

# Novi pristup određivanju krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu

---

Jurić-Kaćunić, Danijela; Arapov, Ivan; Kovačević, Meho Saša

Source / Izvornik: **Građevinar, 2011, 63, 177 - 185**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:599896>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Novi pristup određivanju krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu

Danijela Jurić-Kačunić, Ivan Arapov, Meho Saša Kovačević

## Ključne riječi

hrvatski krš,  
karbonatna stijena,  
stijenska masa,  
krutost,  
geološki indeks čvrstoće,  
uzdužni valovi

## Key words

Croatian karst,  
carbonate rock,  
rock mass,  
stiffness,  
geological strength index,  
longitudinal waves

## Mots clés

karst croate,  
roche carbonique,  
masse rocheuse,  
rigidité,  
indice géologique  
de la résistance,  
ondes longitudinales

## Ключевые слова

карстовый грунт  
Хорватии,  
карбонатная порода,  
масса породы,  
жесткость,  
геологический индекс  
прочности,  
продольные волны

## Schlüsselworte

kroatischer Karst,  
Karbonatgestein,  
Gesteinsmassiv,  
Steifigkeit,  
geologischer  
Festigkeitsindex,  
Längswellen

D. Jurić-Kačunić, I. Arapov, M. S. Kovačević

Izvorni znanstveni rad

## Novi pristup određivanju krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu

Opisuje se razvoj novog pristupa određivanju krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu čija bi primjena omogućila pouzdanije prognoziranje deformacija geotehničkih konstrukcija. Istraživanja su pokazala da na krutost karbonatnih stijena utječu: geološki indeks čvrstoće, brzina širenja uzdužnih valova i indeks krutosti stijenske mase, a krutost je jednaka umnošku indeksa krutosti stijenske mase, kvadrata geološkog indeksa čvrstoće i kvadrata brzine širenja uzdužnih valova.

D. Jurić-Kačunić, I. Arapov, M. S. Kovačević

Original scientific paper

## New approach to the determination of stiffness of carbonate rocks in Croatian karst

The development of a new approach to the determination of stiffness of carbonate rocks in Croatian karst is described. The application of this approach will enable a more reliable prediction of deformations in geotechnical structures. Investigations have shown that the stiffness of carbonate rocks is influenced by: geological strength index, velocity of propagation of longitudinal waves, and rock mass stiffness index, and that the stiffness is equal to the product of the rock mass stiffness index, square of the geological strength index, and square of the velocity of propagation of longitudinal waves.

D. Jurić-Kačunić, I. Arapov, M. S. Kovačević

Ouvrage scientifique original

## Une nouvelle approche à la détermination de la rigidité des roches carboniques dans le karst croate

Le développement d'une nouvelle approche à la détermination de la rigidité des roches carbonées dans le karst croate est décrit. L'application de cette approche permettra une prévision plus fiable des déformations dans les structures géotechniques. Les études ont montré que la rigidité des roches carbonées est influencée par: l'indice géologique de la résistance, vitesse de propagation des ondes longitudinales et l'indice de rigidité de la masse rocheuse, et que la rigidité est égale au produit de l'indice de rigidité de la masse rocheuse, au carré de l'indice géologique de la résistance, et au carré de la vitesse de propagation des ondes longitudinales.

Д. Юрич-Качунич, И. Арапов, М. С. Ковачевич

Оригинальная научная работа

## Новый подход к определению жесткости карбонатных пород карстовых грунтов Хорватии

Описывается разработка нового подхода при определении жесткости карбонатных пород карстового грунта Хорватии, применение которого даст возможность более надежно прогнозировать деформации геотехнических конструкций. Исследования показывают, что на жесткость карбонатных пород оказывают влияние геологический индекс прочности, скорость распространения продольных волн и индекс жесткости массы породы, а жесткость равна произведению индекса жесткости массы породы с квадратом геологического индекса прочности и квадратом скорости распространения продольных волн.

D. Jurić-Kačunić, I. Arapov, M. S. Kovačević

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Ein neuer Zutritt zur Bestimmung der Steifigkeit des Karbonatgesteins in Kroatien

Man beschreibt die Entwicklung eines neuen Zutritts zur Bestimmung der Steifigkeit des Karbonatgesteins im kroatische Karst, dessen Anwendung ein zuverlässigeres Prognosieren der Verformungen bodentechnischer Konstruktionen ermöglichen könnte. Forschungen zeigten dass auf die Steifigkeit des Karbonatgesteins Einfluss haben: geologischer Festigkeitsindex, Geschwindigkeit der Verbreitung von Längswellen und der Steifigkeitsindex des Gesteinsmassivs, und dass die Steifigkeit dem Produkt des Steifigkeitsindex des Gesteinsmassivs, des Quadrats des geologischen Festigkeitsindex und des Quadrats der Geschwindigkeit der Verbreitung der Längswellen entspricht.

Autori: Dr. sc. **Danijela Jurić-Kačunić**, dipl. ing. građ.; **Ivan Arapov**, dipl. ing. građ.;  
prof. dr. sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## 1 Uvod

Intenzivna mjerenja za vrijeme izvedbe geotehničkih zahvata u karbonatnim stijenama hrvatskog krša pokazala su da su izmjerene deformacije znatno veće od onih dobivenih proračunima u kojima su primijenjeni parametri krutosti dobiveni preko postojećih veza sa klasifikacijama stijenske mase te da su izmjerene oblici deformacija po dubini značajno različiti od proračunatih odnosno projektom očekivanih [1].

Razvoju novog pristupa prethodila je sustavna analiza raspoloživih spoznaja i pristupa određivanju krutosti stijenske mase. Istražena je primjenjivost laboratorijskih ispitivanja krutosti intaktnih uzoraka stijenske mase. Pokazano je da se zbog malog volumena koji zahvaćaju, rezultati ovih ispitivanja ne mogu izravno primjenjivati u numeričkim analizama deformacija geotehničkih konstrukcija izvedenih u stijenskoj masi. Analiza najčešće primjenjivanih metoda ispitivanja krutosti stijenske mase na terenu, pokazala je razlike u zahvaćenom volumenu stijenske mase, metodama interpretacije i dobivenim rezultatima ispitivanja između pojedinih metoda. Istraživanja koja su rezultirala indirektnim određivanjem krutosti na temelju rezultata najčešće primjenjivanih klasifikacija stijenske mase pokazala su da sama klasifikacija nije dovoljna za određivanje krutosti [2].

