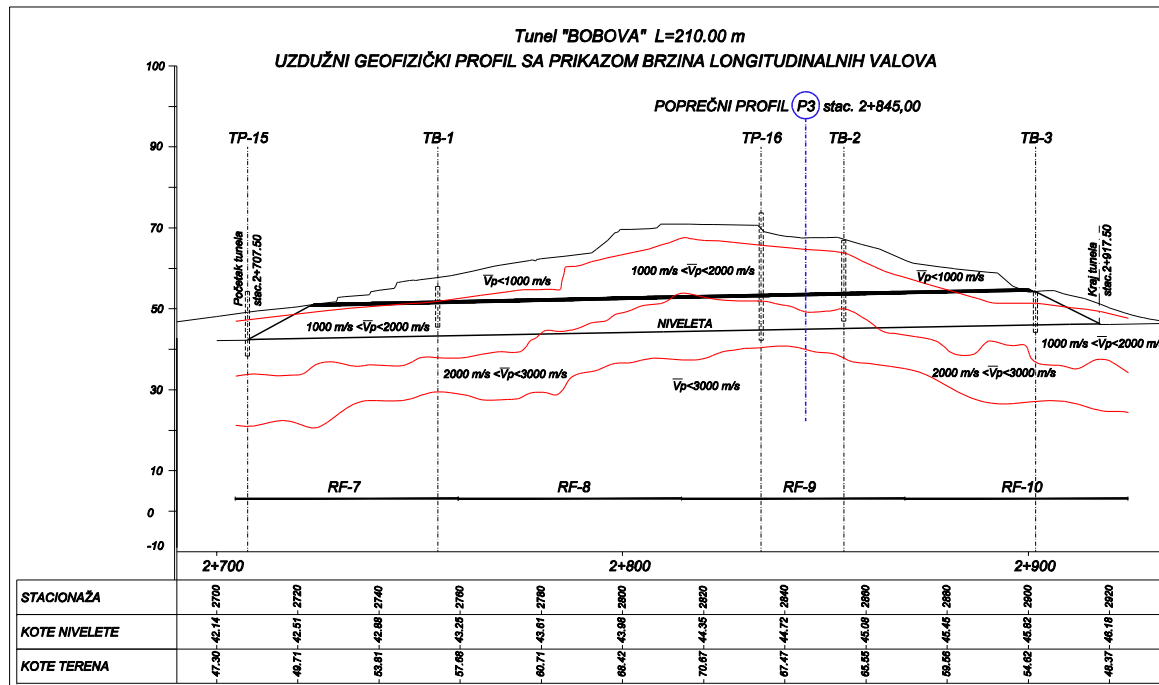


Tunel Bobova

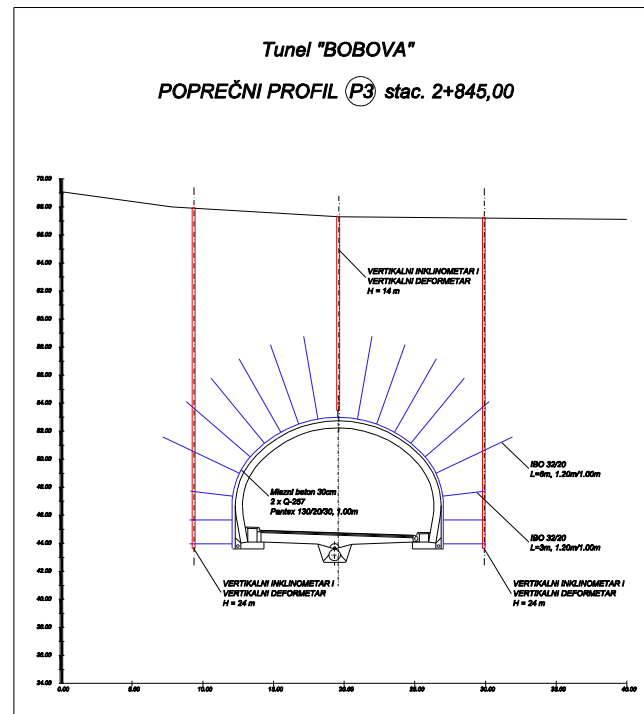
- Tunel Bobova, probijen 2005. godine, nalazi se na državnoj cesti D404 i prolazi ispod dijela gradskog područja Vežica – Sušak u Rijeci. Tunel je dug 189.50 m i cijelom dužinom izveden je kao trotračni tunel.



