Klasifikacije stijenskih masa

Brežnjak, Tihana

Undergraduate thesis / Završni rad

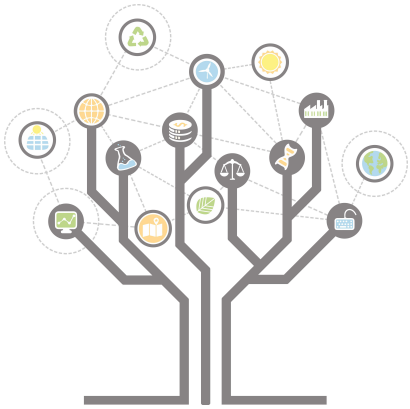
2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:881225

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

TIHANA BREŽNJAK

KLASIFIKACIJE STIJENSKIH MASA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

KLASIFIKACIJE STIJENSKIH MASA

KANDIDAT:

Tihana Brežnjak

Tihana Brežnjak

MENTOR:

izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški

VARAŽDIN, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnica: TIHANA BREŽNJAK

Matični broj: 2585 - 2015./2016.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

KLASIFIKACIJE STIJENSKIH MASA

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Općenito o stijenskoj masi
3. Klasifikacije stijenskih masa
4. Primjer izračuna
5. Zaključak
6. Popis literatura

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 01.04.2019. Rok predaje: 05.09.2019.

Mentor:
Izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški

Predsjednik Odbora za nastavu:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

Klasifikacije stijenskih masa

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv.prof.dr.sc Hrvoja Meaškog.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz nerecitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 10.09.2019

TIHANA BREŽNJAK

Tihana Brežnjak

(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Ime i prezime: Tihana Brežnjak

Naslov rada: Klasifikacije stijenskih masa

Tehnike ispitivanja stijenskih masa su do sada dostigle veliko napredovanje, međutim ostaje još velik broj problema pri primjeni teorija za rješavanje inženjerskih problema u praktičnom djelu. Zbog spomenutih okolnosti razvijene su klasifikacije stijenskih masa. U ovom radu opisane su detaljnije sljedeće klasifikacije: Terzaghijeva klasifikacija, Laufferova klasifikacija te modificirana Laufferova klasifikacija, RSR (*rock structure rating*) klasifikacija, RMR (*rock mass rating*) klasifikacija i Q-klasifikacija(*rock tunnelling quality index Q*).

Ključne riječi: klasifikacije stijenske mase, RMR, Q, RSR, Terzaghijeva i Laufferova klasifikacija

SADRŽAJ

1. UVOD ... 1
2. OPĆENITO O STIJENSKOJ MASI ... 3
2.1. NAČINI POJAVLJIVANJA STIJENSKIH MASA ... 4
Masivnost ... 4
Slojevitost ... 5
Škriljavost ... 5
Lučenje ... 6
3. KLASIFIKACIJE STIJENSKIH MASA ... 7
3.1. INDEKSNI PARAMETRI STIJENSKE MASE ... 8
Indeks kakvoće jezgre - RQD ... 9
Geološki indeks čvrstoće – GSI ... 10
Indeks stijenske mase – RMi ... 12
3.2. NAJVAŽNIJI KLASIFIKACIJSKI SUSTAVI ... 14
Terzaghijeva klasifikacija ... 14
Laufferova klasifikacija ... 16
Modificirana Laufferova klasifikacija ... 17
RSR klasifikacija ... 18
Geomehanička klasifikacija – RMR ... 21
Q klasifikacija ... 24
4. PRIMJER IZRAČUNA ... 29
4.1. KLASIFICIRANJE STIJENSKIH MASA ... 30
Primjer 1. Usjek ... 32
Primjer 2. Usjek ... 35
Primjer 3. Vijadukt Vrila ... 39
5. ZAKLJUČAK ... 43
6. POPIS LITERATURE ... 45
POPIS SLIKA ... 47
POPIS TABLICA ... 47

1. UVOD

Tehnike ispitivanja stijenskih masa su do sada dostigle veliko napredovanje, međutim ostaje još velik broj problema pri primjeni teorija za rješavanje inženjerskih problema u praktičnom djelu. Zbog spomenutih okolnosti razvijene su klasifikacije kao kompromis između korištenja teorijskih rješenja i ignoriranja svojstva stijenske mase. Korištenje klasifikacijskih sustava predstavlja značajan faktor u procjenama parametara stijenskih masa (Hoek,2006).

Klasifikacijski sustavi temelje se na indeksnim parametrima kojima se kvantitativno određuje kvaliteta stijenske mase. Klasifikacija i identifikacija stijenske mase se razvija od davnih vremena od klasificiranja na temelju zvuka, boje i težine stijena. Svaka klasifikacija uključuje nekoliko parametara stijenskih masa na temelju kojih ih grupiramo. Ona predstavlja prvi korak u procesu definiranja ponašanja stijenskih masa. Bieniawski definira klasifikaciju kao neki postupak grupiranja stijenskih masa na temelju njihovih međusobnih odnosa, a identifikaciju kao svrstavanje stijenskih masa u odgovarajuću kategorizaciju koja je ustanovljena klasifikacijom.

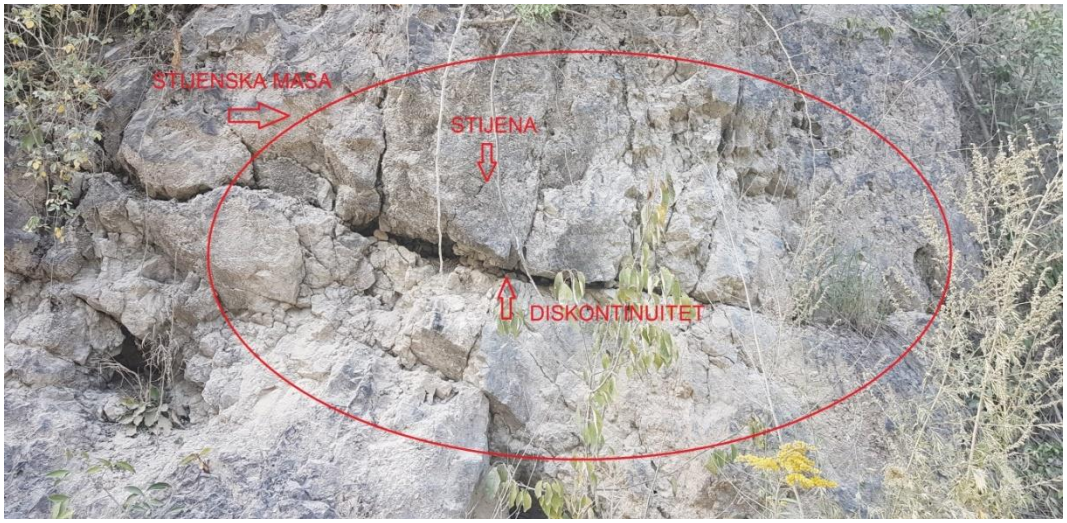
Prve klasifikacije temeljile su se na jednom parametru stijenske mase što se pokazalo nedovoljnim za izvođenje inženjerskih radova. Terzaghijeva klasifikacija je najpoznatija rana klasifikacija koja se temeljila na opterećenju stijenske mase, ali se ona tijekom vremena modificirala jer više nije bila primjerena za izvođenje inženjerskih zahvata. Razvijanjem inženjerskih zahvata došlo je i do razvijanja i stvaranja novih klasifikacijskih sustava koji se temelje na više parametara jer su razvijeni na osnovi iskustva koje su stekli inženjeri gradnjom inženjerskih građevina.

Neovisno o činjenici da su klasifikacijski sustavi razvijeni na osnovi iskustva stečenih mjerenjima, stijenska masa je prirodna tvorevina koja je na svakom dijelu jedinstvena te se za različite stijenske mase primjenjuju različiti klasifikacijski sustavi dobiveni indeksnim parametrima. U radu je prikazano nekoliko najčešće

korištenih klasifikacijskih sustava: Terzaghijeva klasifikacija, Laufferova klasifikacija te modificirana Laufferova klasifikacija, RSR (*rock structure rating*) klasifikacija, RMR (*rock mass rating*) klasifikacija i Q-klasifikacija(*rock tunnelling quality index Q*).

2. OPĆENITO O STIJENSKOJ MASI

Prema stručnoj definiciji za stijensku masu kažemo da je ona prirodna geološka formacija stijena, sa svim svojim oslabljenjima (Mišćević 2004). Osnovni elementi stijenske mase su intaktna stijena i diskontinuiteti (Slika 1.).



Slika 1. Osnovni elementi stijenske mase

Intaktna stijena je dio stijenske mase koja ne sadrži diskontinuitete, međutim sadrži zrna koja su posljedica procesa kojima je ta stijena bila izložena u svojoj geološkoj prošlosti. Prilikom opisa intaktne stijene definiramo mnoga fizikalna i mehanička svojstva, poput: imena, boje, poroznosti, gustoće, čvrstoće, tvrdoće (Vrkljan 2013). Fizikalna svojstva stijene nam većinom ukazuju na sastav i strukturu, dok nam mehanička svojstva pomažu kod definiranja posmične čvrstoće diskontinuiteta, miniranja te drugih.

Među najvažnijim pokazateljima kvalitete stijenskih masa je diskontinuitet. Pod pojmom diskontinuitet se podrazumijevaju fizički ili mehanički prekidi u stijeni, kao što su rasjedi i pukotine. Ono većinom ovisi o stupnju ispucanosti stijene i poroznosti. Da bi došlo do diskontinuiteta na stijenskoj masi bitne su sljedeće

značajke: orijentacija, postojanost, hrapavost, otpor, orijentacija, ispuna te mnogi drugi (Mihalić 2007).

2.1. NAČINI POJAVLJIVANJA STIJENSKIH MASA

Način pojavljivanja je određen prema strukturnim i teksturnim obilježjima koja su nastala u geološkoj prošlosti stijena zbog kemijskih i fizičkih procesa. Neki oblici pojavljivanja su pozitivni te nam omogućuju lakše građevinske radove i proučavanje, dok nam neki oblici otežavaju njihovo korištenje. Najčešći pojavni oblici su : masivnost, slojevitost, škriljavost i lučenje.

Masivnost

Svojstvo stijena da se u prirodi pojavljuju cjelovite (Slika 2.), najčešća pojava je kod magnatskih stijena. Za čovjeka je svojstvo masivnosti poželjno s građevinske i geološke strane. Pošto se stijene pojavljuju cjelovite to znači da ne postoji mnogo diskontinuiteta pa se takva stijenska masa približava intaktnoj stijeni.



Slika 2. Masivne stijenske mase
(https://mymodernmet.com/stonehenge-facts/)

Slojevitost

Pojava jasnog izdvajanja jedinstvenih slojeva stijenskih masa (Slika 3.), najčešća pojava kod sedimentnih stijena. Sloj je jedinica koja je nastala taloženjem te je omeđen slojnim plohama. Kod jake izraženosti slojevitosti je teže koristiti stijensku masu dok nam deblji slojevi omogućuju lakšu eksploataciju i korištenje.



Slika 3. Slojevitost stijenskih masa

(https://zasticenapodrucja.com/hr/sibensko-kninska)

Škriljavost

Svojstvo lomljenja pretežno metamorfnih stijena u kojima prevladavaju minerali pločaste ili listićave strukture. Jača škriljavost je najčešće negativni oblik pojavljivanja jer se takva stijena ne može iskoristiti za građevinske radove zbog raspadanja stijena(Slika 4.), ali pozitivna strana kod takvih stijena je lakša eksploatacija.

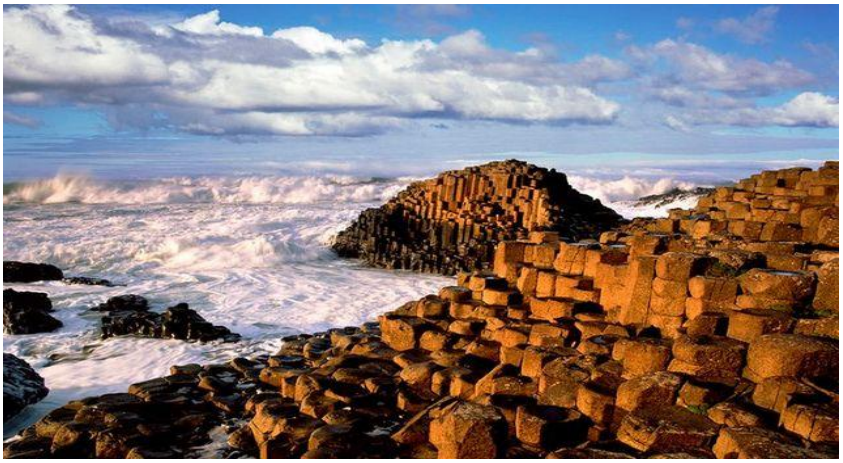


Slika 4. Raspadanje stijene zbog pojave škriljavost

(https://rudar.rgn.hr/~smihalic)

Lučenje

Svojstvo stijenskih masa da se prilikom procesa isušivanja, hlađenja ili prilikom kontrakcije pojavljuju izdijeljene (Slika 5.) . Kod magnatskih stijena do lučenja dolazi zbog skupljanja prilikom hlađenja. Način lučenje može biti važan zbog eksploatacije, tj. može ju otežavati ili olakšati.



Slika 5. Izgled stijena nakon pojave lučenja

(https://www.irishcentral.com/travel)

3. KLASIFIKACIJE STIJENSKIH MASA

Bieniawski (1976) definira klasifikaciju kao postupak grupiranja nekih objekata na temelju njihovog međusobnog odnosa. To je prvi korak u definiranju ponašanja stijenskih masa, a razvijene su za neku određenu inženjersku primjenu. Svaka klasifikacija mora zadovoljavati sljedeće uvjete: podjela stijenske mase u kategorije sa sličnim ponašanjem, osiguranje osnove za razumijevanje karakteristika svake kategorije te mora dati kvantitativne podatke u neke inženjerske svrhe. Klasifikacije stijenskih masa se razvijaju i nadopunjavaju već više od 100 godina od kada je Ritter (1879.) pokušao osmisliti empirijski pristup projektiranju tunela kojem je bilo potrebno osigurati stabilnost iskopa.

Pomoću klasifikacija stijenskih masa možemo odrediti važne parametre stijenske mase. One nam omogućuju da stvorimo neku ocjenu stabilnosti stijenske mase te nam ukazuju na čvrstoću i deformabilnosti (Hoek 2006). Prve klasifikacije temeljile su se na jednoj značajki stijenske mase, ali su se pokazale kao nedovoljne za opis i klasifikaciju stijenskih masa s obzirom da su se stijene klasificirale od slabih do jakih. S vremenom su se klasifikacije modificirale i počeli su se uvoditi novi klasifikacijski sustavi.