## 2 Parametri koji utječu na krutost karbonatnih stijena u kršu Hrvatske

Sve stijenske mase, pa tako i krš, sastoje se od blokova osnovne stijene i diskontinuiteta čije krutosne karakteristike i njihov međusobni odnos definiraju krutost stijenske mase u kojoj se izvode inženjerski zahvati. S obzirom da se klasifikacijski postupak primjenom geološkog indeksa čvrstoće (engl. GSI – *geological strength indeks*) obavlja procjenom upravo tih osnovnih svojstava stijenske mase, GSI prilagođen procesu trošenja karbonatnih stijena u hrvatskom kršu prvi je parametar koji će poslužiti za određivanje krutosti.

Geološki indeks čvrstoće (GSI), potpuno prilagođen inženjersko-geološkim svojstvima hrvatskog krša, razvio je Pollak [3]. Novi pristup određivanju krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske u potpunosti se oslanja na njegova istraživanja. Prema Pollaku [3], u hrvatskom kršu mogu se izdvojiti dva sasvim različita i oprečna modela trošenja. Modeli su definirani značajkama intaktnog uzorka i veličinom osnovnog bloka. U svakom je modelu definirano pet zona trošenja. Nakon određivanja modela i zone trošenja, prema uputama koje je dao, Pollak [3] predlaže modificiranu tablicu vrijednosti GSI prilagođenu upotrebi u hrvatskom kršu.

Proces trošenja karbonatnih stijena započinje u površinskom dijelu i napreduje u dubinu kroz dugo razdoblje.

Tako se stvaraju zone trošenja koje imaju različite krutosne karakteristike po dubini i čija je dubina uglavnom veća od dubine zahvaćene istražnim radovima za potrebe građenja. Pollak [3] pokazao je da se zone trošenja karbonatnih krških naslaga, njihove dubine i pravilnost, postojanje više razlomljenih ili okršanih zona te promjena inženjerskih značajki zona s porastom dubine mogu ustanoviti uspoređivanjem brzina uzdužnih valova s pripadajućim dubinama na kojima su izmjerene. Profil brzina uzdužnih valova po dubini je drugi parametar koji će poslužiti za određivanje krutosti.

Profil brzina širenja uzdužnih valova po dubini može se uspješno dobiti seizmičkim geofizičkim metodama seizmičke refrakcije [4], seizmičke refleksije [5] i hibridnom seizmičkom metodom kao kombinacijom refrakcije i refleksije [6].

Trošenje karbonatnih stijena uglavnom se odvija i napreduje duž diskontinuiteta. Trošenjem karbonatnih stijena i izvedbom građevinskih radova dolazi do značajne promjene u krutosti stijenske mase, što je dobar pokazatelj stupnja poremećenosti odnosno oslabljenja stijenske mase.

Istraživanja utjecaja procesa okršavanja na fizičke i mehaničke značajke karbonatnih stijena u hrvatskom kršu [7], [8] pokazala su da se indeks kvalitete stijenske mase, IQs, definiran kao omjer brzine širenja uzdužnih valova u stijenskoj masi izmjerenih na terenu i brzine širenja uzdužnih valova izmjerenih ultrazvučnim ispitivanjima na uzorku u laboratoriju, može smatrati vrlo dobrim pokazateljem stanja okršene karbonatne stijenske mase.

Uzimajući u obzir rezultate mnogobrojnih mjerenja brzina širenja uzdužnih valova u karbonatnim stijenama hrvatskog krša, Pollak [3] predložio je karakteristične vrijednosti indeksa kvalitete stijenske mase svrstavanjem stijenske mase u jedan od predloženih modela i zona trošenja.

Parametar koji upućuje na redukciju krutosti stijenske mase definira se, prema novom pristupu određivanju krutosti, kao indeks krutosti stijenske mase, IKs, koji je jednak indeksu kvalitete stijenske mase IQs i može poprimiti vrijednosti od 0 do 1. Indeks krutosti stijenske mase treći je parametar koji će poslužiti za određivanje krutosti.

Novi pristup određivanju krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu, za određivanje sekantnog modula elastičnosti stijenske mase, koji će se rabiti u geotehničkim analizama, zahtijeva ispitivanje i određivanje sljedećih triju parametara:

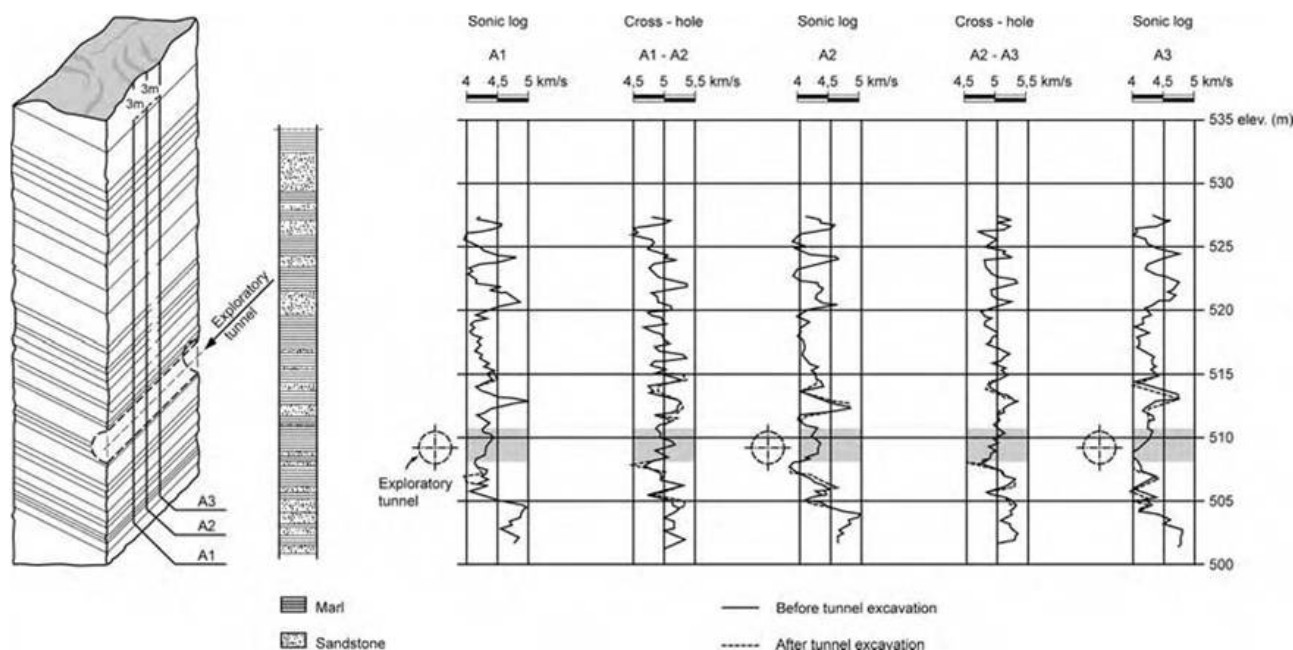
1. geoloških indeksa čvrstoće (GSI)
2. brzina  $w$  širenja uzdužnih valova ( $V_p$ )
3. indeksa krutosti stijenske mase (IKs).

### 3 Određivanje krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu

Velik broj izvedenih i mjerenih inženjerskih zahvata u stijenskoj masi u posljednjih dvadesetak godina pokazuje da se područje u kome se odvijaju deformacije stijenske mase kreće od 0,01 do 0,1 %. Pokazali su to Matthews i dr. [9], a potvrdio Barton [10]. Wang i Nur [11] pokazali su da terenska ispitivanja modula deformacije stijenske mase izazivaju deformacije reda veličine 0,1 %, a to se kasnije pokazalo kao gornja granica deformacija izazvanih izvedbom građevina u stijeni. Pokazali su da seizmička ispitivanja, kojima se određuje dinamički modul elastičnosti, izazivaju deformacije reda veličine 0,0001 % što se kasnije pokazalo da je manje od deformacija izazvanih izvedbom građevina u stijeni. Nameće se zaključak, otprije poznat iz mehanike tla, da dinamički i statički moduli zapravo reprezentiraju krutost stijenske mase pri malim i velikim deformacijama i da se modul deformacija može dobiti redukcijom dinamičkog modula elastičnosti dobivenog seizmičkim ispitivanjima.

Neovisno o spomenutom zaključku o povezanosti modula deformacija i dinamičkog modula elastičnosti te o kasnijim spoznajama o veličinama deformacija izvedenih građevina, Clerici [12] je, na temelju vlastitih istraživanja, odredio modul deformacije stijenske mase kao redukciju dinamičkog modula elastičnosti:

$$E_m = E_{m,dyn} \frac{E_{i,stat}}{E_{i,dyn}} \quad (1)$$



Slika 1 Pozicije bušotina i rezultati *down-hole* i *cross-hole* ispitivanja brzina širenja uzdužnih valova [14]

gdje je:

$E_m$  – modul deformacije stijenske mase

$E_{m,dyn}$  – dinamički modul elastičnosti stijenske mase

$E_{i,stat}$  – statički modul elastičnosti intaktnog uzorka i

$E_{i,dyn}$  – dinamički modul elastičnosti intaktnog uzorka.

Dinamički modul elastičnosti izravno je proporcionalan kvadratu brzine širenja valova u stijenskoj masi:

$$E_{m,dyn} = \rho V_p^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (2)$$

gdje je:

$V_p$  – brzina širenja uzdužnih valova u stijenskoj masi

$\rho$  – gustoća stijenske mase i

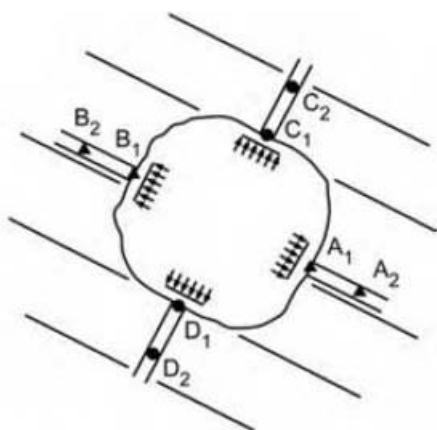
$\nu$  – Poissonov omjer.

Pokazuje se dakle, da je modul elastičnosti stijenske mase ovisan o kvadratu brzine širenja uzdužnih valova, a da se njegova vrijednost reducira s povećanjem deformacija, kada na njegovu vrijednost utječu neki drugi parametri kao što su GSI i IKs za karbonatne stijene u hrvatskom kršu.

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 Ribachi [13] na temelju usporedbe rezultata terenskih ispitivanja modula deformacije i seizmičkih mjerenja brzine širenja uzdužnih valova na 11 gradilišta u Italiji.

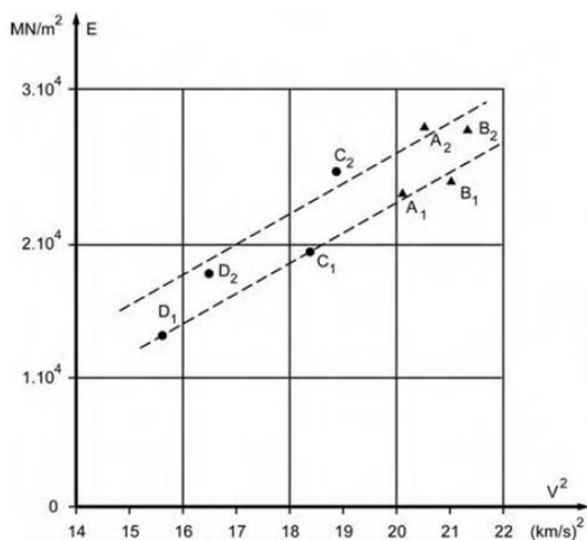
Ipak, najbolji primjer izravne povezanosti modula deformacije i kvadrata brzine širenja uzdužnih valova pokazali su Oberti i dr. [14]. Za potrebe temeljenja lučne gravitacijske brane u Italiji provedena su tri paralelne bušotine A1, A2 i A3 dubine oko 35 m u kojima su izvršena *down-hole* i *cross-hole* seizmička ispitivanja brzina širenja uzdužnih valova po dubini (slika 1.).

Istovremeno je na dubini od oko 25 m izveden probni tunel u kojem su se provodila ispitivanja modula deformacija opterećenjem pločom kod kojih su pomaci mjereni na različitim dubinama ekstenzometrom (slika 2.).



Slika 2. Shematski prikaz pozicija mjerenja pri ispitivanju modula deformacija opterećenjem pločom u probnom tunelu [14]

Vrlo dobra povezanost modula deformacije i kvadrata brzine širenja uzdužnih valova prikazana je na slici 3.



Slika 3. Ovisnost modula deformacije i kvadrata brzine širenja uzdužnih valova [14]

Ova su ispitivanja posebno važna jer se s velikom sigurnošću može tvrditi da se u zoni ispitivanja ne mijenjaju drugi parametri koji utječu na krutost kao što su: rezul-

tati klasificiranja stijenske mase, moduli elastičnosti odnosno čvrstoća intaktna stijene ili stupanj trošnosti odnosno model i zona trošenja stijenske mase.

S obzirom da se svi drugi parametri mogu smatrati konstantnim ovaj pokus pokazuje da je krutost stijenske mase izravno proporcionalna kvadratu brzina širenja uzdužnih valova i u području velikih deformacija kakve se očekuju pri izvedbi teških građevina u stijenskoj masi.

Već je istaknuto da su mnoga istraživanja širom svijeta pokazala kako se krutost ne može izravno povezati s rezultatima klasificiranja stijenske mase [1]. No zato su vrlo relevantna istraživanja pokazala da se brzina širenja uzdužnih valova može izravno povezati s rezultatima klasificiranja, posebice s GSI klasifikacijom koja je sastavni dio novog pristupa određivanju krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske.

Na temelju rezultata opsežnih istraživanja provedenih za gradnju norveške olimpijske podzemne dvorane u Gjøviku i nekih drugih lokacija, Barton je predložio [15] izraz koji povezuje rezultat Q klasifikacije i brzinu širenja uzdužnih valova:

$$V_p = 3,5 + \log Q \quad (3)$$

Dodatna istraživanja omogućila su Bartonu [16] povezivanje Q i RMR klasifikacije:

$$RMR = 15 \log Q + 50 \quad (4)$$

Izrazima (3) i (4) moguće je povezati  $V_p$  i RMR:

$$RMR = 15V_p - 2,5 \quad (5)$$

Hoek i Brown [17] povezali su GSI i RMR:

$$GSI = RMR - 5 \quad (6)$$

Izrazi (5) i (6) omogućavaju povezivanje GSI i  $V_p$ :

$$GSI = 15V_p - 7,5 \quad (7)$$

Vidljivo je da rezultati vrlo opsežnih istraživanja iskazuju linearnu povezanost rezultata GSI klasifikacije i brzine širenja uzdužnih valova.

Značajna potvrda linearne povezanosti rezultata klasificiranja i brzine širenja uzdužnih valova u karbonatnim stijenama hrvatskog krša može se naći analizirajući istraživanja koja su proveli Jašarević i Kovačević [18]. Na temelju terenskih i geofizičkih ispitivanja te rezultata klasificiranja povezali su module deformacije s rezultatima klasificiranja i brzinama širenja uzdužnih valova.

Uspostavili su sljedeće ovisnosti:

$$E_m = e^{(4,407+0,081RMR)} \quad (8)$$

$$E_m = e^{(4,950+0,900V_p)} \quad (9)$$

Izrazima (8) i (9) moguće je povezati  $V_p$  i RMR:

$$\text{RMR} = 11,1V_p - 6,7 \quad (10)$$

Izrazi (6) i (10) omogućavaju povezivanje GSI i  $V_p$ :

$$\text{GSI} = 11,1V_p - 11,7 \quad (11)$$

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

S obzirom da je pokazano kako 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.

Kao rezultat istraživanja predlaže se određivanje krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu prema izrazu:

$$E_m = \text{IKs} \cdot \text{GSI}^2 \cdot V_p^2 \quad (12)$$

gdje je  $E_m$  u [GPa], GSI u [%] i  $[V_p]$  u km/s. S obzirom na dimenzije indeks krutosti stijenske mase ekvivalent je gustoći stijenske mase.

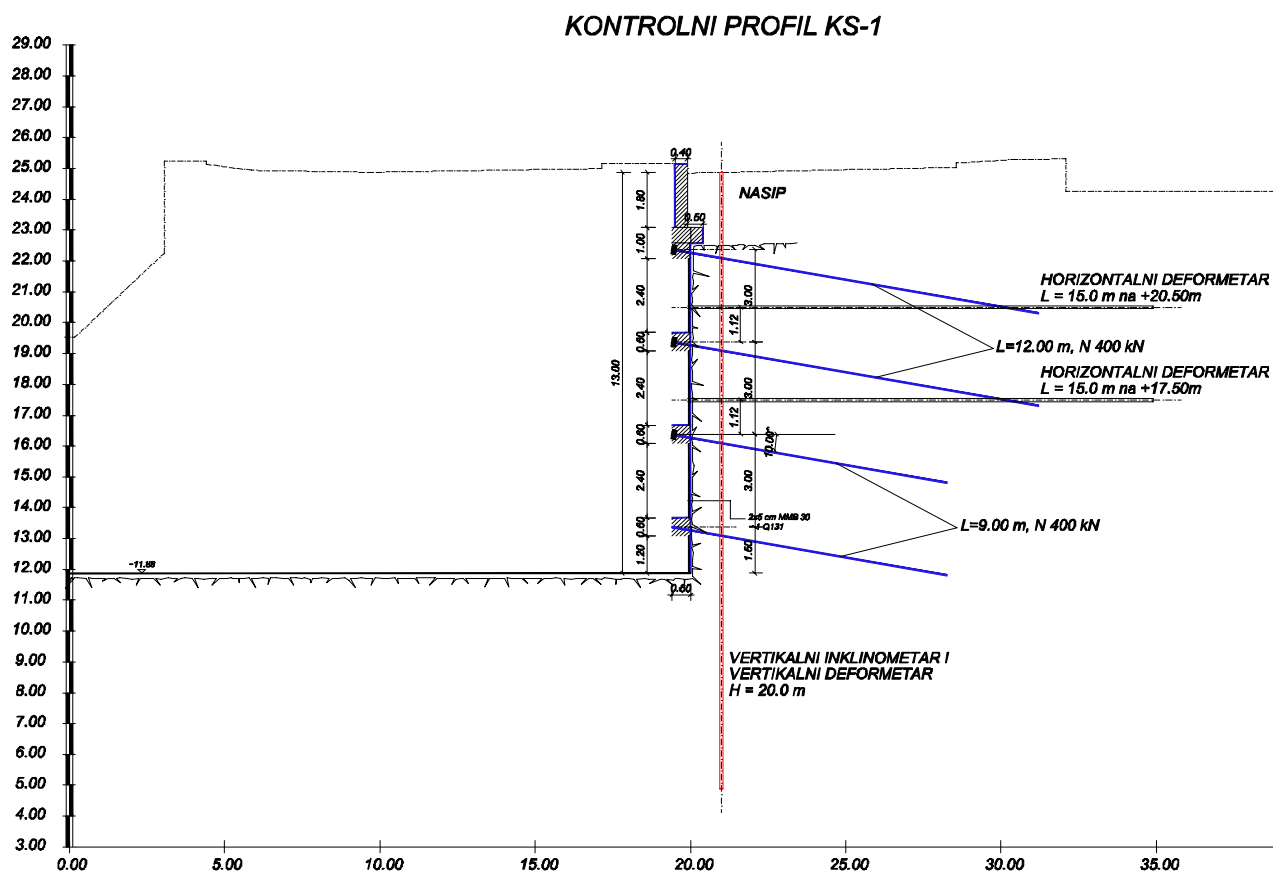
#### 4 Verifikacija novog pristupa određivanju krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu

Pouzdanost prognoze deformacija izvedenih geotekničkih konstrukcija uporabom novog pristupa za određivanje krutosti provjerena je na primjeru zaštite građevne jame dvoranskog plivališta Kantrida u Rijeci izvedene u karbonatnim stijenama.

Dvoransko plivalište Kantrida u Rijeci u sastavu svojih pristupnih objekata ima javnu garažu za čiju je izgradnju 2006. godine izvedena građevna jama tlocrtnih dimenzija 74 x 24 m. Za potrebe izvedbe građevne jame provedeni su sondažni, geofizički, inženjersko-geološki i geoteknički terenski i laboratorijski istražni radovi.

Iskustva u provedbi geotekničkih istražnih radova, projektiranju, izvedbi, nadzoru, geotekničkim mjerenjima i opažanjima te optimizaciji podgradnog sustava prikazali su Arbanas i dr. [19].

Istražnim je radovima ustanovljeno da se teren sastoji od pokrivača: nabačaja (AF) i crvenice ( $Q_{ts}$ ) te karbonatne stijenske podloge koju sačinjavaju vapnenci iz breče doba donje krede ( $K_1^{3-5}$ ). S obzirom na rasprostiranje i trošnost stijenske mase u području građevne jame gara-



Slika 4. Poprečni presjek osiguranja građevne jame s ucrtanom pozicijom geotekničke mjerne opreme na profilu KS-1

že, 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 za gornju površinsku trošnu zonu dobivena je jednoosna tlačna čvrstoća  $\sigma_c = 70$  MPa, a za donju, manje trošnu zonu  $\sigma_c = 50$  MPa. Za gornju zonu odabran je  $GSI=29$  i  $IKs=0,3$ , a za donju zonu  $GSI=40$  i  $IKs=0,4$ .

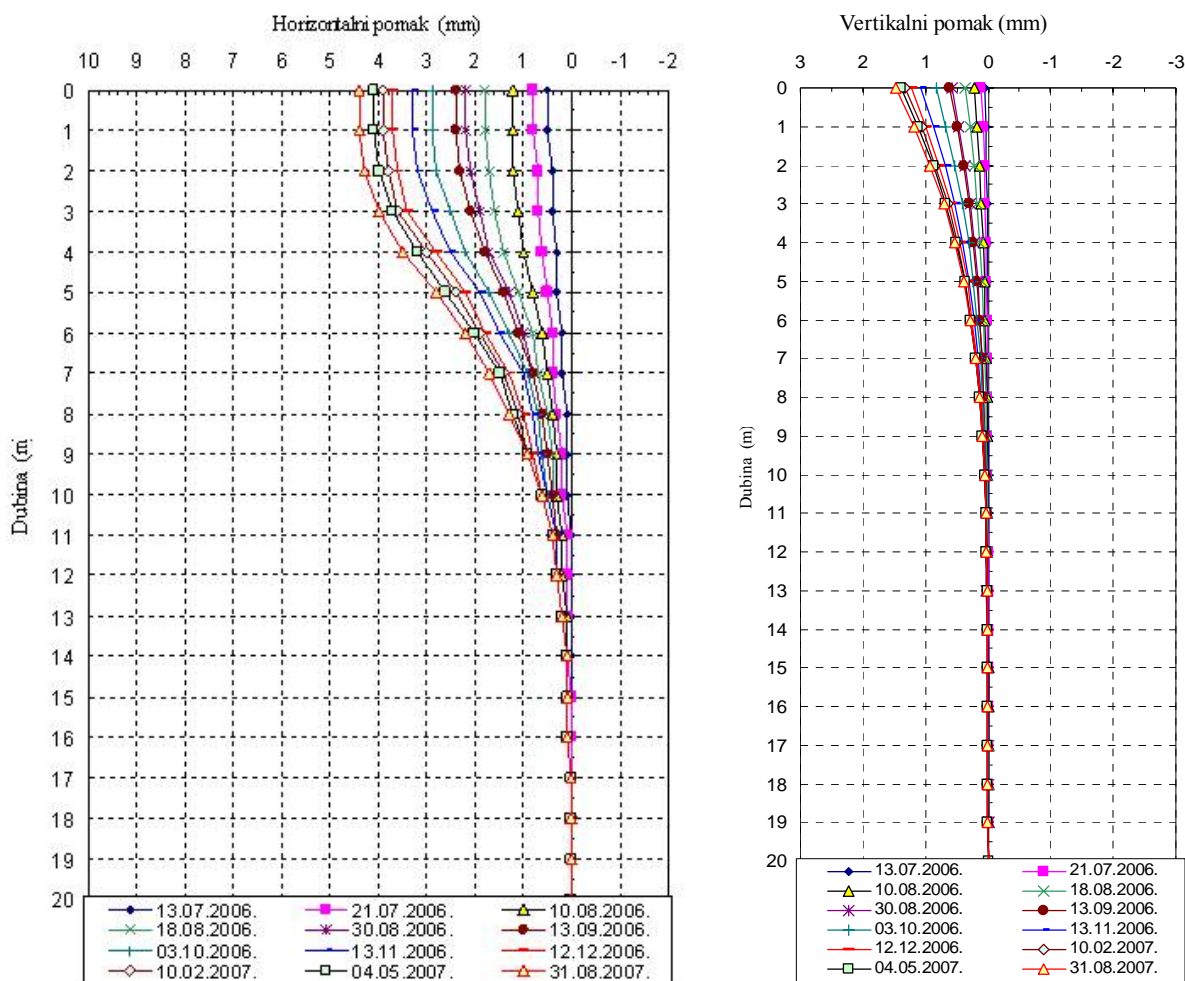
Najsloženiji zahvat je izveden na sjevernoj strani građevne jame gdje je zasjek prema cesti visok 14 m. Od pretpostavljene kote stijenske mase do predviđene kote nivelete postojeće prometnice izveden je potporni zid visine 2 m.

Osiguranje zasjeka provedeno je s 4 reda samobušivih štapnih sidara na prosječnom rasteru  $4 \times 3$  m. Prenošenje opterećenja sidara na širu površinu osigurano je izvođenjem armiranobetonske roštiljne konstrukcije osnovnog rastera  $4 \times 3$  m, dimenzija stupova  $0,6 \times 1$  m i dimenzija greda  $0,6 \times 0,6$  m, te u poljima roštiljne konstrukcije mlaznim betonom C30/37 u dva sloja debljine po 5 cm

armiranog armaturnom mrežom Q-131. Tijekom izvedbe kontrolnog profila KS-1 kontinuirano su se mjerile horizontalne i vertikalne deformacije stijenske mase vertikalnim inklinometrom i kliznim deformetrima duljine 20 m i dvama horizontalnim kliznim deformetrima duljine 15 m (slika 4.).

Za izvedbe kontrolnog profila KS-1 kontinuirano su se mjerile horizontalne i vertikalne deformacije stijenske mase vertikalnim inklinometrom i kliznim deformetrom duljine 20 m i dvama horizontalnim kliznim deformetrima duljine 15 m (slika 4.). Rezultati mjerenja vertikalnog inklinometra i kliznog deformetra u svim fazama izvedbe zasjeka prikazani su na slici 5.

Radi verificiranja novog pristupa određivanju krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske provedene su elastoplastične analize naprezanja i deformacije s Hoek-Brownovim kriterijem čvrstoće [20]. Krutost stijenske mase, određena prema ovom pristupu, uključuje brzine širenja uzdužnih valova promjenjive na cijeloj domeni u kojoj se provodi numerička analiza. To znači da krutost



Slika 5. Rezultati mjerenja vertikalnog inklinometra i kliznog deformetra

može biti različita u svakom konačnom elementu numeričkog modela. Da bi se to omogućilo, za numeričko modeliranje odabran je komercijalni program FLAC koji uz pomoć internog programskog jezika FISH omogućava da se za svaki konačni element neovisno zadaju potrebni parametri za proračun.

Primijenjena su četiri modela kod kojih su se moduli elastičnosti stijenske mase određivali na sljedeće načine (slika 6.):

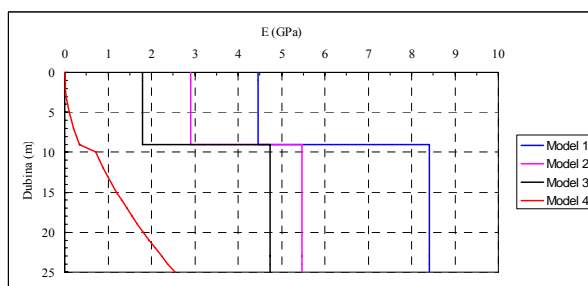
$$\text{Model 1} - E_m = 10^{\frac{\text{RMR}-10}{40}} \quad [21]$$

$$\text{Model 2} - E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{\text{GSI}-10}{40}} \quad D=0 \quad [20]$$

$$\text{Model 3} - E_m = 100,000 \left( \frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-\text{GSI})/11)}} \right) \quad D=0 \quad [22]$$

$$\text{Model 4} - E_m = \text{IKs} \cdot \text{GSI}^2 \cdot V_p^2$$

Na slici 6. vide se velike razlike u modulima elastičnosti po veličini, obliku i po dubini za 4 odabrana modela. Uočljivo je i da svaki novi predloženi model ima znatno manje module elastičnosti nego prethodni modeli. Modeli 1, 2 i 3 imaju, unutar gornje i donje zone stijenske mase, konstantnu vrijednost modula elastičnosti po du

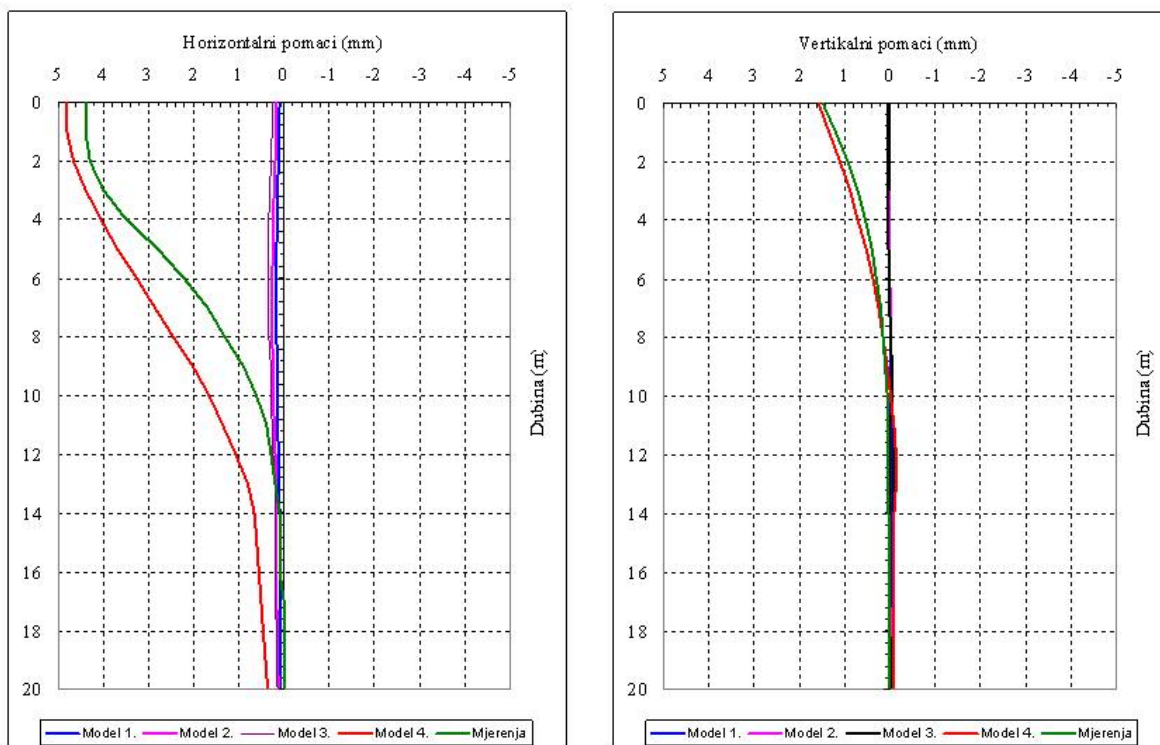


Slika 6. Profili modula elastičnosti po dubini za analizirane modele na profilu KS-

bini. To je posljedica činjenice da se moduli određuju na temelju klasifikacija stijenske mase koje se provode za pojedine strukturne blokove odnosno zone te da je rezultat klasifikacije konstantan unutar pojedine zone. Model 4 ima izrazito nelinearnu promjenu modula elastičnosti po dubini. To je posljedica činjenice da modul ovisi o kvadratu brzine širenja uzdužnih valova po dubini.

Na slici 7. prikazana je usporedba proračunatih i izmjerenih horizontalnih i vertikalnih pomaka za sve modele.

U tablici 1. prikazana je usporedba maksimalnih proračunatih i izmjerenih horizontalnih i vertikalnih pomaka pri zaštiti građevne jame dvoranskog plivališta Kantrida u Rijeci.



Slika 7. Modeli 1-4 – usporedba proračunatih i izmjerenih horizontalnih i vertikalnih pomaka



Tablica 1. Kantrida - usporedba proračunatih i izmjerenih maksimalnih horizontalnih i vertikalnih pomaka

	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

Model 1 za određivanje krutosti stijenske mase upotrebljava se jedino rezultatima RMR klasifikacije i najviše je primijenjen pristup određivanju krutosti stijenske mase pri projektiranju složenih geotehničkih građevina u Hrvatskoj u posljednjih 15 godina. Prognozirani horizontalni i vertikalni pomaci su 25 odnosno 33 puta manji od izmjerenih i ne nalaze se na istome mjestu po dubini.

Model 2 za određivanje krutosti stijenske mase, osim rezultata GSI klasifikacije, upotrebljava jednoosnu tlačnu čvrstoću intaktnog uzorka stijene i faktor poremećenosti zbog izvedbe radova. U Hrvatskoj je projektantskoj praksi preuzeo primat u posljednjih 5 godina. Prognozirani horizontalni i vertikalni pomaci su 17 odnosno 21 puta manji od izmjerenih i ne nalaze se na istome mjestu po dubini.

Model 3 za određivanje krutosti stijenske mase, osim rezultata GSI klasifikacije, upotrebljava modul elastičnosti intaktnog uzorka stijene i faktor poremećenosti zbog izvođenja radova. U Hrvatskoj se projektantskoj praksi još nije počeo znatnije upotrebljavati. Prognozirani horizontalni i vertikalni pomaci su 12 odnosno 19 puta manji od izmjerenih i ne nalaze se na istome mjestu po dubini.

Model 4 za određivanje krutosti stijenske mase, osim rezultata GSI klasifikacije prilagođene inženjersko-geološkim značajkama hrvatskog krša, upotrebljava indeks krutosti stijenske mase i brzinu širenja uzdužnih valova. Prognozirani horizontalni i vertikalni pomaci su 9 % odnosno 7 % veći od izmjerenih i nalaze se na istome mjestu po dubini.

Usporedba proračunatih i izmjerenih deformacija pri zaštiti građevne jame dvoranskog plivališta Kantrida u

Rijeci pokazuje pouzdanost njihove prognoze primjenom novog pristupa određivanja krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske.

## 5 Zaključak

U ovom radu prikazan je i verificiran novi pristup određivanju krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske.

Razvoju novog pristupa prethodila je sustavna analiza raspoloživih spoznaja i pristupa određivanju krutosti stijenske mase. Prema novom su pristupu parametri koji utječu na krutost karbonatnih stijena u kršu Hrvatske geološki indeks čvrstoće (GSI), brzina širenja uzdužnih valova ( $V_p$ ) i indeks krutosti stijenske mase (IKs).

Geološki indeks čvrstoće (GSI) u potpunosti prilagođen inženjersko-geološkim svojstvima hrvatskog krša, razvio je Pollak [3]. Profil brzina širenja uzdužnih valova po dubini, koji se prema novom pristupu primjenjuje za određivanje krutosti karbonatnih stijena u kršu Hrvatske, može se uspješno dobiti seizmičkim geofizičkim metodama seizmičke refrakcije, seizmičke refleksije i hibridnom seizmičkom metodom kao kombinacijom refrakcije i refleksije. Indeks krutosti stijenske mase (IKs) za karbonatne stijene u kršu Hrvatske jednak je indeksu kvalitete stijenske mase (IQs) određenom svrstavanjem stijenske mase u jedan od predloženih modela i zona trošenja.

Krutost stijenske mase izravno je proporcionalna kvadratu brzina širenja uzdužnih valova u području od malih do velikih deformacija kakve se očekuju pri izvedbi teških građevina u stijenskoj masi. Geološki indeks čvrstoće (GSI), kao rezultat klasifikacije, linearno je proporcionalan brzini širenja uzdužnih valova u karbonatnim stijenama hrvatskog krša odnosno kvadratu rezultata GSI klasifikacije.

Nov pristup određivanju krutosti stijenske mase primjenjiv je za projektiranje geotehničkih zahvata izvedenih u kršu Hrvatske. Pristup se može primijeniti i za projektiranje u drugim područjima krša i drugim tipovima stijena uz uvjet da se prilagodi inženjersko-geološkim značajkama tih stijena i verificira geotehničkim mjerenjima na izvedenim zahvatima.

## LITERATURA

- [1] Kovačević, M.S.; Jurić-Kačunić, D.; Simović, R.: *Određivanje modula deformacije karbonatnih stijena u hrvatskom kršu*, Građevinar 63 (2011) 1, 35-41
- [2] Jurić-Kačunić D.: *Krutost karbonatnih stijena u kršu Hrvatske*, Doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (2009) 235 p.
- [3] Pollak, D.: *Utjecaj trošenja karbonatnih stijenskih masa na njihova inženjersko-geološka svojstva*, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu (2007), 286 p.
- [4] Zhu, T.; Cheadle, S.; Petrella, A.; Gray, S.: *First-arrival tomography: method and application*, 70th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. (2000) 2028-2031.
- [5] Hunter, J.A.; Burns, R.A.; Pullan, S.E.; Gagne, R.M.; Good, R.S.: *Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph – some simple techniques*, Geophysics (1984) 49, 1381-1385.
- [6] Frei, W.; Bachmann, D.: *Detailed characterization for the subsurface using hybride seismic surveying*, Abstract of oral

- presentation held at the 2rd Colloque de Géophysique Appliquée, Marrakech (2004).
- [7] Brunčić, A.; Jurić-Kačunić, D.; Kovačević, M. S.: *Projektiranje i izvedba zasjeka u flišnoj stijenskoj masi*, Građevinar 62 (2010) 1, 13-23
- [8] Pollak, D.: *Ovisnost inženjerskogeoloških svojstava karbonatnih stijena o njihovim sedimentno-petrološkim značajkama (trasa Jadranske autoceste: "Tunel Sv. Rok-Maslenica")*, magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu (2002), 108 p.
- [9] Matthews, M.C.; Hope, V.S.; Clayton, C.R.I.: *The geotechnical value of ground stiffness determined using seismic methods*, Modern Geophysics in Engineering Geology, Geological Society Engineering Geology Special Publication (1997) 113–123.
- [10] Barton, N.: *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy* (2007) Rotterdam: Balkema
- [11] Wang, Z.; Nur, A.: *Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks*. Geophysics reprint series. (1992) No. 10. Society of Exploration Geophysicists.
- [12] Clerici, A.: *Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses-case histories*. Proc. Conf. Eurock (1993) pp. 509-517.
- [13] Ribacchi, R.: *Rock mass deformability: in situ tests, their interpretation and typical results in Italy*. Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, 2. Kobe (1988) 1: 171–192. Rotterdam: Balkema.
- [14] Oberti, G.; Carabelli, E.; Goffi, L.; Rossi, P.P.: *Study of an orthotropic rock mass: experimental techniques, comparative analysis of results*. Proc. of 4th Int. Congr. Rock Mech. (ISRM), Montreux (1979) 2: 485–491. Rotterdam: Balkema.
- [15] Barton, N.: Geotechnical Design. World Tunnelling (1991) 410–416.
- [16] Barton, N.: *The influence of joint properties in modelling jointed rock masses*. Keynote lecture. Proc. of 8th ISRM Congress, Tokyo (1995) 3:1023–1032. Rotterdam: Balkema.
- [17] Hoek, E.; Brown, T.: *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. (1997) 34, 8, 1165-1186.
- [18] Jašarević, I.; Kovačević, M.S.: *Analysing applicability of existing classification for hard carbonate rock in Mediterranean area*, EUROCK '96, Torino (1996) pp. 811-818.
- [19] Arbanas Ž.; Grošić, M.; Udović, D.; Jagodnik, V.: *Optimization of rock mass support system during deep excavations*, EUROCK2009, Cavtat, Croatia (2009) pp. 427-433.
- [20] Hoek, E.; Carranza-Torres, C.T.; Corkum, B.: *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*. In: Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium, Toronto, Canada (2002) vol. 1, p. 267–73.
- [21] Serafim, J.L.; Pereira, J.P.: *Considerations on the Geomechanical Classification of Bieniawski*, Int. Symp. Engineering Geology and Underground Construction. Lisbon (1983) Theme II. Vol. 1, pp II.33 – II.42.
- [22] Hoek, E.; Diederich, M.S.: *Empirical estimation of rock mass modulus*, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. (2006) 43, 203-215.