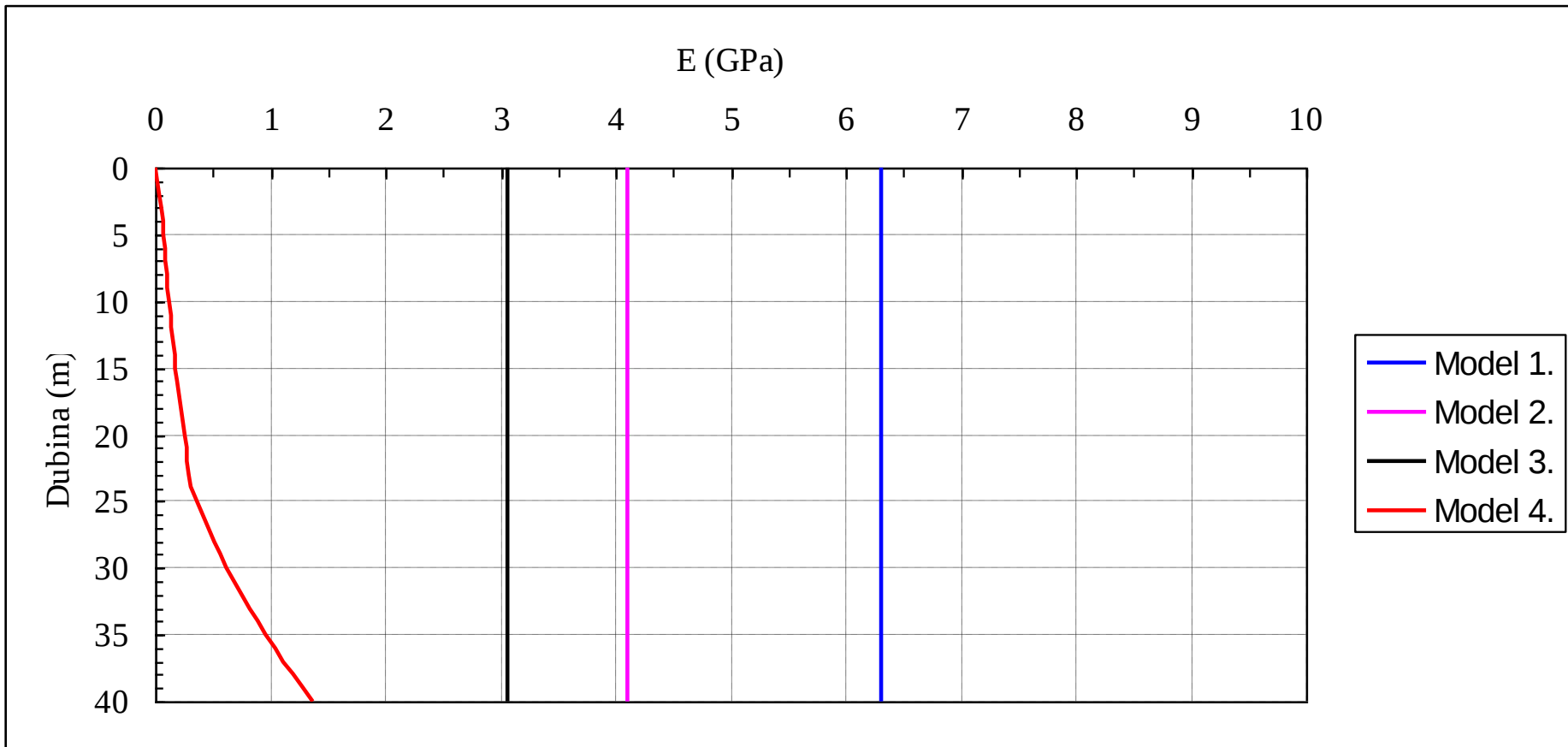
- Za potrebe izrade projekta tunela, provedena su predhodna inženjersko-geološka istraživanja i ispitivanja kao i ispitivanje na uzorcima u laboratoriju. Za vrijeme izvedbe vršena su i geotehnička mjerenja koja su poslužila za verifikaciju novog pristupa određivanja krutosti.