Većina novijih klasifikacija nastala je na temelju iskustva gradnjom u stijenskoj masi pri čemu su bile uključene sve komponente inženjerskih i geoloških značajki stijenske mase. Uključene su i neke nove značajke koje su bile dugo zanemarivane kao što su brzina trošenja stijena i utjecaj podzemne vode na stijensku masu. Klasifikacija nam se može temeljiti na jednom ili više svojstava. Ukoliko se klasifikacija temelji na jednom svojstvu onda takvu klasifikaciju nazivamo jednovarijantnom, a ukoliko se temelji na dva ili više svojstava onda takvu klasifikaciju nazivamo dvovarijantna ili viševarijantna klasifikacija (Vrkljan 2013). Poznavajući više parametra znači da će nam i stijenska masa koju proučavamo biti jasnija, međutim osnovni princip stvaranja nekog klasifikacijskog sustava temelji se na korištenju samo onih parametara koji najviše utječu na

ponašanje stijene. Da se ti parametri mogu odrediti na jednostavan način i da se ne ponavljaju s obzirom na svoj značaj u klasifikaciji. Također je važno da je svaki klasifikacijski sustav jednostavan, razumljiv, njegova terminologija mora biti prihvatljiva, mora se temeljiti na parametrima koji se mogu mjeriti te mora dati kvantitativne podatke za neki projekt.

Klasifikacije možemo podijeliti na inženjerske i geološke klasifikacije stijenske mase (Miščević 2004). Geološke klasifikacije ne rješavaju probleme građevinskih zadaća, ali nam daju pregled svojstava stijenskih masa. Ukazuju na nastanak i starost stijene te teksturu i strukturu zbog čega bi svaki inženjer trebao biti dobro upoznat s geološkom podjelom. Inženjerske klasifikacije daju uvid o ponašanju stijenskih masa. Danas postoji velik broj klasifikacija koje su prilagođene građevinskim problemima. Njihov najveći nedostatak je taj što nije svaka klasifikacija primjenjiva na svakoj vrsti stijene, već treba provjeriti odgovara li klasifikacija za vrstu stijene za koju se primjenjuje. Stijenske mase se klasificiraju s obzirom na indeksne pokazatelje koji se razlikuju ovisno o stijeni i stijenskoj masi.

Osnovni ciljevi inženjerskih klasifikacija (Vrkljan 2013):

- Identifikacija najvažnijih parametra stijenske mase
- Podjela stijenske mase s obzirom na njihovo slično ponašanje
- Stvoriti bazu za razumijevanje karakteristika od svake podjele
- Usporedba iskustva sa svojstva stijenskih masa na više lokacija
- Ponašanje stijenskih masa opisati numerički za izvođenje daljnjih analiza
- Osigurati temelje za dobru komunikaciju između geologija i inženjera

3.1. INDEKSNI PARAMETRI STIJENSKE MASE

Mjerenje svojstva stijenskih masa je veoma skup, složen i ograničen proces. Upravo iz tog razloga se pojavio niz indeksnih veličina pomoću kojih kvantitativno određujemo kakvoću stijenskih masa. Temelj na kojim su se razvili indeksni

parametri je izravno mjerenje pojedinih veličina koje su zatim uspoređene s izmjerenim vrijednostima svojstava stijenske mase. Tako možemo dobiti sustav koji nam pokazuje kvantitativno ocijenjenu kakvoću stijenske mase na osnovi indeksa. Neki od tih indeksa koriste se kao parametri u najčešće korištenim klasifikacijama stijenske mase. Indeksni parametri su također razvijeni na jednoj vrsti stijenske mase, kao i klasifikacije, te je njihova primjena za druge vrste upitna.

Neke od važnijih indeksnih veličina (Miščević 2004):

- RQD – indeks kakvoće jezgre
- GSI – geološki indeks čvrstoće
- RMi – indeks stijenske mase

Indeks kakvoće jezgre - RQD

RQD (eng. *rock quality designation*) indeks uveo je D.U.Deere za kvantitativno određivanje kakvoće stijenske mase iz jezgri koju dobivamo bušenjem (Deere 1989). Određuje se kao postotak jezgre koja je izvađena prilikom sondažnog bušenje, a čine ju dijelovi jezgre duži od 10 cm. RQD izračunamo kao omjer ukupne dužine dijelova jezgre (>10cm) i ukupne promatrane dužine bušenja. Postupak mjerenja i izračunavanja prikazan je na slici (Slika 6).

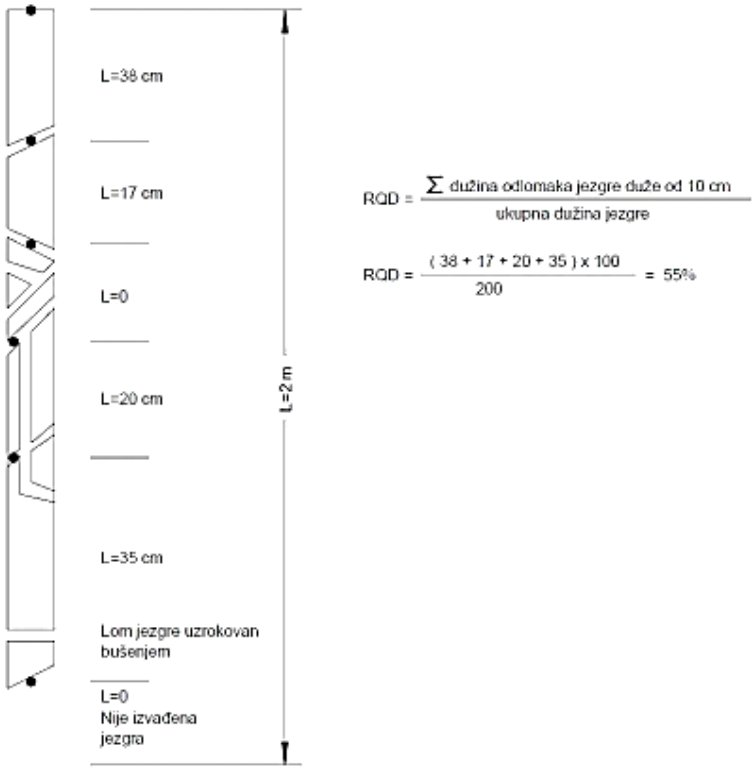
Odnos između dobivenog postotka RQD indeksa i kakvoće stijenske mase koju je predložio Deere možemo vidjeti u tablici (Tablica 1.).

Tablica 1. Odnos između RQD i kakvoće stijenske mase (Singh & Goel, 1999)

RQD (%)	Kakvoća stijenske mase
< 25%	Vrlo loša
25 – 50	Loša
50 – 75	Prihvatljiva
75 – 90	Dobra
90 - 100	Izvrsna

Ukoliko ne postoji mogućnost bušenje iz kojeg se dobije jezgra, Palmstrom je predložio izraz koji vrijedi za stijene sa zatvorenim pukotinskim sastavima i temelji se na volumetrijskom broju pukotina (J_v) (Palmstrom 1995) :

$$RQD = 115 – 3.3 * J_v$$

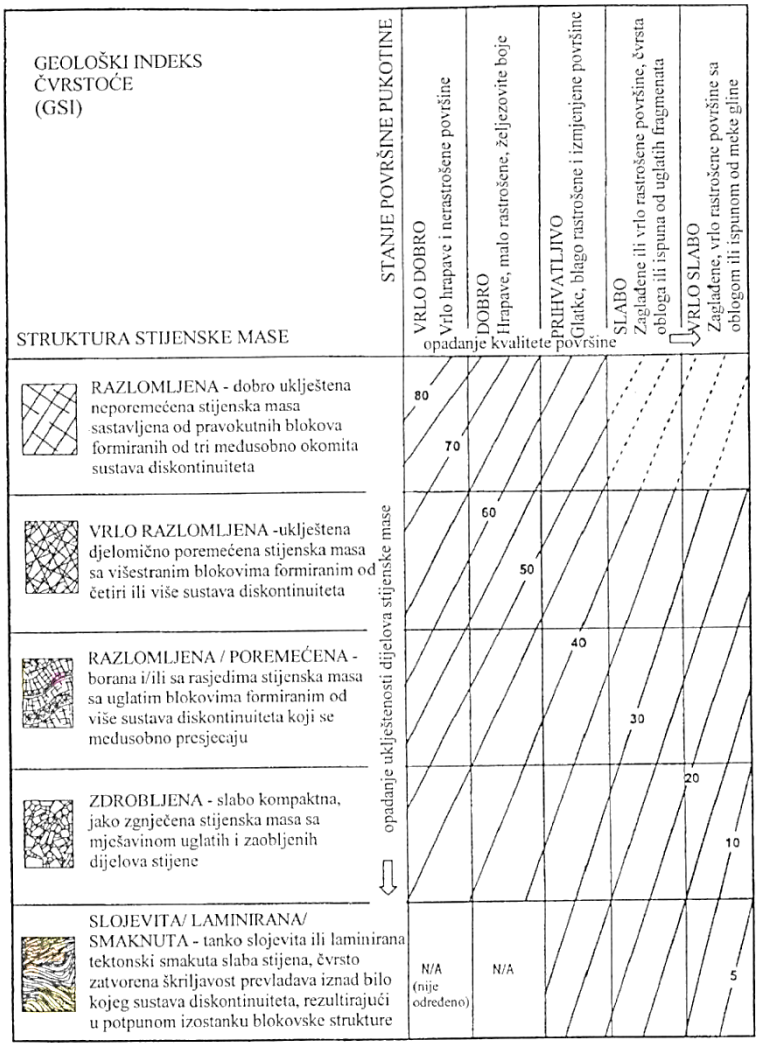


Slika 6. Primjer izračuna RQD indeksa (Singh & Goel, 1999)

Geološki indeks čvrstoće – GSI

GSI (eng. *geological strength indeks*) uveli su 1997. godine Hoek & Brown, nastao je iz potrebe geologa i inženjera za jednostavnom, pouzdanom, vizualnom ocjenom stijenske mase (Hoek & Brown 1997). Funkcija indeksa je procjena svojstva stijenske mase, a ocjenjuje se stanje strukture i stanje diskontinuiteta za

čvrste i slabe stijenske mase dobivene bušotinskim jezgrama i površinskim kopovima.



Slika 7. Dijagram za procjenu geološkog indeksa čvrstoće

(Hoek & Marinos, 1998.)

Za određivanje GSI-a koristi se dijagram (Slika 7.) koji se temelji na vizualnoj ocjeni strukture stijenske mase te stanja površine pukotina (Hoek et al., 1998). Važna napomena je da GSI pretpostavlja da je stijenska masa izotropna i da podzemna voda nema utjecaj na GSI indeks pri čemu velika preciznost određivanja GSI indeksa nije potrebna (Miščević, 2004).

Prema Hoek & Brown raspon GSI se određuje iz matrice 5x5 kao raspon vrijednosti (npr. 60-70), a ne kao jedinstven broj (npr.67). Razlog je taj što kvaliteta stijenske mase na većem području nije jednoznačna vrijednost (Singh & Goel, 1999).

Indeks stijenske mase – RMi

RMi (eng. ″rock mass index″) indeks uveo je 1995. godine Palmstrom da se tom veličinom može napraviti procjena stijenske mase kao konstrukcijskog materijala, iz razloga jer je gotovo nemoguće raditi troosno ispitivanje na razmjeru stijenske mase koja odgovara veličini rješavanog inženjerskog problema (Palmstrom 1995). RMi se određuje iz formule:

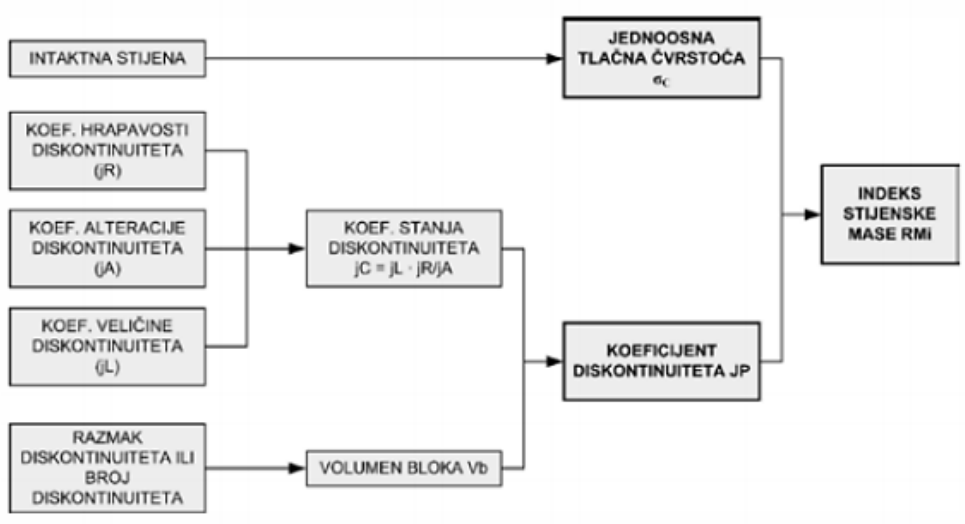
$$RMi = \sigma_c * J_p$$

gdje su:

- σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća stijena koja gradi stijensku masu [Mpa]
- J_p – pukotinski parametar

Prema Hoeku čvrstoća ovisi o obliku i veličini bloka te o karakteristikama njihove površine odvojenih s pukotinama. Iz tog razloga se kao ulazni parametri (Slika 8.) za procjenu čvrstoće stijenskih masa koriste (A'ssim & Yong Xing, 2010):

- Veličina blokova odvojenih pukotinama kao volumen bloka (Vb)
- Čvrstoća materijala bloka kao jednoaksijalna tlačna čvrstoća
- Posmična čvrstoća blokova prikazana pomoću faktora pukotinskih značajka (jR,jA)
- Kontinuiranost pukotina prikazana pomoću faktora jL



Slika 8. Ulazni parametri RMi indeksa

(Palmstrom, 1995)

Neke klasifikacije su kvalitativne i opisane, dok je RMi vrijednost brojčana (Tablica 2). Te vrijednosti mogu poslužiti i kao ulazni podatak u inženjerskim metodama kao što je numeričko modeliranje, za procjenu modula deformabilnosti te Hoek-Brown-ovog kriterija loma stijenske mase.

Tablica 2. Klasifikacija temeljem RMi indeksa (Abbas & Konietzky, 2017)

Za RMi	Stijenska masa obzirom na čvrstoću	RMi
Izuzetno nizak	Izuzetno slaba	<0,001
Vrlo nizak	Vrlo slaba	0,001 – 0,01
Nizak	Slaba	0,01 – 0,1
Umjeren	Osrednja	0,1 – 1,0
Visok	Čvrsta	1,0 – 10
Vrlo visok	Vrlo čvrsta	10 – 100
Izuzetno visok	Izuzetno čvrsta	>100

3.2. NAJVAŽNIJI KLASIFIKACIJSKI SUSTAVI

Od brojnih viševarijantnih klasifikacijskih sustava najviše se koriste (Vrkljan, 2013) :

- Terzaghijeva klasifikacija (1946)
- Laufferova klasifikacija (1958)
- Modificirana Lauferova klasifikacija
- Rock structure rating klasifikacija (RSR) (Wickeham i dr., 1972)
- Geomehanička klasifikacija (RMR - ″Rock mass rating″) (Bieniawski, 1973)
- Q – klasifikacija (″Rock tunnelling quality index″,Q) (Barton, 1974)

Terzaghijeva klasifikacija

Za Terzaghijevu klasifikaciju stijenske mase možemo reći da predstavlja prvu praktičnu i racionalnu metodu koja je razvijena na temelju procjene opterećenja stijenske mase ugradnjom čeličnih lukova. Taj sustav klasifikacije je bilo često korišten u SAD-u prošlog stoljeća za gradnju tunela, ali prestaje biti prihvatljiv nakon pojave modernijih i razvijenijih metoda izvođenja i gradnje tunela korištenjem geotehničkih sidara.

Budući da se Terzaghijeva klasifikacija bazira na objektivno stanje kvalitete, a ne daje kvantitativan opis o značajkama stijenske mase, došlo je do sve manje upotrebe. Međutim, daje opis pojedinih značajka koje imaju presudan utjecaj na ponašanje stijenske mase, osobito pod djelovanjem geostatičkog naprezanja. Opis tih značajka stijenskih masa daje predložak inženjerskogeoloških informacija koje su potrebne za inženjersko projektiranje. Pri tome je značajno prvo uvođenje opisa i pojmova za (Hoek, 2006.):

- Intaktnu stijenu (eng. *intact rock*)
- Uslojene stijenske mase (eng. *stratified rock*)
- Umjereno ispucane stijenske mase (eng. *moderately jointed rock*)
- Stijenske mase u blokovima i raspucale stijenske mase (eng. *blocky and seamy rock*)

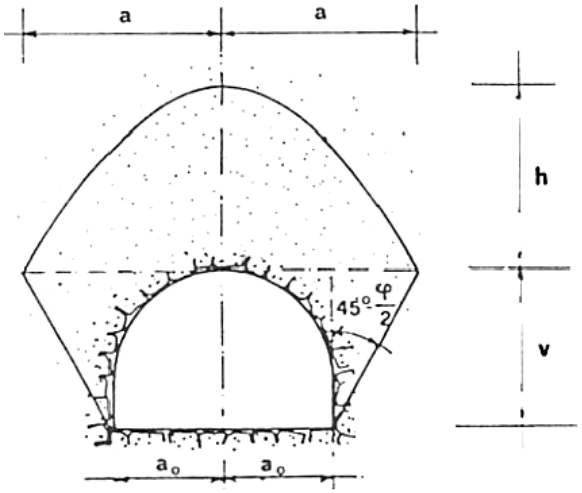
- Raspadnute stijenske mase (eng. *crushed rock*)
- Stijenske mase podložne skupljanju (eng. *squeeting rock*)
- Stijenske mase podložne bubrenju (eng. *swelling rock*)

Prema Terzaghijevoj klasifikaciji, stijenska masa je podijeljena na 9 kvalitativnih kategorija (Tablica 3).

Tablica 3. Podjela stijenske mase prema Terzaghijevoj klasifikaciji (Abbas & Konietzky 2017)

Rock Class	Definition	Rock Load Factor Hp (in feet, B and Ht in feet)	Remark
I. Hard and intact	Hard and intact rock contains no joints and fractures. After excavation, the rock may have popping and spalling at excavated face.	0	Light lining required only if spalling or popping occurs.
II. Hard stratified and schistose	Hard rock consists of thick strata and layers. The interface between strata is cemented. Popping and spalling at the excavated face is common.	0 to 0.5 B	Light support for protection against spalling. Load may change between layers.
III. Massive, moderately jointed	Massive rock contains widely spaced joints and fractures. Block size is large. Joints are interlocked. Vertical walls do not require support. Spalling may occur.	0 to 0.25 B	Light support for protection against spalling.
IV. Moderately blocky and seamy	Rock contains moderately spaced joints. Rock is not chemically weathered and altered. Joints are not well interlocked and have small apertures. Vertical walls do not require support. Spalling may occur.	0.25 B to 0.35 $(B + H_t)$	No side pressure.
V. Very blocky and seamy	Rock is not chemically weathered and contains closely spaced joints. Joints have large apertures and appear separated. Vertical walls need support.	(0.35 to 1.1) $(B + H_t)$	Little or no side pressure.
VI. Completely crushed but chemically intact	Rock is not chemically weathered and highly fractured with small fragments. The fragments are loose and not interlocked. Excavation face in this material needs considerable support.	1.1 $(B + H_t)$	Considerable side pressure. Softening effects by water at tunnel base. Use circular ribs or support rib lower end.
VII. Squeezing rock at moderate depth	Rock slowly advances into the tunnel without a perceptible increase in volume. Moderate depth is considered as 150 ~ 1000 m.	(1.1 to 2.1) $(B + H_t)$	Heavy side pressure. Invert struts required. Circular ribs recommended.
VIII. Squeezing rock at great depth	Rock slowly advances into the tunnel without a perceptible increase in volume. Great depth is considered as more than 1000 m.	(2.1 to 4.5) $(B + H_t)$	
IX. Swelling rock	Rock volume expands (and advances into the tunnel) due to swelling of clay minerals in the rock at the presence of moisture.	up to 250 feet, irrespective of B and H_t	Circular ribs required. In extreme cases use yielding support.

Opterećenje se određuje prema kategoriji određene stijenske mase, širine i visine tunela i ono predstavlja težinu stijenske mase ispod svoda (Slika 9).



Slika 9: Terzaghijev model

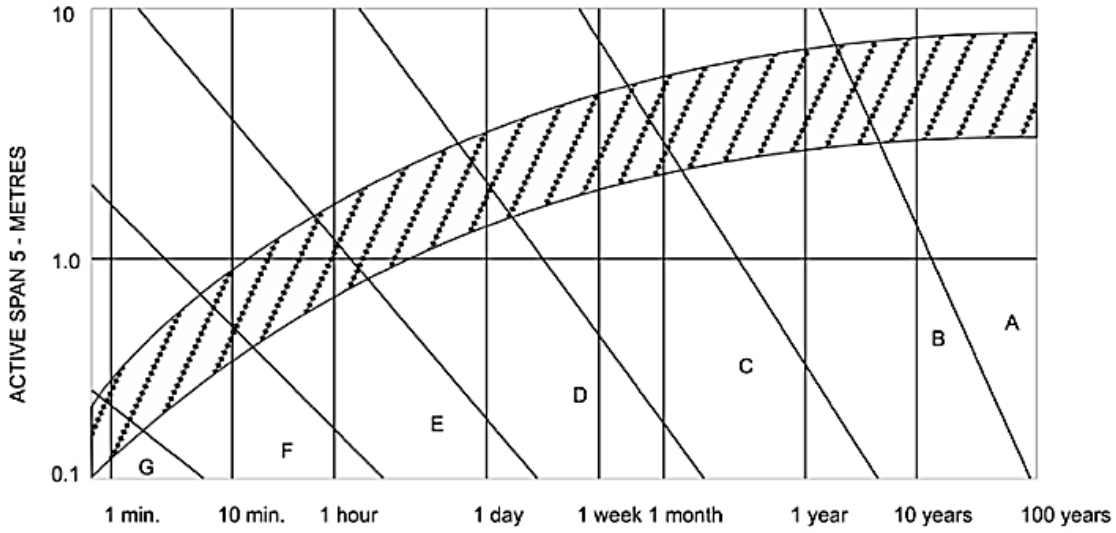
(https://www.grad.unizg.hr/_download/repository)

Laufferova klasifikacija

Sustav klasifikacije zasnovan na području mehanike stijena i tunela, od strane ″oca″ austrijske škole za gradnju tunela, Josefa Stinija (Stini 1950). Stavio je naglasak na značaj strukture stijenske mase. Laufferova klasifikacija predlaže korelaciju vremenskog perioda postojanosti stijenskog iskopa nepodgrađenog raspona u odnosu na različite kategorije stijenske mase (Slika 10.).

Vremenski period postojanosti nepodgrađenog raspona je vrijeme u kojem određeni tunelski nepodgrađeni raspon može stajati bez potpore. Taj nepodgrađeni raspon nam predstavlja širinu određenog tunelskog iskopa ili udaljenost od izvedene potpore do lica iskopa, ako je isti raspon manji od raspona iskopa. Pri čemu dolazi do utjecaja mnogih parametara na predloženi odnos, kao orijentacije osi tunela u odnosu na strukturu stijenske mase, nagib u poprečnim presjecima, metoda podgrađivanja i iskopa (Hoek, 2006). Laufferova klasifikacija stijenske mase mijenjana je više puta, poznatija godina promjene je 1974. što vodi do

razvoja NATM (New Austrian Tunneling Method). Novi austrijski princip iskopa tunela (NATM) uključuje i tehnike osiguranja stabilnosti iskopa u stijeni u kojoj je vrijeme prije nego dođe do sloma ograničeno kao što je i u stijenskim masama, gdje nam stabilnost stijenske mase oko iskopa nije vremenski ovisna.



Slika 10: Odnos između raspona iskopa i vremena stajanja te klase stijenske mase (https://www.researchgate.net/figure)

Značaj klasifikacije je u zahtjevima na smanjenju vremena koje je potrebno za ugradnju potpore. Iskop tunela manjeg raspona (korišten kao pilot tunel ispred glavne tunelske prostorije) se može izvesti uz neke minimalne potpore u dužem vremenskom periodu, a iskop tunela većeg raspona (u istoj stijenskoj masi) ne može biti toliko stabilan bez trenutne ugradnje potporne konstrukcije.

Modificirana Laufferova klasifikacija

Klasifikacija je zasnovana na rezultatima istraživanja ponašanja stijenskih masa oko tunelskih otvora. Pomoću nje moguć je iskop sa zaštitnim i potpornim mjerama te njihovo vremensko provođenje. Modificirana Laufferova klasifikacija provjerena je na brojnim projektima. Prema klasifikaciji, stijenska masa je podijeljena u 4 grupe (a,b,c,d) i 6 klasa (I,II,III,IV,Va,Vb) (Tablica 4).

Tablica 4. Modificirana Laufferova klasifikacija

Grupa	Klasa	Vrsta stijenske mase	Potrebna zaštita
A	I i II	Neporemećene stijenske mase	Stabilnost bez potpore
B	III	Rastresene stijenske mase	Površinska mjera zaštite
C	IV i Va	Stijenske mase koje izazivaju pritiske nakon iskopa	Razrada podzemnog otvora te zatvaranje podgradnog prstena
D	Vb	Bujajuće stijenske mase	Posebne mjere podgrađivanja

Nedostaci klasifikacije:

- Potrebno je mnogo praktičnog iskustva za njenu primjenu
- Opis stijenske mase je kvalitativan i nije osnovana na bodovnom sistemu
- Podgrada je odrađena samo kvalitativno

RSR klasifikacija

RSR (*rock structure rating*) klasifikacija razvijena je u SAD-u od strane Wickhama, Tiedemanna i Skinnera kao model za procjenu potrebnog podgradnog sistema prilikom iskopa tunela. Sustav klasifikacije daje kvantitativnu metodu opisa kvalitete stijenskih masa i procjenu odabira podgradnog sustava te predstavlja prvi cjeloviti sustav klasifikacije nastao nakon Terzaghijeve klasifikacije (Hoek, 1999.). Prilikom razvoja RSR klasifikacije koristili su se podaci o izvedbi tunela u stijenskim masama kod kojih je većina manjeg raspona izvedena sa čeličnom podgradom. Ujedno je i prva klasifikacija koja je usvojila mlazni beton kao podgradu. RSR koncept je korak unaprijed u klasifikacijama stijenskih masa po više parametara.

RSR je kvalitativna klasifikacija, usvaja više parametara stijene za razliku od samo jednog parametra te je zasnovana na praktičnim iskustvima koji su proizašli iz kvalitete stijenske mase, koja su rezultirala podacima kao vrijeme koje je potrebno za ugradnju podgrade i koji tip je potreban (Bieniawski, 1989). Ova klasifikacija se

danas rijetko koristi, ali je u prošlosti korištena na mnogo izvedenih tunela. RSR sustav usvaja dvije kategorije parametra koji utječu na ponašanje stijenskih masa u tunelima: geološki parametri i parametri podgradne konstrukcije (Hoek, 2006).

Geološki parametri su:

- Tip stijenske mase
- Prosječan razmak pukotina
- Nagib i smjer pukotina
- Tip diskontinuiteta
- Glavni smjer smicanja, rasjeda i preklapanja
- Osobine stijenskih masa
- Trošenje

Parametri podgradne konstrukcije su:

- Veličina tunela
- Smjer napredovanja tunela
- Metoda iskopa

RSR se određuje prema izrazu: RSR = A + B + C.
Parametar A predstavlja neku ocjenu geološke strukture koja se temelji na porijeklu i tvrdoći stijenske mase te geološkoj strukturi (Tablica 5).

Tablica 5. Prikaz određivanja parametra A Prikaz određivanja parametra A

Osnovni tip stijene	**Čvrste**	**Srednje**	**Meke**	**Raspadnute**	**Geološka struktura**			
Eruptivne	1	2	3	4		Slabo	Srednje	Jako
Metamorfne	1	2	3	4		Ispucale	Ispucale	Ispucale
Sedimentne	2	3	4	4	Masivne	Raspucale	Raspucale	Raspucale
Tip 1					30	22	15	9
Tip 2					27	20	13	8
Tip 3					24	18	12	7
Tip 4					19	15	10	6

Parametar B predstavlja položaj pukotina uz poštivanje smjera izvedbe tunela temeljena na razmaku i orijentaciji pukotine te smjeru napredovanja tunela (Tablica 6.).

Tablica 6. Prikaz određivanja parametra B

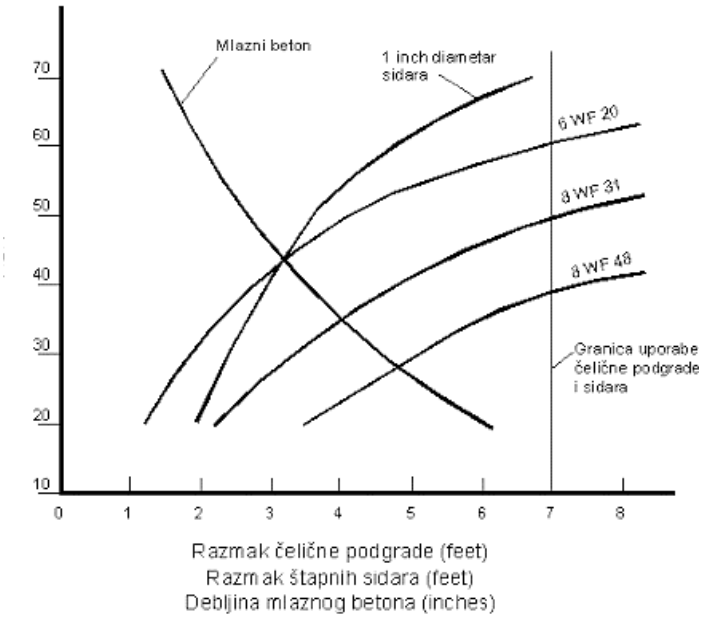
	Smjer pružanja okomit na os					**Smjer pružanja paralelan s osi**		
	Smjer iskopa					**Smjer iskopa**		
	Zajednički	**S nagibom pukotina**		**Suprotno nagibu pukotina**		**Ostali smjerovi**		
	Nagib značajnih pukotina					**Nagib značajnih pukotina**		
Prosječan razmak pukotina	Vodo-ravan	Nagnut	Vertikalan	Nagnut	Vertikalan	Vodoravan	Nagnut	Vertikalan
1. Vrlo mali razmak pukotina, <2 in	9	11	13	10	12	9	9	7
2. Mali razmak pukotina, 2-6 in	13	16	19	15	17	14	14	11
3. Srednji razmak pukotina, 6-12in	23	24	28	19	22	23	23	19
4. Srednji razmak pukotina do blokovi, 1-2 ft	30	32	36	25	28	30	28	24
5. Blokovi masivnih stijena, 2-4ft	36	38	40	33	35	36	34	28
6. Masivna stijena, >4ft	40	43	37	37	40	40	38	34

Parametar C predstavlja utjecaj toka podzemne vode i uvjeta pukotina temeljen na ukupnoj kvaliteti stijenske mase kombiniranjem A i B parametra, stanju pukotina te vrijednosti toka podzemne vode (Tablica 7.)

Tablica 7. Prikaz određivanja parametra C

	Suma parametara A + B					
	13 - 44			**45 – 75**		
Očekivani dotok vode	**Stanje pukotina**					
gpm /1000 ft tunela	Dobro	Povoljno	Slabo	Dobro	Povoljno	Slabo
Nikakav	22	18	12	25	22	18
Slab <200gpm	19	15	9	23	19	14
Srednji 200-1000gpm	15	11	7	21	16	12
Jak > 1000gpm	10	8	6	18	14	10

Dobivena vrijednost RSR iz prethodno spomenutog izraza povezuje kvalitetu stijenske mase s potrebnom podgradom. Tip potrebne podgrade zavisne od načina iskopa i raspona tunela prikazuje se krivuljama (Slika 11).



Slika 11: Prikaz određivanja potrebne podgrade

(Hoek, 2006)

Geomehanička klasifikacija – RMR

RMR (*rock mass rating*) klasifikacijski sustav razvijen je 1973. godine, izvorna uporaba bila je za potrebe klasifikacije stijenske mase te za projektiranje podgradnog sistema za tunel. Prva cijela verzija s detaljima primjene objavljena je prvi puta 1976. godine pod nazivom RMR76 od strane Bieniawskog. Tijekom godine sustav je mijenjan na temelju rezultata provjere i primjene na većoj količini podzemnih građevina u različitim sredinama i uvjetima (Vrkljan, 2003). Bieniawski je 1989. godine iznio posljednju promjenu RMR klasifikacijskog sustava pod nazivom RMR89.

Kako se neka istraživanja vezuju na klasifikaciju iz 1976.godine, razlikujemo ove dvije varijante: RMR76 i RMR89. RMR klasifikacija je prvenstveno namijenjena za definiranje podgrade tunela i različitih drugih podzemnih građevina. Tijekom vremena se počela koristiti i kao polazište za određivanje i mehaničkih parametara stijenskih masa.

Ovaj sustav klasifikacije uzima u obzir 6 parametara (Vrkljan, 2003):

- Jednoosnu tlačnu čvrstoću
- RQD index kvalitete jezgre
- Razmak diskontinuiteta
- Stanje diskontinuiteta
- Uvjete podzemne vode
- Orijentaciju diskontinuiteta

Vrijednosti bodovanja za navedene parametre prikazani su na tablici 8 (Bieniawski 1976), a vodič za određivanje stanja pukotina prikazan je na tablici 9. Zbrajanjem bodova za navedene parametre te dodavanjem popravke s obzirom na orijentaciju pukotinskog sustava i inženjerski problem koji se rješava, a prema tablici 10 dobiva se vrijednost RMR-a. Ne postoji neka definicija povoljne ili nepovoljne orijentacije pukotina, već treba riješiti na svakom problemu posebno. Prijedlog utjecaja orijentacije sustava za podzemne vode dobijemo iz tablice (Tablica 11) (Bieniawski 1976).

Tablica 8. Klasifikacijski parametri i pripadajuća vrijednost bodova RMR-a

Parametar									
1.	**Čvrstoća stijenskog materijala**	**Indeks čvrstoće s opterećenjem u točci**	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Za ove vrijednosti koristiti jednoosnu čvrstoću		
		Jednoosna tlačna čvrstoća	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	10-25 MPa	3-10 MPa	1-3 MPa
	Bodovi		15	12	7	4	2	1	0
2.	**Indeks kakvoće jezgre [%]**		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
	bodovi		20	17	13	8	5		
3.	**Razmak diskontinuiteta**		>2m	0,6-2m	0,2-0,6m	0,06-0,2m	>0,06m		
	bodovi		20	15	10	8	5		
4.	**Stanje pukotina**		Vrlo hrapave, prekinute, nerazdvojne, zidovi stijene, nerastrošeni	Neznatno hrapave površine, zijev >1mm,neznatno rastrošeni zidovi	Neznatno hrapave površine, zijev >1mm,vrlo rastrošeni zidovi	Glatka površina ili ispuna >5mm ili zijev 1-5mm, neprekinute	Meka ispuna debljine >5mm ili zijev >5mm, neprekinute		

	bodovi		30	25	20	10	0
5.	**Uvjeti stanja podzemne vode**	Dotok na 10m tunela	Nikakav	<10	10-25	25-125	>125
		Omjer pritiska vode u pukotini i većeg glavnog naprezanja	0	0-0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	>0,5
		Opće stanje	Potpuno suho	Vlažno	Mokro	Voda pod malim pritiskom	Ozbiljni problemi s vodom
	bodovi		15	10	7	4	0

Tablica 9. Vodič za klasifikaciju stanja pukotine (točka 4. u tablici 7.)

Parametar	**Bodovi**				
Duljina pukotine	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
	6	4	2	1	0
Zijev	Zatvorene	<0,1 mm	0,1-10 mm	1-5 mm	>5 mm
	6	5	4	1	0
Hrapavost	Vrlo hrapave	Hrapave	Blago hrapave	Glatke	Zaglađene
	6	5	3	1	0
Ispuna	Tvrda ispuna			Meka ispuna	
	Nema	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm
	6	5	3	1	0
Ratrošenost zidova pukotine	Nerastrošeni	Blago rastrošeni	Srednje rastrošeni	Izrazito rastrošeni	Raspadnuti
	6	5	3	1	0

Tablica 10. Popravak za orijentaciju pukotinskog stanja

Pružanje i pad	**Vrlo povoljno**	**Povoljno**	**Dobro**	**Nepovoljno**	**Vrlo nepovoljno**
Tuneli	0	-2	-5	-10	-12
Temelji	0	-2	-7	-15	-25
Kosine	0	-5	-25	-50	-60

Tablica 11. Utjecaj orijentacije dominantnog pukotinskog sustava na podzemne otvore

Smjer nagiba pukotina okomit na os tunela			
Iskop u smjeru nagiba pukotina		Iskop u suprotnom smjeru od nagiba pukotina	
Nagib 45°-90°	Nagib 20°-45°	Nagib 45°-90°	Nagib 20°-45°
Vrlo povoljno	Povoljno	Dobro	Nepovoljno
Smjer nagiba pukotina paralelan s osi tunela		**Neovisno o smjeru nagiba pukotina**	
Nagib 20°-45°	Nagib 45°-90°	Nagib 0°-20°	
Dobro	Vrlo nepovoljno	dobro	

Prema sustavu RMR-a stijenska mase se klasificira u 5 kategorija prikazanih u tablici 12. U istoj slici prikani su i parametri posmične čvrstoće pojedine kategorije stijenske mase (Bieniawski 1974.).

Tablica 12. Kategorija stijenske mase prema RMR klasifikaciji

Broj bodova (RMR)	Kategorija stijenske mase		Prosječno vrijeme stabilnosti nepodgrađenog otvora	Približne vrijednosti čvrstoće stijenske mase na smicanje	
				c (Kpa)	φ (°)
100-81	I.	Vrlo dobra	20 god. za raspon 15m	>400	>45
80-61	II.	Dobra	1 god. za raspon 10 m	300-400	35-45
60-41	III.	Povoljna	1 tjedan za raspon 5 m	200-300	25-35
40-21	IV.	Slaba	10 sati za raspon 2,5m	100-200	15-25
<21	V.	Vrlo slaba	30 min za raspon 1 m	<100	<15

Bieniawski je također objavio i preporuke za iskop i podgrađivanje tunela. Uspostavila se veza između RMR sustava te kriterija čvrstoće i deformabilnosti po čemu ova klasifikacija dobiva važnost.

Q klasifikacija

Q klasifikaciju (*Rock tunnelling quality index*, Q) razvili su Barton, Lien i Lunde 1974. godine u Norveškoj. Sustav služi za određivanje kvalitete stijenske mase i parametara podgradnog sustava za probleme podzemnih otvora (Vrkljan, 2003).

Klasifikacija se određuje na temelju 6 parametara iz kojih izračunavamo koeficijent Q iz izraza:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

RQD – indeks kakvoće jezgre

- Jn – broj familija pukotina
- Jr – indeks hrapavosti površine pukotina
- Ja – indeks pukotinske ispune najslabijeg pukotinskog sustava
- Jw – faktor koji uzima u obzir vodu unutar pukotina
- SRF – faktor koji uzima u obzir naponsko stanje

Tablica 13. Klasifikacija parametara korištenih u Q-klasifikaciji (Barton i dr., 1974.)

Opis		Vrijednost	Napomene	
1. Indeks kvalitete jezgre		**RQD**	Kada se izmjeri RQD<10 (uključujući i 0) kod izračunavanja vrijednosti Q uzima se da je RQD=10 Dovoljno je točno da se RQD izrazi u intervalima od 5 (100; 95, 90 i.t.d)	
A	vrlo slaba	**0-25**		
B	slaba	**25-50**		
C	povoljna	**50-75**		
D	dobra	**75-90**		
E	odlična	**90-100**		
2. Boj familija pukotina (J)		**Jn**	Na križanjima koristi ($3,0*J_n$) Za portale koristi ($2,0*J_n$)	
A.	masivna stijena bez ili s nekoliko pukotina	**0,5-1,0**		
B.	jedna familija pukotina	**2**		
C.	jedna familija pukotina i slučajne pukotine	**3**		
D.	dvije familije pukotina	**4**		
E.	dvije familije pukotina i slučajne pukotine	**6**		
F.	tri familije pukotina	**9**		
G.	tri familije pukotina i slučajne pukotine	**12**		
H.	četiri ili više familija pukotina, slučajne pukotine, jako ispucale stijene	**15**		
J.	razdrobljena stijena slična zemlji	**20**		
3. Indeks hrapavosti pukotine		**Jr**	Dodaj 1,0 ako je srednji razmak kod mjerodavnog skupa pukotina veći od 3 m J_r=0,5 za planrne pukotine koje imaju izraženu lineaciju	
a) kontakt zidova pukotina				
b) kontakt zidova pukotine prije posmika od 10 cm				
A.	diskontinualne pukotine	**4**		
B.	hrapave ili nepravilne pukotine, valovite	**3**		
C.	glatke, valovite	**2**		
D.	skliske valovite	**1,5**		
E.	hrapave ili nepravilne, ravne	**1,5**		
F.	glatke, ravne	**1,0**		
G.	skliske, ravne	**0,5**		
c) nema kontakta zidova pukotina pri posmiku				
H.	glinovita min. ispuna dovoljne debljine da spriječi kontakt stijenki pukotine	**1,0**		
J.	pjeskovita, šljunčana ili zdrobljena ispuna dovoljne debljine da spriječi kontakt stijenki pukotine	**1,0**		
4. Indeks alteracije pukotina		**Ja**	**Približni rezidualni kut trenja (°)**	Rezidualni kut trenja odnosi se na produkte alteracije ako postoje
a) kontakt zidova pukotina				
A.	zbijena, zacijeljena, čvrsta pukotina, nerazmekšavajuća, nepropusna ispuna	**0,75**		
B.	nepromijenjen zid pukotine, površina samo s mrljama	**1,0**	25-35	
C.	neznatno promijenjeni zid pukotine. Nerazmekšavajuća mineralna prevlaka pjeskovite čestice, dezintegrirana stijena bez gline itd.	**2,0**	25-30	
D.	prašinasta ili pjeskovito-glinovita prevlaka, mali dio glinene frakcije (nerazmekšavajuća)	**3,0**	20-25	
E.	prevlaka od glinenih materijala,meka ili s niskim kutem trenja (diskontinualna prevlaka, 1-2mm ili manje debljine)	**4,0**	8-16	
b) kontakt zidova pukotine prije posmika od 10 cm				
F.	pjeskovite čestice, dezintegrirana stijena bez gline itd.	**4,0**	25-30	
G.	jako prekonsolidirana nerazmekšavajuća glinovito mineralna ispuna (neprekinuta, <5mm debljine)	**6,0**	16-24	
H.	srednja ili mala prekonsolidacija, razmekšana glinovito mineralna ispuna (neprekinuta <5mm debljine)	**8,0**	12-16	
J.	bubriva glinovita ispuna tj. montmorilonit (neprekinuta <5mm debljine). Vrijednosti **Ja** ovise o postotku bubrivih glinovitih čestica, pristupu vode itd.	**8,0-12,0**	6-12	
c) nema kontakta zidova pukotina pri posmiku				

K,L,M	zone ili pojasevi dezintegrirane ili zdrobljene stijene i gline (vidi G, H i J za opis uvjeta u pogledu gline)	6,8 ili 8-12		6-24	
N	zone ili pojasevi prašinaste ili pjeskovite gline, mala frakcija gline (nerazmekšavajuća)	5,0			
O,P,R	debela neprekinuta zona ili pojas gline (vidi G,.H i J za opis uvjeta u pogledu gline)	10, 13. ili 13-20		6-24	
5. Faktor pukotinske vode		**J_W**		**Približni tlak vode (bara)**	
A.	suhi iskop ili manji priliv (dotok<5l/min, lokalno)	1,00		<1	
B.	srednji priliv ili tlak (ispuna ponegdije isprana iz pukotina)	0,66		1,0-2,5	1. faktori C iD su grubo određeni; Povećaj Jw ako je ugrađena drenaža
C.	veliki priliv ili visoki tlak vode u zdravoj stijeni (pukotine bez ispune)	0,50		2,5-10,0	
D.	veliki priliv ili visoki tlak vode, značajno ispiranje ispune pukotina	0,33		2,05-10,0	2. Nije razmatrano smrzavanje vode
E.	iznimno veliki priliv ili tlak vode kod miniranja, opada s vremenom	0,2-0,1		>10	
F.	iznimno veliki priliv ili tlak vode koji se nastavlja bez zamjetljivog opadanja	0,1-0,05		>10	
6 Faktor redukcije naprezanja		**SRF**			
a) oslabljene zone sijeku iskop što može uzrokovati rastresanje stijenske mase pri iskopu					
A.	učestala pojava rasjed. zona koje sadrže glinu ili kem. raspadnutu stijenu, vrlo rastresena okolna stijena (sve dubine)	10,0			
B.	jedna rasjedna zona koja sadrži glinu ili kem. raspadnutu stijenu (dubina iskopa ≤ 50m)	5,0			
C.	jedna rasjedna zona koja sadrži glinu ili kem. raspadnutu stijenu (dubina iskopa ≥ 50m)	2,5			
D.	učestale rasjedne zone u zdravoj stijeni (bez gline) rastresena okolna stijena (sve dubine)	7,5			
E.	jedna rasjedna zona u zdravoj stijeni (bez gline, dubina iskopa ≤ 50m)	5,0			
F.	jedna rasjedna zona u zdravoj stijeni (bez gline, dubina iskopa > 50m)	2,5			
G.	rastresene otvorene pukotine, jaka ispucanost itd. (sve dubine)	5,0			
b) Zdrava stijena, problemi naprezanja		**σ_c/σ_1**	**σ_t/σ_1**	**SRF**	
H	niska naprezanja, blizu površine	>200	>13	2,5	
J	srednja naprezanja	200-10	13-0,66	1,0	
K	visoka naprezanja, vrlo zbijena struktura (obično povoljno za stabil., može biti nepovoljno za stabilnost zidova)	10-5	0,66-0,33	0,5-2,0	
L	gorski udari slabog intenziteta (masivna stijena)	5-2,5	0,330,16	5,0-10,0	
M	gorski udari jakog intenziteta (masivna stijena)	<2,5	<0,16	10,0-20,0	
c) zgnječena stijena: plastični tok stijene pod utjecajem visokog naprezanja		**SRF**			
N	slabi tlak zgnječene stijene	5,0-10,0			
O	jaki tlak zgnječene stijene	10,0-20,0			
d. bubriva stijena, intenzitet ovisi o raspoloživoj vodi					
P	slabi tlak bubrive stijene	5,0-10,0			
R	jaki tlak bubrive stijene	10,0-15,0			

Reduciraj ove vrijednosti SRF-a za 25-50% samo ako relevantne posmične zone ne presjecaju iskop

Za jako anizotropno polje naprezanja (ako je izmjereno):

- kada je $5 \le \sigma_1/\sigma_3 \le 10$, reducirati σ_C i σ_t na 0,8 σ_C i 0,8 σ_t
- kada je $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reducirati σ_C i σ_t na 0,6 σ_C i 0,6 σ_t

σ_c i σ_t-Jednoosna tlačna i vlačna čvrstoća

σ_1 i σ_3-Veće i manje glavno naprezanje

U slučajevima kad je debljina nadsloja manja od širine raspona tunela SRF treba povećati od 2,5 na 5 (vidi H)

Analizom jednadžbe može se zaključiti da je indeks Q zapravo funkcija tri parametara (Vrkljan, 2004). Prvi član (RQD/Jn) nam predstavlja relativnu veličinu blokova. Drugi član (Jr/Ja) nam daje posmičnu čvrstoću između blokova odnosno procjenjuje mehaničku otpornost stijenske mase. Treći član (Jw/SRF) različito

naprezanje kod stijenskih masa. Klasifikacije parametara kojima određujemo index Q dobijemo pomoću tablice (Tablica 13).

Kakvoća stijenske mase izrađena preko Q klasifikacije koristi se za izračune pritiska na podgradu tunela i za dimenzioniranje podgrade. Globalna podjela klase stijenske mase prema vrijednostima koeficijenta Q prikazana je u tablici (Tablica 14.).

Tablica 14. Kategorizacija stijenske mase prema Q klasifikaciji

Q	Kategorija stijenske mase
0.001 – 0.01	Krajnje slaba
0.01 – 0.1	Iznimno slaba
0.1 – 1.0	Vrlo slaba
1.0 – 4.0	Slaba
4.0 – 10.0	Povoljna
10.0 – 40.0	Dobra
40.0 – 100.0	Vrlo dobra
100.0 – 400.0	Iznimno dobra
400.0 – 1000.0	Krajnje dobra

Q klasifikacija je povezana s ekvivalentnom dimenzijom iskopa (De) koji su povezali Barton i dr. (1974.) zbog želje povezivanja Q klasifikacije s potrebnim podgradama tunela. Dimenzija, De, dobiva se djeljenjem raspona, promjera i visine tunela s veličinom nazvanom ESR (excavation support ratio).

Tablica 15. Vrijednosti indeksa podgrade

Kategorija iskopa		ESR
A	Privremeni rudarski otvori	3 – 5
B	Vertikalna okna: Kružni presjek Pravokutni presjek	 2,5 2,0
C	Stalne rudarske prostorije, hidrotehnički tuneli (nisu uključeni tuneli pod visokim tlakom), pilot tuneli, tuneli kod razrade profila za veće iskope	1,6
D	Skladišta, postrojenja za tretman vode, manje značajni cestovni i željeznički tuneli, prilazni tuneli i slično	1,3
E	Skladišta nafte, strojarnice, glavni cestovni i željeznički tuneli, skloništa, portali, raskrižja	1,0
F	Podzemno nuklearne centrale, željezničke postaje, sportski i javni objekti, tvornice i slično	0,8

Vrijednosti ESR dobivene su empirijski mjerenjima na 38 kategorija iskopa, a prikazane su u tablici (Tablica 15.) (Barton i dr., 1974). Grimstad i Barton kasnije su predložili podgradne sustave odnosom na Q indeks i ekivalentnu dimenziju u izdvojenih 9 kategorija stijenske mase. s armiranim lukovima od mlaznog betona i sidrenje, lijevani armirani beton.

4. PRIMJER IZRAČUNA

Svaki klasifikacijski sustav temeljen je na indeksnim parametrima koji su potrebni da bi se stijenska masa mogla klasificirati. Da bi se došlo do parametara potrebni su istražni radovi radi utvrđivanja inženjerskogeoloških značajki stijena, tektonike tla te brojnih drugih potrebnih parametara.

Terenski dio istraživanja je započeo tijekom mjeseca lipnja potpisom ugovora i ustupanja odgovarajućih topografskih podloga duž navedene trase od strane Naručitelja istraživanja, a završena su krajem mjeseca kolovoza. Problem su bili konačna verzija trase (visinski i prostorno) i definiranje položaja objekata duž trase. Od samog početka terenskih istraživanja u tijeku je bilo istražno bušenje, koje smo determinacijom pratili sve do završetka zacrtanog programa krajem mjeseca srpnja. Program i lokacije bušotina izradili su stručnjaci IGH Zagreb, a samo bušenje dvije tvrtke prema narudžbi i ugovoru sklopljenih s IGH Zagreb. S naručiteljem istraživanja smo imali stalne kontakte obzirom na brojne manje izmjene i dorade na trasi i objektima od strane projektanta. Naručitelj je bio stalno u mogućnosti koristiti radne podloge uključivo i logove i slike jezgre bušotina, kao i sve ostale radne materijale prikupljene tijekom višemjesečnog rada na terenu (Biondić, 2006).

Inženjerskogeološka istraživanja za objekte na trasi su rađena na topografskim podlogama M 1:1.000, prema od strane Naručitelja zadanima stacionažama u širini od 50 m sa svake strane trase. Zadane površine su detaljno inženjerskogeološki obrađene na brojnim mjernim točkama duž trase. Mjerena su 3 najvažnije vrste pukotinskih sustava, na kojima je temeljena klasifikacija stjenovite mase prema Bieniawskom – slojne plohe ili dijastrome (SS), aksijalne ravnine (AR), pukotine okomite na os B (OB) i ostali pukotinski sustavi, ukoliko su bili izraženi u odnosu na osnovna tri smjera. Mjeren je razmak među pojedinim pukotinama, dužina njihovih prostiranja vidljivih na površini terena, zapunjenost diskontinuiteta i stanje diskontinuiteta. Svi ti podaci obrađeni su u klasifikacijskim tabelama, koje su

priložene za svaki strukturni blok na svakom pojedinom objektu. Pri lociranju mjernih točaka na terenu je korišten GPS uređaj GARMIN, a za terensku ocjenu čvrstoće stijene Schmidtov čekić.

Duž trase ceste Karamatići - Luka Ploče rađena su detaljna inženjerskogeološka istraživanja za vijadukte, usjeke, prolaze i potporne zidove na trasi (Biondić, 2006).

Trasa autoceste na predmetnom području je u geološkom smislu projektirana južnim rubnim dijelom masiva Biokova, koji se antiklinalno zatvara prema delti rijeke Neretve. To je razlog ujednačenog litostratigrafskog sastava najvećeg dijela predmetne trase, gdje najveći dio izgrađuju vapnenci i vapnenačke breče gornje kredne starosti. Značajne dijelove terena duž trase izgrađuju i naslage kvartarne starosti, čije je dubinsko i površinsko prostiranje najveće u delti rijeke Neretve na području Ploča. Za litostratigrafsku interpretaciju stijena duž zadane trase korištena je Osnovna Geološka Karta – listovi Ploče i Metković i Tumači tih karata (MARINČIĆ et al., 1977; RAIĆ & PAPEŠ, 1972).

4.1. KLASIFICIRANJE STIJENSKIH MASA

Za potrebe završnog rada korišteni su podaci dobiveni inženjerskogeološkim istraživanjima objekta - vijadukata usjeka, prolaza i potpornih zidova na trasi autoceste A1: granica BIH – Mali Prolog – Ploče; dionica: Mali Prolog – Ploče; poddionica: ČCP Karamatići – Ploče; spojna cesta ČCP Karamatići - Luka Ploče (Biondić, 2006). Istraživanjima su dobivani podaci koji su obrađeni uz pomoć Microsoft Office Excel programa. Pritom su korišteni unaprijed pripremljeni Excel predlošci (Palmstrom, 2012) za izračun Q, RMR i RMi klasifikacije stijenskih masa. U nastavku je prikazan kratki opis korištenih listova kao i nekoliko primjera izračuna.

U proračunskoj tablici u Excelu kombiniraju se tri numerički, empirijski inženjerski klasifikacijski sustavi za procjenu potpore stijena; Q klasifikacija, RMR klasifikacija I

RMi indeksni parametar. Koriste se četiri excel pomoćni listovi: ulazni podaci, tablice parametara, izračuni i rezultati.

U listu ˝ulazni podaci˝, ulazne ocjene vrijednosti parametara primjene u tri sustava date su ili kao ulazni simboli ili kao vrijednosti. Izračuni se rade u listu ˝izračuni˝. Kako tri spomenuta sustava primjenjuju dijelom iste ulazne parametre na stijenskoj masi i na tlu, ulazne vrijednosti parametara su kombinirane. Za mnoge se parametre automatski upotrebljavaju uobičajene vrijednosti ako nije navedena vrijednost. Tako je za grubu procjenu, dovoljno umetnuti samo podatke za nekoliko parametara. Međutim, što je više podataka dano, rezultati će biti precizniji.

INPUT DATA on TUNNEL and GROUND CONDITIONS

used in the RMR, Q and RMi rockmass classification systems

RocMass r. 2.2 - 2.1

Project: IG program - vijadukt Vrila **Date:** 3.6.2017.

Tunnel: Vijadukt Vrila **Location:** Spojna cesta ČCP Karamatići – Luka Ploče

Observer: Martin Lakušić **Note:**

Rock(s): Vapnenac

Input symbols are shown in blue below; see also 'Parameter tables'

to 'Parameter'	Input parameters				of symbols and values <-- INPUT
	Tunnel span or diameter (Dt)				297
	Tunnel wall height (Wt)				4.14
A1	Compressive strength of rock (UCS or σ_c):				100
B1	Degree of jointing	RQD (Rock Quality Designation):		RQD =	25
B2		Block volume (Vb):		Vb =	
B3		Volumetric joint count (Jv):		Jv =	
B4		Joint spacing:	(a = > 2m; b = 0.6 - 2m; c = 0.2 - 0.6m; d = 0.06 - 0.2m; e = < 0.06m)		c
C1	Jointing pattern	Block shape[1]:	(a=cubical blocks; b=slightly long or flat blocks; c=moderately long or flat blocks; d=very long or flat blocks)		bc
C2		Joint sets:	(a = no sets; b=1 set; c=1 set+random; d=2 sets; e=2 sets+random; f=3 sets; g=3 sets+random; i = crushed)		f
C3		Orientation of main joint set:	(a = very favourable; b = favourable; c = fair; d = unfavourable; e = very unfavourable)	In roof	c
C4				In wall	d
D1	Joint roughness	Joint smoothness:	(a = v. rough; b = rough; c = slightly rough; d = smooth; e = polished; f = slickensided; g = filled joints)		g
D2		Joint undulation:	(a = discontin.; b = strongly undulating; c = mod. undul.; d = slightly undul.; e = planar; g = filled joints)		g
D3	Joint alteration // condition	No filling:	(a = healed; b = fresh // no filling; c = slightly altered; d = altered; e = sand/silt coating; f = clay coat)		m
		Filling < ca. 5mm thickness:	(h = sand / silt; j = hard clay; l = soft clay; n = swelling clay)		
		Filling > ca. 5mm thickness:	(i = sand / silt; k = hard clay; m = soft clay; o = swelling clay)		
D4	Joint length:		(a = crack; b = parting; c = v. short (0.1-1m); d = short (1-3m); e = medium (3-10m); f = long (10-30m); g = seam or shear)		d
D5	Joint separation:		(a = none; b = v.tight (<0.1mm); c = tight (0.1-0.5mm); d = mod.open (0.5-2.5mm); e = open (2.5-10mm); f = v. open)		e
E	Interlocking or compactness of rockmass structure:		(a = very tight; b = tight or compact ; c = disturbed; d = poorly interlocked)		d
F	Ground water inflow to tunnel or cavern:		(a = dry; b = damp; c = wet; d = dripping; e = gushing; f = flowing; g = heavily flowing)		a
G1	Stress level:	*(Input for Q and RMi)*	(a = very low stress level; b = low stress; c = moderate / medium stress; d = high stress)		h
G2	Over-stressing	Rock spalling or bursting:	(e = moderate slabbing; f = rock burst; g = heavy burst)	Input of SRF	
		Squeezing:	(h = mild squeeze; i = heavy squeeze)		
H1	Weakness zone (fault, etc.)	Type:	(j = multiple zones; k = single zone <50m; l = single zone >50m; m = multiple shears; q = crushed)		
H2		Thickness or width of zone (m):			7
H3		Orientation of zone:	(a = very favourable; b = favourable; c = fair; d = unfavourable; e = very unfavourable)	In roof	c
H4				In wall	c

Slika 12:Primjer dobivenih rezultata pomoću excel listova

U listu ″tablice parametara″, tablice su predstavljene za sve ulazne parametre. U ovom listu je moguće prilagoditi ulazne ocjene ili vrijednosti za većinu parametara. Ulazni parametri u listu ″ulazni podaci″ povezani su s vrijednostima parametara danim u listu ″tablice parametara″.

Vrijednosti ili ocjene ulaznih parametara koji se koriste za izračunavanje vrijednosti RMR, Q i RMi su dani u listu ″rezultati″.

Nivo napona ili utjecaj naprezanje stijena mora se procijeniti i unijeti u listu ″ulazni podaci″ u skladu s prikazanim simbolima. Popis ulaznih parametara u listu ″ulazni podaci″ mogu se ukloniti.

Primjer 1. Usjek

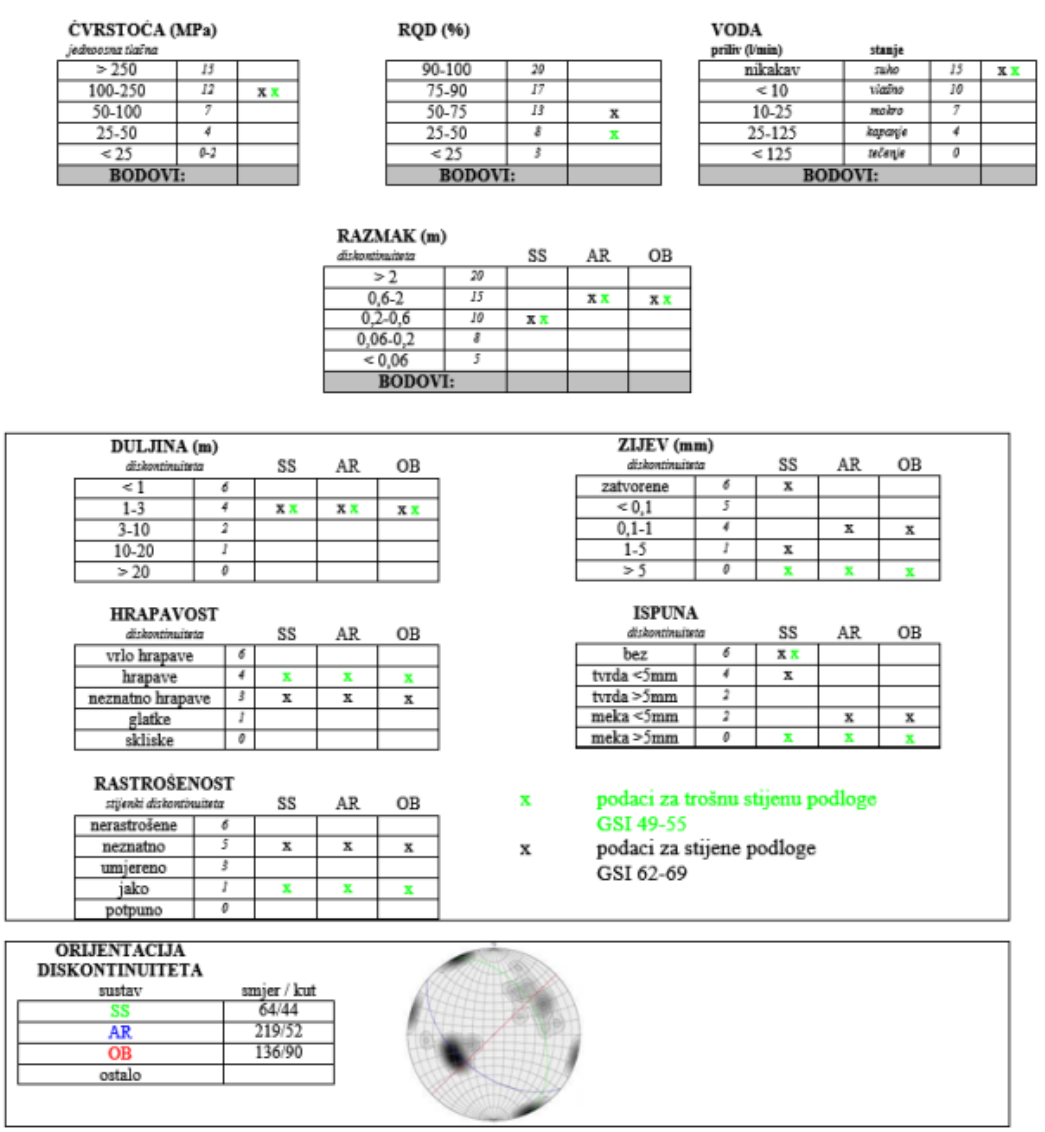
Inženjerskogeološko kartiranje za potrebe izgradnje Autoceste na dijelu GRANICA BIH- MALI PROLOG- PLOČE, dionica: Mali Prolog – Ploče, spojna cesta ČPC Karamatići – Luka Ploče: **Usjek na stacionaži 1+050 do 1+300**.

Kratki opis inženjerskogeoloških značajki terena

Usjek dužine 250 m presijeca padinu izgrađenu od rudistnih vapnenaca senonske starosti. To su dobro uslojeni vapnenci sive i bijele boje s puno rudista, karakterističnim provodnim profilom za najmlađi dio gornje krede. Vapnenci su mjestimice brečasti i imaju utisnuti bitumen u prsline i posebno međuslojne pukotine (do 5 mm). U dolinskom dijelu kod naselja Zmijarevići ima većih pojava crvenice, ali to nema utjecaja na trasu ceste, koja je na padini povrh dolinskog dijela terena. Područje usjeka je detaljno inženjerskogeološki snimljeno na topografskoj podlozi M 1:1.000 širine koridora 100 m. Duž osi ceste na lokaciji usjeka je izrađen jedan uzdužni (GLP-55) i jedan poprečni (GLP-54) dubinski seizmički profil i jedna istražna bušotina: S-LP-54dubine 15,00 m. Iz bušotine su

uzeta 3 poremećena uzorka i izvršeno 3 ispitivanja na jezgri bušotine Schmidtovim čekićem.

Tablica 16. Inženjerskogeološke značajke terena



ČVRSTOĆA (MPa) – jednoosna tlačna

> 250	15	
100-250	12	x x
50-100	7	
25-50	4	
< 25	0-2	
BODOVI:		

RQD (%)

90-100	20	
75-90	17	
50-75	13	x
25-50	8	x
< 25	3	
BODOVI:		

VODA

priliv (l/min)	stanje		
nikakav	suho	15	x x
< 10	vlažno	10	
10-25	mokro	7	
25-125	kapanje	4	
< 125	tečenje	0	
BODOVI:			

RAZMAK (m) – diskontinuiteta

		SS	AR	OB
> 2	20			
0,6-2	15		x x	x x
0,2-0,6	10	x x		
0,06-0,2	8			
< 0,06	5			
BODOVI:				

DULJINA (m) – diskontinuiteta

		SS	AR	OB
< 1	6			
1-3	4	x x	x x	x x
3-10	2			
10-20	1			
> 20	0			

ZIJEV (mm) – diskontinuiteta

		SS	AR	OB
zatvorene	6	x		
< 0,1	5			
0,1-1	4		x	x
1-5	1	x		
> 5	0	x	x	x

HRAPAVOST – diskontinuiteta

		SS	AR	OB
vrlo hrapave	6			
hrapave	4	x	x	x
neznatno hrapave	3	x	x	x
glatke	1			
skliske	0			

ISPUNA – diskontinuiteta

		SS	AR	OB
bez	6	x x		
tvrda <5mm	4	x		
tvrda >5mm	2			
meka <5mm	2		x	x
meka >5mm	0	x	x	x

RASTROŠENOST – stijenski diskontinuiteta

		SS	AR	OB
nerastrošene	6			
neznatno	5	x	x	x
umjereno	3			
jako	1	x	x	x
potpuno	0			

x podaci za trošnu stijenu podloge GSI 49-55

x podaci za stijene podloge GSI 62-69

ORIJENTACIJA DISKONTINUITETA

sustav	smjer / kut
SS	64/44
AR	219/52
OB	136/90
ostalo	

Pomoću excel listova dobiveni su rezultati klasifikacije prikazani u tablici 17.

Područje usjeka je u strukturno tektonskom bloku I-bc, određenom temeljem inženjerskogeološke interpretacije trase na topografskoj podlozi M 1:5.000. Slojevi vapnenaca su nagnuti prema istok – sjeveroistoku pod kutom od oko 45°, što znači dijagonalno na trasu, ali obzirom na nagib slojeva niz padinu, postoji opasnost od

urušavanja pojedinih blokova duž slojnih ploha. Na području usjeka su registrirana tri manje izražena rasjeda smjera AR bez većih pojava glinovitih džepova. Debljina slojeva je 0,2 do 0,6 m. Prema jezgri istražne bušotine i geofizičkih istraživanja površinska trošna zona je dosta tanka (do 3 m), a stijena dobre kvalitete bez obzira na proslojak vapnenačke breče s bitumenom u donjem dijelu usjeka. RQD jezgre bušotine se kreće u rasponu 50 do 75 %.

Orijentacija diskontinuiteta je: SS 64/44; AR 219/52; OB 136/90.
GSI je analiziran za stijene podloge i za trošnu površinsku zonu i kreće se u slijedećim rasponima: stijene podloge 62 – 69; površinska trošna zona 49 – 55.

Tablica 17. Rezultati izračuna

The input data given and the calculated results

Project: Usjek 2 **Date:** 3.lip.17
Tunnel: Zmijarevići **Location:** Spojna cesta ČCP Karamatići – Luka Ploče
Observer: Arcella, Brežnjak, Barbir, Bušić **Note:**
Rock(s):

Input parameters				Input values and ratings used		
				RMR 1989	Q 1993	RMi 2008
Tunnel data		Tunnel span (m)		Span = 10	Span = 10	Dt = 10
		Wall height (m)		Wall = 5	Wall = 5	Wt = 5
A. Rock	A1	Compressive strength of intact rock:		A1 = 12	-	σ_c = 100 MPa
B. Degree of jointing	B1	Rock Quality Designation (RQD):		A2 = 5	RQD = 13	-
	B2	Block volume:		-	-	Vb = 0,616 dm3
	B3	Joint spacing:		A3 = 8	-	-
C. Jointing pattern	C1	Block shape factor:		-	-	β = 36
	C2	Number of joint sets:		-	Jn = 9	Nj = 1
	C3	Orientation of main	in roof:	B = -2	-	Co = 1
	C4	joint set	in walls:	-	-	Co = 1
D. Joint charac-teristics	D1	Joint smoothness:	roughness:	A4c = 3	Jr = 1,75	js = 1,25
	D2	Joint undulation:		-		jw = 1,4
	D3	Joint alteration	weathering:	A4e = 6	Ja = 1	jA = 1
			filling:	A4d = 6		
	D4	Joint length or persisstence:		A4a = 2	-	jL = 1
	D5	Joint separation or aperture:		A4b = 4	-	-
E. Inter-locking	E	Compactness of rockmass:		-	-	IL = 1
F. Ground water	F	Ground water inflow:		A5 = 15	Jw = 1	GW = 1
G. Rock stresses	G1	Stress level:		-	SRF = 1	SL = 1
	G2	Stress ratio//ground competency:		-		Cg = -
H. Weakness zones	H1	Type of weakness zone:		-		-
	H2	Thickness or width of zone:		-	-	Tz = -
	H3	Orientation	in roof:	-	-	Co = -
	H4	of zone	in walls:	-	-	Co = -

RESULTS FROM CALCULATIONS (for conditions in tunnel or cavern)

		RMR	Q	RMi
Continuity of rockmass (related to tunnel) →		-	-	*Continuous / particulate*
Interlocking of rockmass structure →				*Tight structure*
Rock mass quality (approx. strength, σ_{cm})		-	-	$\sigma_{cm} \approx$ **RMi = 2,29**
				Moderate
Ground quality (related to stability)	in roof	**RMR = 59**	**Q = 2,527778**	**Gc = 2,29**
		Fair	*Poor*	*Fair*
	in walls	RMR = 59	Q_{wall} = 6,319444	Gc_{wall} = 11,5
Blockiness (related to block instability)	in roof	-	-	**Sr = 88,1**
				Unfavourable
	in walls	-	-	Sr_{wall} = 44,1
				Unfavourable
Weakness zone		-		
Rockmass stresses		-	*Medium stress level*	
Potential stress problems →				*Minor*
Limitations				

Sr = Size ratio (geometrical factor involving block diameter, tunnel span, plus number of joint sets and orientation of joints)
Gc = Ground condition factor
Cg = Competency of ground (Cg = σ_{cm} / σ_θ = RMi / σ_θ)

Reference: A. Palmström, Q-RMR-RMi, version 3, RockMass AS, November 2012

Primjer 2. Usjek

Inženjerskogeološko kartiranje za potrebe izgradnje Autoceste na dijelu GRANICA BIH- MALI PROLOG- PLOČE, dionica: Mali Prolog – Ploče, spojna cesta ČPC Karamatići – Luka Ploče: **Usjek na stacionaži 1+380 do 1+580**.

Kratki opis inženjerskogeoloških značajki terena

Usjek dužine oko 200 m je na ulazu u tunel Zmijarevići. Dubina usjeka je oko 14 do čak 19 m na desnoj traci i do 11 m na lijevoj traci. Naime, u ovom dijelu trase cesta još je uvijek dvostruka s dva duboka usjeka u padini do ulaska trase u tunel. Na tom području je bilo najviše visinskih promjena trase, pa je prva varijanta bila s dužim tunelom, a zatim su promjene išle prema smanjenju dužine tunela, a samim time i povećanju usjeka na ulazu u tunel. Područje usjeka je izgrađeno od rudistnih vapnenaca turonske starosti – srednji dio gornje krede. Detaljno je inženjerskogeološki snimljeno na topografskoj podlozi M 1:1.000 širine koridora 100 m. Geofizička istraživanja i istražno bušenje su rađeni sa svrhom odredbe stanja stijene u tunelu, ali tijekom izmjene projekta dio istražnih radova je korišten za odredbu inženjerskogeoloških karakteristika stijena u usjeku. Duž osi trase je

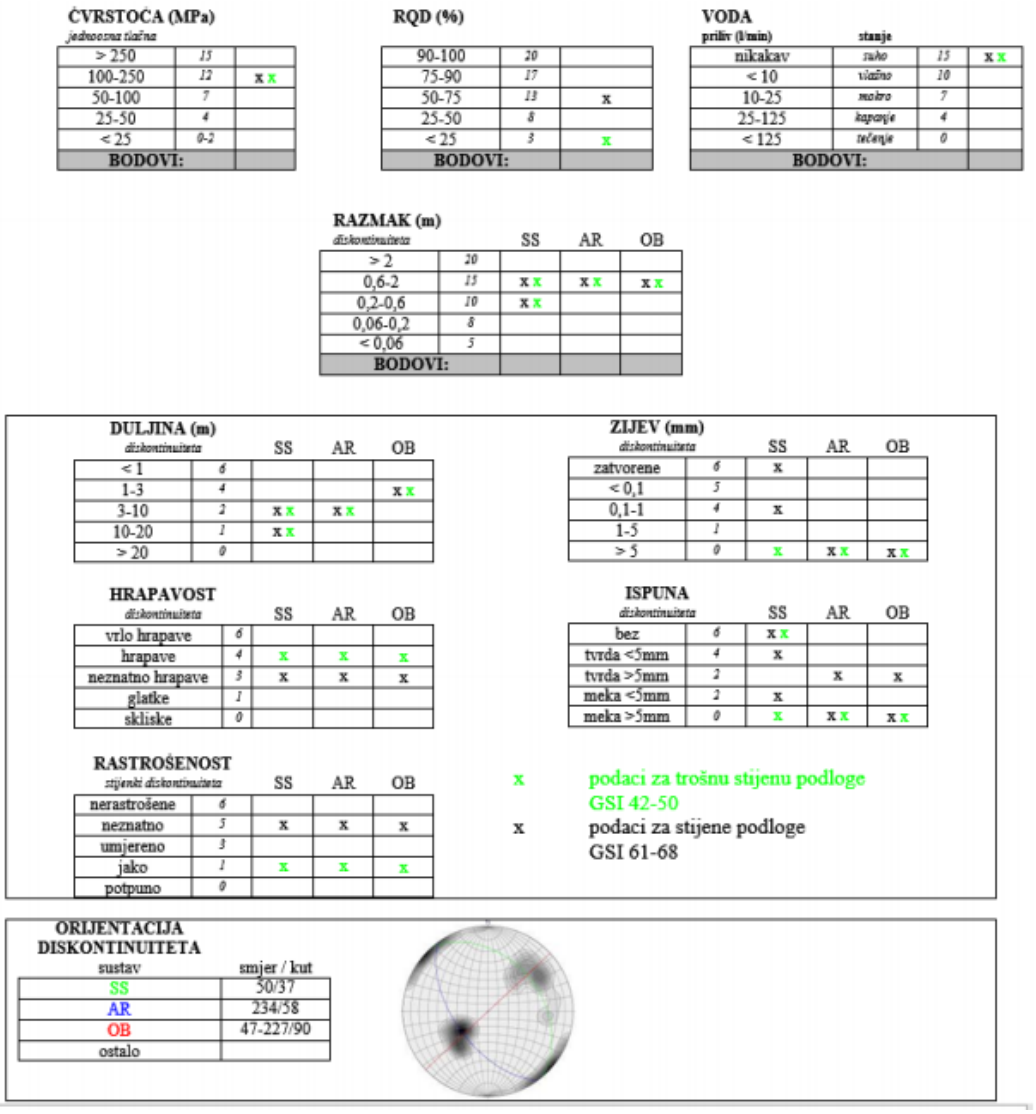
rađen uzdužni dubinski seizmički presjek GLP-50, koji svojom dužinom obuhvaća i usjek i tunel Zmijarevići. U zoni usjeka su izvedene dvije istražne bušotine: S-LP-55 dubine 15,00 m i S-LP-56 dubine 15,00 m. U bušotinama je uzeto 12 poremećenih uzoraka, pretežito u dubinskom dijelu profila, jer su istraživanja bila usmjerena na istraživanja tunelskih cijevi i 13 ispitivanja in situ na jezgri bušotina Schmidtovim čekićem.

Usjek ulazi u brdsko područje prema ulazu u tunel Zmijarevići izgrađenom od rudistnih vapnenaca gornje kredne starosti i to njenog srednjeg dijela – turona. Litološki su to jedri vapnenci sive boje i vapnenačke breče s pojavama bitumena u vezivu i dijastromama. Vapnenci i vapnenačke breče su u zoni usjeka uglavnom slabo razlomljeni, osim prije ulaska u tunel, gdje postoji jaka rasjedna zona OB smjera širine oko 25 m. U toj rasjednoj zoni treba očekivati pojave džepova gline s odlomcima vapnenaca i razlomljenih blokova vapnenaca, pa obzirom na veliku visinu usjeka posebnu pažnju treba posvetiti osiguranju ulaska u tunel. Duž usjeka nema većih pojava crvenice u površinskoj zoni.

Cijeli usjek je smješten unutar jednog strukturno tektonskog bloka II-bc određenog na inženjerskogeološkoj karti trase M 1:5.000. Slojevi vapnenaca debljine 0,2 do 2,0 m nagnuti su prema usjecima pod kutom od 25 do 45o i to je dosta veliki problem za stabilnost usjeka zbog mogućnosti ispadanja velikih blokova vapnenaca duž slojnih ploha. Prema jezgri istražnih bušotina i geofizičkim istraživanjima debljina površinske trošne zone je oko 2,5 do 3,5 m, osim na području rasjeda, gdje je ta zona povećana prema rasjedu. RQD stijene podloge je 50 do 75%, što je odraz dobre kvalitete stijene.

Orijentacija diskontinuiteta je: SS 50/37; AR 234/58; OB 40-227/90.
GSI je analiziran za stijene podloge i za trošnu površinsku zonu i kreće se u slijedećim rasponima: stijene podloge 61 – 68; površinska trošna zona 42 – 50.

Tablica 18. Inženjerskogeološke značajke terena



ČVRSTOĆA (MPa) *jednoosna tlačna*

> 250	15	
100-250	12	x x
50-100	7	
25-50	4	
< 25	0-2	
BODOVI:		

RQD (%)

90-100	20	
75-90	17	
50-75	13	x
25-50	8	
< 25	3	x
BODOVI:		

VODA

priliv (l/min)	stanje		
nikakav	*suho*	15	x x
< 10	*vlažno*	10	
10-25	*mokro*	7	
25-125	*kapanje*	4	
< 125	*tečenje*	0	
BODOVI:			

RAZMAK (m)

diskontinuiteta		SS	AR	OB
> 2	20			
0,6-2	15	x x	x x	x x
0,2-0,6	10	x x		
0,06-0,2	8			
< 0,06	5			
BODOVI:				

DULJINA (m)

diskontinuiteta		SS	AR	OB
< 1	6			
1-3	4			x x
3-10	2	x x	x x	
10-20	1	x x		
> 20	0			

ZIJEV (mm)

diskontinuiteta		SS	AR	OB
zatvorene	6	x		
< 0,1	5			
0,1-1	4	x		
1-5	1			
> 5	0	x	x x	x x

HRAPAVOST

diskontinuiteta		SS	AR	OB
vrlo hrapave	6			
hrapave	4	x	x	x
neznatno hrapave	3	x	x	x
glatke	1			
skliske	0			

ISPUNA

diskontinuiteta		SS	AR	OB
bez	6	x x		
tvrda <5mm	4	x		
tvrda >5mm	2		x	x
meka <5mm	2	x		
meka >5mm	0	x	x x	x x

RASTROŠENOST

stijenski diskontinuiteta		SS	AR	OB
nerastrošene	6			
neznatno	5	x	x	x
umjereno	3			
jako	1	x	x	x
potpuno	0			

x podaci za trošnu stijenu podloge GSI 42-50

x podaci za stijene podloge GSI 61-68

ORIJENTACIJA DISKONTINUITETA

sustav	smjer / kut
SS	50/37
AR	234/58
OB	47-227/90
ostalo	

Ubacivanjem dobivenih parametara u excel pomoćne listove, dobiveni su rezultati klasifikacije prikazani u tablici 19.

Tablica 19. Dobiveni rezultati inženjerskogeološkog problema

The input data given and the calculated results

Project: grupa 7 **Date:** 27.svi.18

Tunnel: usjek 3 **Location:** Spojna cesta ČCP Karamatići – Luka Ploče

Observer: Maja Vrček **Note:**

Rock(s): rudistni vapnenci turonske starosti

Input parameters				Input values and ratings used		
				RMR 1989	Q 1993	RMi 2008
Tunnel data		Tunnel span (m)		Span = 200	Span = 200	Dt = 200
		Wall height (m)		Wall = 11	Wall = 11	Wt = 11
A. Rock	A1	Compressive strength of intact rock:		A1 = 12	-	σ_c = 101 MPa
B. Degree of jointing	B1	Rock Quality Designation (RQD)		A2 = 13	RQD = 63	-
	B2	Block volume:		-	-	Vb = 5,249 m3
	B3	Joint spacing:		A3 = 10	-	-
C. Jointing pattern	C1	Block shape factor:		-	-	β = 250
	C2	Number of joint sets:		-	Jn = 3	Nj = 2
	C3	Orientation of	in roof:	B = -10	-	Co = 2
	C4	main joint set	in walls:	-	-	Co = 1,5
D. Joint charac-teristics	D1	Joint smoothness:	roughness:	A4c = 3	Jr = 1,25	js = 1,25
	D2	Joint undulation:		-		jw = 1
	D3	Joint alteration	weathering:	A4e = 6	Ja = 1	jA = 1
			filling:	A4d = 6		
	D4	Joint length or persisstence:		A4a = 4	-	jL = 1,5
	D5	Joint separation or aperture:		A4b = 6	-	-
E. Inter-locking	E	Compactness of rockmass:		-	-	IL = 1
F. Ground water	F	Ground water inflow:		A5 = 15	Jw = 1	GW = 1
G. Rock stresses	G1	Stress level:		-	SRF = 5	SL = 1
	G2	Stress ratio//ground		-		Cg = -
H. Weakness zones	H1	Type of weakness zone:		-		-
	H2	Thickness or width of zone:		-	-	Tz = 3 m
	H3	Orientation	in roof:	-	-	Co = 1,5
	H4	of zone	in walls:	-	-	Co = 2

RESULTS FROM CALCULATIONS (for conditions in tunnel or cavern)

		RMR	Q	RMi
Continuity of rockmass (related to tunnel) →		-	-	*Weakness zone*
Interlocking of rockmass structure →				*Tight structure*
Rock mass quality (approx. strength, σ_{cm})		-	-	$\sigma_{cm} \approx$ RMi = **31,8** *High*
Ground quality (related to stability)	n roof	**RMR = 65** *Good*	**Q = 5,20833** *Fair*	**Gc = 31,8** *Good*
	in walls	RMR = 65	Q_{wall} = 13,0208	Gc_{wall} = 159
Blockiness (related to block instability)	n roof	-	-	**Sr = 0,2** *Very favourable*
	in walls	-	-	Sr_{wall} = 0,1 *Very favourable*
Weakness zone		-	*Single weakness zone depth < 50m*	Size: 3 m
Rockmass stresses	Potential stress problems →	-	*weakness zone*	
Limitations		For weakness zones the RMR limit is unclear	Tunnel span outside limit	Weakness zone may need further evaluations

Sr = Size ratio (geometrical factor involving block diameter, tunnel span, plus number of joint sets and orientation of joints)
Gc = Ground condition factor
Cg = Competency of ground (Cg = σ_{cm} / σ_g = RMi / σ_g)

Reference: A. Palmström, Q-RMR-RMi, version 3, RockMass AS, November 2012

Primjer 3. Vijadukt Vrila

Inženjerskogeološko kartiranje za potrebe izgradnje Autoceste na dijelu GRANICA BIH- MALI PROLOG- PLOČE, dionica: Mali Prolog – Ploče, spojna cesta ČPC Karamatići – Luka Ploče: **vijadukt Vrila; stacionaža 5+235 do 5+485**.

Kratki opis inženjerskogeoloških značajki terena

Vijadukt Vrila na stacionaži od 5+211 do 5+490 km dužine 279 m premošćuje udolinu predodređenu rasjedom, kojim su duž osi OB rasjednuti uslojeni vapnenci cenomanske starosti. Cijeli vijadukt se nalazi unutar jednog strukturno tektonskog bloka. Na području vijadukta Vrila je registriran samo jedan litostratigrafski član: Vapnenci cenomanske starosti (V,K2 1) su najstariji litostratigrafski član gornje krednog kompleksa stijena, a ujedno su to i najstarije stijene registrirane duž trase brze ceste, koje se pojavljuju na površini terena. Litološki su to pretežito uslojeni vapnenci sive i svjetlo sive boje, mjestimice brečolikog izgleda. Debljina ovih naslaga je prema OGK oko 900 m. Na području vijadukta Vrila nema većih površinskih pojava crvenice, ali duž rasjeda u dnu doline se mogu očekivati pojave džepova crvenice, razlomljenih blokova vapnenaca i vapnenačkih breča.

Inženjerskogeološki elementi za projektiranje

Nadmorska visina vijadukta Vrila je između 90,98 i 86,84 m s nagibom prema većim stacionažama, odnosno prema delti rijeke Neretve. Vijadukt je projektiran s dva uporna mjesta i 7 stupnih mjesta međusobno razmaknutim 35, odnosno 28 m. Područje vijadukta Vrila je detaljno inženjerskogeološki snimljeno na topografskoj podlozi M 1:1.000 širine koridora 100 m. Duž osi vijadukta su rađeni 1 uzdužni (GLP-30) i 3 poprečna (GLP-31, 32 i 33) dubinska seizmička presjeka i 3 istražne bušotine ukupne dubine 36 m. U istražnim bušotinama je uzeto ukupno 18 poremećenih uzoraka i izvršeno 18 ispitivanja in situ Schmidtovim čekićem. Položaji i stanje diskontinuiteta su mjereni na ukupno 19 točaka. Prema rasporedu strukturnih blokova definiranih na inženjerskogeološkoj karti M 1:5.000, vijadukt Vrila je smješten unutar jedne inženjerskogeološke cjeline – strukturno tektonski blok III-bc bez obzira na rasjed, koji je prouzročio stvaranje doline. Širina rasjeda je oko 24 m i u toj zoni se mogu očekivati veće nakupine crvenice s odlomcima i kršjem vapnenaca, razlomljeni blokovi vapnenaca i tektonska breča. Istražne bušotine pokazuju da je zona površinskog trošenja vapnenaca na sjeveroistočnoj strani doline nešto veća (do 7 m), a na jugozapadnoj strani daleko manja (do 1,5 m). Slično je i sa stanjem stijene u podlozi, koja je bolja na jugozapadnoj strani doline (RQD 75 – 90%). Uporna mjesta s obje strane vijadukta su u stijeni dobrih karakteristika i dublje od zone površinskog trošenja. Jednako tako je i većina od 7 stupnih mjesta. Najlošije je stanje sa stupnim mjestom S3, koje treba temeljiti u ZADATAK BR. 1 rasjednoj zoni, ali jednako tako treba posebnu pažnju obratiti stupnim mjestima S1 i 2, čiji temelji ostaju u površinskoj trošnoj zoni.

Podaci za geomehaničku klasifikaciju

Vijadukt Vrila je smješten u strukturno tektonskom bloku III-bc i stoga je za područje vijadukta napravljena jedinstvena klasifikacijska tabela. U području vijadukta slojevi vapnenaca cenomanske starosti su nagnuti generalno prema istoku pod kutom od oko 22o , jednako kao i padina. Orijentacija diskontinuiteta je

slijedeća: SS 99/22; AR 239/80; OB 173/89. Rasjed je nastao pucanjem karbonatne mase duž osi OB. Klasifikacija stjenovite mase prema Bieniawskom je rađena za tri različite inženjerskogeološke cjeline i to stijenu podloge, površinsku trošnu zonu i zonu rasjeda. U zoni vijadukta Vrila su stijene u suhom stanju – nema utjecaja podzemnih voda. Vidljive su razlike u hrapavosti, rastrošenosti, zjevovima i ispuni diskontinuiteta i to donosi razlike u izračunu Geološkog indeksa čvrstoće (GSI): stijene podloge 60 – 69; površinska trošna zona 42 – 55; rasjedna zona 37 – 42.

Tablica 20. Inženjerskogeološke značajke stijena

ČVRSTOĆA (MPa)

> 250	15	
100-250	12	x x x
50-100	7	
25-50	4	
< 25	0-2	
BODOVI:		

RQD (%)

90-100	20	
75-90	17	x
50-75	13	x
25-50	8	x
< 25	3	x x
BODOVI:		

VODA

priliv (l/min)	stanje		
nikakav	suho	15	x x x
< 10	vlažno	10	
10-25	mokro	7	
25-125	kapanje	4	
< 125	curenje	0	
BODOVI:			

RAZMAK (m)

		SS	AR	OB
> 2	20			
0,6-2	15		x x x	
0,2-0,6	10	x x x		x x x
0,06-0,2	8	x x x		
< 0,06	5			
BODOVI:				

DULJINA (m)

		SS	AR	OB
< 1	6			
1-3	4	x x x	x x x	x x x
3-10	2			
10-20	1			
> 20	0			

ZIJEV (mm)

		SS	AR	OB
zatvorene	6			
< 0,1	5			
0,1-1	4	x		
1-5	1	x	x	x
> 5	0	x x	x x	x x

HRAPAVOST

		SS	AR	OB
vrlo hrapave	6			
hrapave	4	x	x	x
neznatno hrapave	3	x	x	x
glatke	1			
skliske	0	x	x	x

ISPUNA

		SS	AR	OB
bez	6	x		
tvrda <5mm	4	x		
tvrda >5mm	2			
meka <5mm	2		x	x
meka >5mm	0	x x	x x	x x

RASTROŠENOST

		SS	AR	OB
nerastrošene	6			
neznatno	5	x	x	x
umjereno	3			
jako	1	x	x	x
potpuno	0	x	x	x

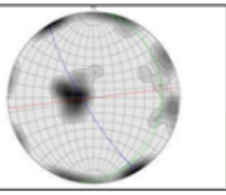
1 podaci za stijene podloge GSI 60-69

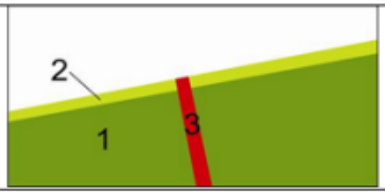
2 podaci za zonu trošenja GSI 42-55

3 podaci za rasjednu zonu GSI 37-42

ORIJENTACIJA DISKONTINUITETA

sustav	smjer / kut
SS	99/22
AR	239/80
OB	173/89
ostalo	





Ubacivanjem zadanih parametara u excel tablice dobiveni su rezultati izračuna prikazani u tablici 21.

Tablica 21. Dobiveni rezultati inženjerskogeološkog problema

INPUT DATA on TUNNEL and GROUND CONDITIONS

used in the RMR, Q and RMi rockmass classification systems

RocMass r. 2.2 - 2.1

Project: IG program - vijadukt Vrila **Date:** 3.6.2017.

Tunnel: Vijadukt Vrila **Location:** Spojna cesta ČCP Karamatići – Luka Ploče

Observer: Martin Lakušić **Note:**

Rock(s): Vapnenac

Input symbols are shown in blue below; see also 'Parameter tables'

to 'Parameter'	Input parameters				of symbols and values <-- INPUT
	Tunnel span or diameter (Dt)				297
	Tunnel wall height (Wt)				4.14
A1	Compressive strength of rock (UCS or σ_c):				100
B1	Degree of jointing	RQD (Rock Quality Designation):		RQD =	25
B2		Block volume (Vb):		Vb =	
B3		Volumetric joint count (Jv):		Jv =	
B4		Joint spacing:	(a = > 2m; b = 0.6 - 2m; c = 0.2 - 0.6m; d = 0.06 - 0.2m; e = < 0.06m)		c
C1	Jointing pattern	Block shape[1]:	(a=cubical blocks; b=slightly long or flat blocks; c=moderately long or flat blocks; d=very long or flat blocks)		bc
C2		Joint sets:	(a = no sets; b=1 set; c=1 set+random; d=2 sets; e=2 sets+random; f=3 sets; g=3 sets+random; i = crushed)		f
C3		Orientation of main joint set:	(a = very favourable; b = favourable; c = fair; d = unfavourable; e = very unfavourable)	in roof	c
C4				in wall	d
D1	Joint roughness	Joint smoothness:	(a = v. rough; b = rough; c = slightly rough; d = smooth; e = polished; f = slickensided; g = filled joints)		g
D2		Joint undulation:	(a = discontin.; b = strongly undulating; c = mod. undul.; d = slightly undul.; e = planar; g = filled joints)		g
D3	Joint alteration // condition	No filling:	(.a = healed; b = fresh // no filling; c = slightly altered; d = altered; e = sand/silt coating; f = clay coat)		m
		Filling < ca. 5mm thickness:	(h = sand / silt; j = hard clay; l = soft clay; n = swelling clay)		
		Filling > ca. 5mm thickness:	(i = sand / silt; k = hard clay; m = soft clay; o = swelling clay)		
D4	Joint length:		(a = crack; b = parting; c = v. short (0.1-1m); d = short (1-3m); e = medium (3-10m); f = long (10-30m); g = seam or shear)		d
D5	Joint separation:		(a = none; b = v.tight (<0.1mm); c = tight (0.1-0.5mm); d = mod.open (0.5-2.5mm); e = open (2.5-10mm); f = v. open)		e
E	Interlocking or compactness of rockmass structure:		(a = very tight; b = tight or compact ; c = disturbed; d = poorly interlocked)		d
F	Ground water inflow to tunnel or cavern:		(a = dry; b = damp; c = wet; d = dripping; e = gushing; f = flowing; g = heavily flowing)		a
G1	Stress level:	*(Input for Q and RMi)*	(a = very low stress level; b = low stress; c = moderate / medium stress; d = high stress)		h
G2	Over-stressing	Rock spalling or bursting:	(e = moderate slabbing; f = rock burst; g = heavy burst)	Input of SRF	
		Squeezing:	(h = mild squeeze; l = heavy squeeze)		
H1	Weakness zone (fault, etc.)	Type:	(j = multiple zones; k = single zone <50m; l = single zone >50m; m = multiple shears; q = crushed)		
H2		Thickness or width of zone (m):			7
H3		Orientation of zone:	(a = very favourable; b = favourable; c = fair; d = unfavourable; e = very unfavourable)	in roof	c
H4				in wall	c

5. ZAKLJUČAK

U završnom radu opisane su neke klasifikacije stijenskih masa: Terzaghijeva klasifikacija, Laufferova klasifikacija te modificirana Laufferova klasifikacija, RSR (*rock structure rating*) klasifikacija, RMR (*rock mass rating*) klasifikacija i Q-klasifikacija(*rock tunnelling quality index Q*). Terzaghijeva klasifikacija predstavlja prvu praktičnu i racionalnu metodu klasifikacije te se bazira na stanje kvalitete i ne daje kvantitativan opis zbog čega je došlo do sve manje uporabe. Međutim ona daje značajke važne za presudan utjecaj na ponašanje stijenske mase na temelju kojih se dobiva predložak inženjerskogeoloških informacija potrebnih za inženjersko projektiranje.

Kod Laufferove klasifikacije naglasak je stavljen na značaj strukture stijenske mase. Značaj klasifikacije je u zahtjevima na smanjenju vremena koje je potrebno za ugradnju potpore. Laufferova klasifikacija se vremenom razvijala i dobivena je modificirana Laufferova klasifikacija pomoću koje je moguć iskop sa zaštitnim i potpornim mjerama, ali njen nedostatak se krije u tome da je potrebno mnogo iskustva za njenu primjenu. RSR klasifikacija daje kvantitativnu metodu opisa kvalitete stijenskih masa te predstavlja prvi cjeloviti klasifikacijski sustav nastao nakon Terzaghijeve klasifikacije. Temelji se na više parametara koji utječu na ponašanje stijenske mase: geološki parametri i parametri podgradne konstrukcije.

Najrazvijeniji klasifikacijski sustavi su RMR i Q klasifikacije. RMR klasifikacija je namijenjena za definiranje podgrade tunela, ali s vremenom se počela koristiti i za određivanje mehaničkih parametara stijenskih masa. Ovaj klasifikacijski sustav uzima u obzir 6 parametara zbog čeka je moguća kvalitetnija klasifikacija. Temelji se na bodovanju parametara te tako dolazimo do nje. Q klasifikacija se također određuje na temelju 6 parametara te služi za određivanje kvalitete stijenske mase i parametara podgradnog sustava za probleme podzemnih građevina.

Korištenje klasifikacijskih sustava stijenske mase predstavlja značajan pomak u utvrđivanju parametara stijenskih masa. Korištenje klasifikacija nam također omogućuje ocjenjivanje stabilnosti stijenske mase, kao i ocjenjivanje značajki čvrstoće te deformabilnosti stijenske mase. Prema čemu se može zaključiti da su klasifikacije razvijene zbog kvantitativnog određivanja kakvoće stijenske mase koji nam omogućuju rješavanje raznih inženjerskih zahvata.

6. POPIS LITERATURE

A'ssim, A.-J., Yong Xing, Z. (2010). Most Used Rock Mass Classifications for Underground Opening. Am. J. Eng. Appl. Sci. 3, 403–411.

Abbas, S.M., Konietzky, H. (2017). Rock mass classification systems, Department of Rock Mechanics. Germany: Technical University Freiberg.

Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. Felsmechanik Mécanique des Roches 6, 189– 236.

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering rockmass classifications. Wiley: Toronto.

Bieniawski, Z.T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. Cape Town: Balkema.

Biondić, B. (2006): Inženjerskogeološki istražni radovi - vijadukti, usjeci, prolazi i potporni zidovi na trasi. Autocesti A: granica BIH – Mali Prolog – Ploče; dionica: Mali Prolog – Ploče; poddionica: ČCP Karamatići – Ploče; spojna cesta ČCP Karamatići - Luka Ploče. Stručni elaborat, arhiva Geoinfo d.o.o, Zagreb

Deere, D.U. (1989). Rock quality designation (RQD) after twenty years. Gainesville: Florida.

Hoek, E. (1995). Possible other applications of the RMi in rock mechanics and rock engineering.

Hoek, E. (2006). Practical rock enginnering. Canada V7R 4H7.

Hoek, E., Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strenght.

Meaški, H. (2018). Materijali s predavanja iz Inženjerske geologije u akademskoj godini 2015/2016.

Mihalić, S. (2007). Osnove Inženjerske Geologija. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu.

Miščević, P. (2004). Uvod u inženjersku mehaniku stijena. Poljica, Split

Palmstrom, A. (1995). RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes. University of Oslo: Norway.

Ritter, W. (1879). Die Statik der Tunnelgewölbe. Berlin: Springer.

Singh, B., Goel, R.K. (1999). Rock mass classification: a practical approach in civil engineering. Elsevier, Oxford

Stini, J. (1950). Tunnelbaugeologie: die geologischen Grundlagen des Stollen und Tunnelbaues. Wien: Springer.

Vrkljan, I. (2013). Inženjerska mehanika stijena. Zagreb: Institut građevinarstva Hrvatske

Vrkljan, I. (2003). Podzemne građevine i tuneli. Rijeka: Građevinski fakultet u Rijeci

POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovni elementi stijenske mase 3
Slika 2. Masivne stijenske mase 4
Slika 3. Slojevitost stijenskih masa 5
Slika 4. Raspadanje stijene zbog pojave škriljavost 6
Slika 5. Izgled stijena nakon pojave lučenja 6
Slika 6. Primjer izračuna RQD indeksa 10
Slika 7. Dijagram za procjenu geološkog indeksa čvrstoće 11
Slika 8. Ulazni parametri RMi indeksa 13
Slika 9: Terzaghijev model 16
Slika 10: Odnos između raspona iskopa i vremena stajanja te klase stijenske mase 17
Slika 11: Prikaz određivanja potrebne podgrade 21
Slika 12:Primjer dobivenih rezultata pomoću excel listova 31

POPIS TABLICA

Tablica 1. Odnos između RQD i kakvoće stijenske mase 9
Tablica 2. Klasifikacija temeljem RMi indeksa 13
Tablica 3. Podjela stijenske mase prema Terzaghijevoj klasifikaciji 15
Tablica 4. Modificirana Laufferova klasifikacija 18
Tablica 5. Prikaz određivanja parametra A Prikaz određivanja parametra A 19
Tablica 6. Prikaz određivanja parametra B 20
Tablica 7. Prikaz određivanja parametra C 20
Tablica 8. Klasifikacijski parametri i pripadajuća vrijednost bodova RMR-a 22
Tablica 9. Vodič za klasifikaciju stanja pukotine (točka 4. u tablici 7.) 23
Tablica 10. Popravak za orijentaciju pukotinskog stanja 23
Tablica 11. Utjecaj orijentacije dominantnog pukotinskog sustava na podzemne otvore 23
Tablica 12. Kategorija stijenske mase prema RMR klasifikaciji 24
Tablica 13. Klasifikacija parametara korištenih u Q-klasifikaciji 25
Tablica 14. Kategorizacija stijenske mase prema Q klasifikaciji 27
Tablica 15. Vrijednosti indeksa podgrade 27
Tablica 16. Inženjerskogeološke značajke terena 33
Tablica 17. Rezultati izračuna 34
Tablica 18. Inženjerskogeološke značajke terena 37
Tablica 19. Dobiveni rezultati inženjerskogeološkog problema 38
Tablica 20. Inženjerskogeološke značajke stijena 41
Tablica 21. Dobiveni rezultati inženjerskogeološkog problema 42