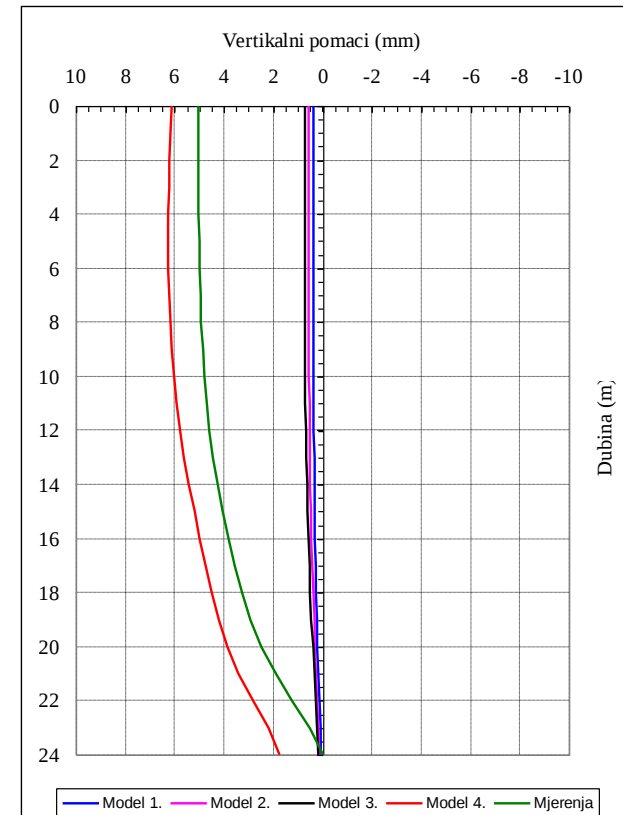
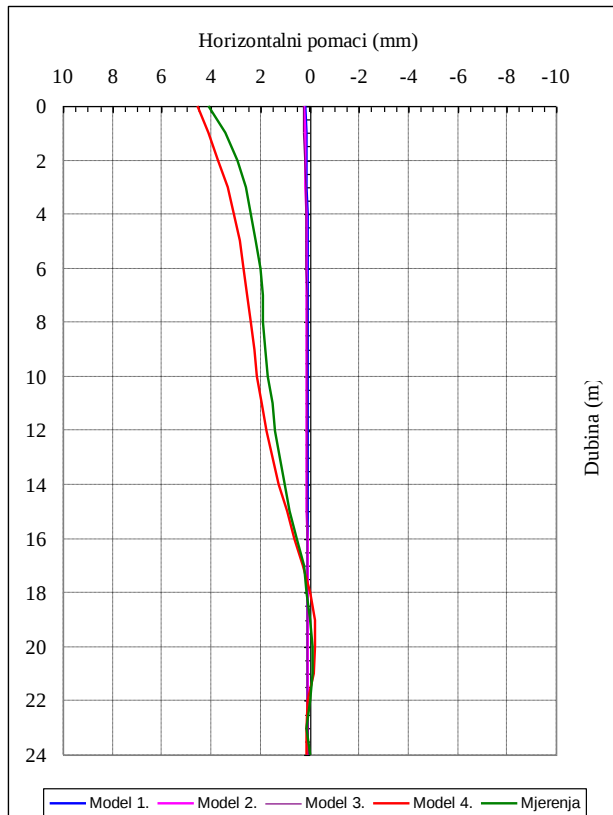
- Na osnovi rezultata provedenih istražnih radova procijenjeni su, na kontrolnom profilu P3, prosječna jednoosna tlačna čvrstoća $\sigma_c = 75$ kPa, GSI=37 i IKs=0.4.
- Za vrijeme izvedbe kontrolnog profila P3 kontinuirano su vršena mjerenja horizontalnih i vertikalnih deformacija stijenske mase vertikalnim inklinometrima i kliznim deformetrima duljine 24 m.



- Korištena su otprije navedena 4 modela određivanja krutosti stijenke mase



- U programskom paketu FLAC korištena su usporedno sva 4 modela, i tako dobiveni rezultati pomaka stijenske mase za svaki od modela su uspoređeni s podacima mjerenja.



- U tablicama su prikazane usporedbe maksimalnih proračunatih i izmjerenih horizontalnih i vertikalnih pomaka kod zaštite građevne jame dvoranskog plivališta Kantrida u Rijeci te kod iskopa tunela Bobova.

KANTRIDA	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Mjerenja
Xdis (mm)	0.172	0.263	0.366	4.807	4.4
Ydis (mm)	0.045	0.070	0.077	1.587	1.481

BOBOVA	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Mjerenja
Xdis (mm)	0.149	0.222	0.285	4.526	4.1
Ydis (mm)	0.380	0.566	0.733	6.511	5.047

- Model 4 prognozira 10 odnosno 30% veće horizontalne i vertikalne pomake od izmjerenih na istim dubinama. Relativno lošija prognoza vertikalnih pomaka u odnosu na horizontalne može se pripisati maloj dubini ugrađenog inklinometra zbog čega je izgubljen dio ukupne deformacije odnosno pomaka.



Određivanje krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Rezultati proračuna deformacija stijenske mase kod iskopa građevne jame plivališta Kantrida te tunela Bobova, za modele 1, 2 i 3 kao i u slučaju zaštite građevne jame, pokazuju značajno manje horizontalne i vertikalne pomake od izmjerenih, uz istovremeno značajne razlike u distribuciji horizontalnih i vertikalnih pomaka po dubini u odnosu na mjerenja.
- Model 4 pokazuje relativno dobra slaganja sa izmjerenim veličinama horizontalnih i vertikalnih pomaka te vrlo dobra slaganja sa distribucijom izmjerenih horizontalnih i vertikalnih pomaka po dubini.
- Usporedba proračunatih i izmjerenih deformacija ukazuje na **pouzdanost** njihove prognoze korištenjem izraza Jurić-Kaćunić pri određivanju krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske.