

Primjena RMR i Q-klasifikacije u tunelogradnji

Boričević, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:035876>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
RUDARSTVO - GEOTEHNIKA

PRIMJENA RMR I Q-KLASIFIKACIJE U TUNELOGRADNJI

Diplomski rad

Marko Boričević

R175

Zagreb, 2018

PRIMJENA RMR I Q-KLASIFIKACIJE U TUNELGRADNJI

Marko Boričević

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Kako bi se provela analiza stabilnosti tunela i podzemnih prostorija važno je na adekvatan način kategorizirati stijensku masu te predvidjeti njeno ponašanje. Ponašanje stijenske mase određeno je ponašanjem intaktne stijenske mase ali i ponašanjem diskontinuiteta odnosno njihovih svojstava kao što su hrapavost, trošnost, ispuna, zijev, razmak, postojanost, orijentacija te procjeđivanje vode kao prirodnih oslabljenja u njoj. Upravo poznavanje i ocjena tih parametara pomaže u razumijevanju i predviđaju mogućih nestabilnosti i mehanizama slomova. Ocjena kvalitete stijenske mase određuje se primjenom različitih klasifikacijskih sustava od kojih su najpoznatiji RMR i Q – klasifikacija.

Ključne riječi: podgrada, klasifikacija, RMR, Q – indeks, usporedna primjena, NMT, NATM

Završni rad sadrži: 51 stranicu, 15 tablica, 15 slika i 20 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

Pomagao pri izradi: Dr. sc. Karolina Gradiški, znanstveni novak RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF
Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

APPLICATION OF RMR AND Q CLASSIFICATION IN TUNNELLING

Marko Boričević

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In order to carry out the analysis of the stability of tunnels and underground premises it is important to adequately categorize the rock mass and to predict its behavior. The behavior of the rock mass is determined by the behavior of the intact rock mass but also by the behavior of discontinuities or their properties such as roughness, weariness, filling, jade, spacing, persistence, orientation and assessment of water as natural weaknesses in it. By knowing and evaluating these parameters it helps to understand and anticipate possible instability and breakdown mechanisms. The quality assessment of the rock mass is determined by the application of different classification systems, most notably RMR and Q – classification.

Keywords: classification, RMR, Q – index, NMT, NATM

Thesis contains: 51 pages, 15 tables, 15 figures and 20 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Ph.D. Vinko Škrlec, Assistant Professor

Tech. assistance: Ph.D. Karolina Gradiški, Researcher

Reviewers: Ph.D. Vinko Škrlec, Assistant Professor
Ph.D. Mario Dobrilović, Associate Professor
Ph.D. Vječislav Bohanek, Assistant Professor

SADRŽAJ:

| | |
|---|-----|
| POPIS SLIKA: | III |
| POPIS TABLICA: | IV |
| POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA | V |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. OPĆENITO O KLASIFIKACIJI STIJENSKIH MASA..... | 2 |
| 3. Q – KLASIFIKACIJA (ENGL. <i>ROCK MASS QUALITY SYSTEM</i>) | 4 |
| 4. GEOMEHANIČKA KLASIFIKACIJA (ENGL. <i>ROCK MASS RATING</i>)..... | 7 |
| 5. PRIMARNA PODGRADA..... | 12 |
| 6. PRIMJENA Q KLASIFIKACIJE U PROJEKTIRANJU PRIMARNE PODGRADE TUNELA | 17 |
| 6.1. Primjena mlaznog betona i sidrenje u ovisnosti o Q – indeksu..... | 19 |
| 6.2. Primjena Q – indeksa kod projektiranja ravnih bočnih zidova podzemnih prostorija 20 | |
| 6.3. Armirana rebra od mlaznog betona | 20 |
| 6.4. Cijevni kišobran i Q – indeks | 23 |
| 6.5. Podgrada slabih i uskih zona | 24 |
| 7. PRIMJENA GEOMEHANIČKE (<i>RMR</i>) KLASIFIKACIJE U PROJEKTIRANJU PRIMARNE PODGRADE TUNELA..... | 26 |
| 7.1. Preporuke geomehaničke klasifikacije za projektiranje primarne podgrade tunela | 26 |
| 7.2. Primjer projektiranja primarne podgrade tunela..... | 28 |
| 8. USPOREDNA PRIMJENA RMR I Q-KLASIFIKACIJE..... | 30 |
| 8.1. Varijacije opažanja prilikom kartiranja stijenske mase kod bušenja tunela | 30 |
| 8.1.1. Rezultati za <i>RMR</i> klasifikaciju..... | 31 |
| 8.1.2. Rezultati za Q – klasifikaciju..... | 32 |
| 8.1.3. Usporedba rezultata | 33 |
| 8.2. Recenzirani radovi podzemnih projekata izvedeni u sličnim geotehničkim uvjetima 36 | |
| 8.2.1. Podzemna garaža opere u Sydney | 36 |
| 8.2.2. Naplatni tunel – Norfolk tunel | 37 |
| 8.2.3. Istočni tunel M5 | 38 |

| | | |
|------|---|----|
| 8.3. | Valjanost koeficijenta pri klasificiranju stijenske mase..... | 39 |
| 8.4. | Osvrt na prezentirane projektne radove i zapažanja | 41 |
| 9. | METODE TUNELIRANJA | 42 |
| 9.1. | Norveška metoda tuneliranja (<i>NMT</i>) | 42 |
| 9.2. | Nova Austrijska tunelska metoda (<i>NATM</i>)..... | 43 |
| 9.3. | Razlike i sličnosti NMT i NATM-a..... | 45 |
| 10. | ZAKLJUČAK | 47 |
| 11. | LITERATURA | 49 |

POPIS SLIKA:

| | |
|---|----|
| Slika 5-1. Shematski prikaz elemenata primarne podgrade tunela (Unknown, n.d.) | 12 |
| Slika 5-2. Dijagram ovisnosti napreznja i deformacije krto i duktilnog betonskog materijala (Unknown, n.d.)..... | 13 |
| Slika 5-3. Čelična mreža pričvršćema sidrima (TEDESA - Técnicas de Entibación, S.A., 2013.)..... | 14 |
| Slika 5-4. Detalj čeličnog luka pri bušenju ulaznog portala tunela (TEDESA - Técnicas de Entibación, S.A., 2013.) | 14 |
| Slika 5-5. "PERFO" sidro (Hoek i Brown; 1980)..... | 15 |
| Slika 6-1. Prikaz kategorija podgrade zasnovanih na Q – indeksu | 18 |
| Slika 6-2. Presjek rebara kod rebrastog mlaznog injetiranog pojačanja (Norwegian Geotech. Inst., 2015.)..... | 21 |
| Slika 6-3. Praktična izvedba <i>RRS</i> sistema (Grimstad et. al, 2012.)..... | 21 |
| Slika 6-4. Smjernice za izvođenje <i>RRS</i> konstrukcije temeljem Q – indeksa i D_e (Barton et. al., 1993.)..... | 22 |
| Slika 6-5. Podgrada stijene korištenjem metode cijevnog kišobrana (Norwegian Geotech. Inst., 2015)..... | 23 |
| Slika 7-1. Vrijeme stabilnosti u odnosu na raspon za različite vrijednosti <i>RMR</i> -a (Vrkljan, 2013)..... | 26 |
| Slika 8-1 Prikaz varijacija rezultata ovisno o promatraču, prilikom <i>RMR</i> klasifikacije (Nilsen, et. al., 2003.) | 32 |
| Slika 8-2. Prikaz varijacija rezultata ovisno o promatraču prilikom Q – klasifikacije (Nilsen, et. al., 2003.)..... | 33 |
| Slika 8-3. Osjetljivost podataka <i>RMR</i> metode (Nilsen, et. al., 2003.)..... | 34 |
| Slika 8-4. Osjetljivost podataka Q – metode (Nilsen, et. al., 2003.) | 35 |
| Slika 8.5. Stabilizacija svoda Sydney opera podzemne garaže (Janković et. al., 2008.). ... | 37 |

POPIS TABLICA:

| | |
|---|----|
| Tablica 3-1. Klasifikacija stijenske mase na osnovi Q indeksa (Barton et. al., 1974) | 6 |
| Tablica 4-1. <i>RMR</i> klasifikacija (engl. <i>Rock Mass Rating System</i>) (Bieniawski, 1989.)..... | 8 |
| Tablica 6-1. Vrijednosti <i>ESR</i> -a obzirom na tip stijenske kategorije (Barton et al., 1993) .. | 17 |
| Tablica 6-2. Konverzija pravog Q – indeksa u slučaju projektiranja podgrade ravnih zidova (Barton et al., 1993.)..... | 20 |
| Tablica 7-1. Preporuke za iskop i primarnu podgradu tunela raspona 10 m prema geomehaničkoj (<i>RMR</i>) klasifikaciji (Vrkljan, 2013)..... | 27 |
| Tablica 7-2. Prikaz dobivenih bodova geomehaničke klasifikacije (Hoek, 1995.)..... | 29 |
| Tablica 8-1. Prikaz rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće na uzorcima granodiorita i zelenog škriljavca (Nilsen, et. al., 2003.)..... | 31 |
| Tablica 8-2. Kategorična klasifikacija stijenske mase (Nilsen, et. al., 2003.)..... | 34 |
| Tablica 8-3. Procjenjeni načini podgrade temeljem dobivenih rezultata. (Nilsen et. al., 2003.)..... | 35 |
| Tablica 8-4. Podgradni sklop prema kategorizacijskim sustavima za 18 metarski raspon podzemne garaže opere u Sydneyju. (Janković et. al., 2008.)..... | 36 |
| Tablica 8-5. Podgradni sklop prema kategorizacijskim sustavima za tunel Norfolk (Janković et. al., 2008.)..... | 38 |
| Tablica 8-6. Usporedni podaci o podgradi – Tunel M5 (Janković et. al., 2008.)..... | 39 |
| Tablica 8-7. Utjecaj podzemne vode na podgradu 10 m širokog tunela (suhi uvjeti, $Q=4$, $ESR=1$). | 40 |
| Tablica 9-1. Osnovne značajke NMT metode (Barton i Grimstad, 1993.)..... | 43 |
| Tablica 9-2. Usporedba NMT i NATM metode (Unknown, n.d.)..... | 46 |

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

| Oznaka | Značenje | Jedinica |
|--------|--|----------|
| Q | Indeks kvalitete stjenske mase | / |
| RMR | Geomehanička klasifikacija | / |
| GSI | Geološki indeks čvrstoće | / |
| $MAMB$ | Mikroarmirani mlazni beton | / |
| NMT | Norveška metoda tuneliranja | / |
| $NATM$ | Nova Austrijska metoda tuneliranja | / |
| RQD | Indeks kvalitete jezgre | / |
| J_n | Broj skupova pukotina | / |
| J_r | Indeks hrapavosti pukotina | / |
| J_a | Indeks alteracije (promjene) pukotina | / |
| J_w | Faktor pukotinske vode | / |
| SRF | Faktor redukcije naprezanja | / |
| UCS | Jednoosna tlačna čvrstoća | (Pa) |
| PLT | Indeks točkaste čvrstoće | / |
| $MRMR$ | Modificirana geomehanička klasifikacija | / |
| SRM | Geomehanička klasifikacija padina | / |
| $QTBM$ | Q – klasifikacija za strojni punoprofilni iskop tunela | / |
| ESR | Indeks podgrade | / |
| S_i | Jedan red čeličnih šipki | / |
| D | Dupli red čeličnih šipki | / |
| c/c | razmak od centra rebra do centra sljedećeg rebra | (m) |
| D_e | Dimenzija ekvivalentnog otvora podzemne prostorije | (m) |

| Oznaka | Značenje | Jedinica |
|---------------|---|----------|
| <i>RRS</i> | Armirana rebra od mlaznog betona | / |
| <i>NGI</i> | Norveški geotehnički institut | / |
| Q_{sr} | Srednja vrijednost indeksa kvalitete stijenske mase | / |
| Q_{zona} | Vrijednost indeksa kvalitete stijenske mase slabe zone | / |
| Q_{zdrava} | Vrijednost indeksa kvalitete stijenske mase zdrave zone | / |
| <i>b</i> | Širina slabe zone | (m) |
| Q_m | Velika vrijednost indeksa kvalitete stijenske mase | / |
| <i>TBM</i> | Stroj za podzemni iskop tunela | / |
| <i>NTNU</i> | Norveški fakultet znanosti i tehnologije | / |
| <i>NoTCoS</i> | Norveški sistem ugovaranja tunela | / |

1. UVOD

Prilikom tunelskih iskopa je uobičajeno da se redovito bilježe inženjersko-geološki podaci o stijenama kroz koje prolazi budući tunel. Ponašanje stijenske mase određeno je ponašanjem intaktne stijenske mase, ali i ponašanjem diskontinuiteta odnosno njihovih svojstava kao što su hrapavost, trošnost, ispuna, zijeve, razmak, postojanost, orijentacija te procjeđivanje vode kao prirodnih oslabljenja u njoj. Na temelju tih podataka procjenjuje se kategorija stijene, a preko nekog od postojećih sustava klasifikacije stijena se odabire jedan od projektnih sustava podgrađivanja. Podaci o ravninama diskontinuiteta u masivu se koriste samo kvalitativno i to u smislu da li je orijentacija diskontinuiteta povoljna ili nepovoljna. To je vrlo bitno odrediti pošto pri iskopu materijala u tunelu može doći do sloma po plohi diskontinuiteta odnosno do tzv. odvale materijala. Pogrešno miniranje ponekad može uzrokovati prekomjeren iskop koji za posljedicu ima nastanak nepotrebnih šupljina u tunelu nastale klizanjem većih blokova stijene i njihovim odlomom po plohama diskontinuiteta, a te šupljine je zatim potrebno zapuniti skupim betonom što uzrokuje dodatni trošak, upravo zbog krivo određene orijentacije ravnine diskontinuiteta. No, postoje i tzv "geološke odvale" koje nastaju lokalnim spontanom klizanjem stijenskih blokova prilikom iskopa i više su posljedica geološke strukture nego stanja naprezanja, tektonika također ostavlja tragove u obliku rasjednih ploha, te pukotina koje su posljedica boranja ili pokreta navlačenja, pa se to smatra kao viša sila na koju nije imala utjecaj pogreška i kriva procjena odgovorne osobe. Upravo poznavanje i ocjena ranije navedenih i opisanih parametara pomaže u razumijevanju i predviđaju mogućih nestabilnosti i mehanizama slomova. Ocjena kvalitete stijenske mase određuje se primjenom različitih klasifikacijskih sustava.

U radu će se opisati primjena i važnost dviju najzastupljenijih klasifikacija kako u svijetu, tako i u Hrvatskoj, a radi se o geotehničkoj (*RMR*) klasifikaciji i *Q* – klasifikaciji. Prikazati će se neke općenite informacije o klasifikacijskim sustavima od razvitka pa do danas, njihove prednosti i mane te međusobna usporedba na konkretnim primjerima. Obrazložiti će se važnost pravilno izvedene primarne podgrade prilikom tunelogradnje te načini njene izvedbe pomoću ovih dviju klasifikacija i to na primjeru dviju tunelskih metoda; Nove austrijske metode (*NATM*) i Norveške metode tuneliranja (*NMT*).

2. OPĆENITO O KLASIFIKACIJI STIJENSKIH MASA

Upotreba klasifikacijskih sustava za stijensku masu omogućuje procjenu parametara čvrstoće i uvid u očekivano ponašanje stijenske mase. Identifikacije stijena i klasifikacijski sustavi razvijaju se već više od sto godina. Prve klasifikacije zasnivale su se na opisu osnovnih osobina stijene poput boje i težine, često, na samo jednoj značajki stijenske mase, što se pokazalo nedostatno za potpuni opis stijenske mase. Najčešće korišteni klasifikacijski sustavi su *RMR* (eng. *Rock Mass Rate*) ili geomehanička klasifikacija, *GSI* (eng. *Geological Strenght Index*) i *Q* – klasifikacijska. Klasifikacijski sustavi zasnivaju se na sličnim parametrima, ali ipak među njima postoje i neke razlike. Uobičajeno su klasifikacijski sustavi zasnovani na bodovanju pojedinih parametara koji nemaju istu težinu te neki više pridonose krajnjem rezultatu, odnosno ukupnom klasifikacijskom broju.

Sve klasifikacije uključuju nekoliko ključnih parametara stijenske mase i pridruživanje pojedinog parametara nekoj unaprijed određenoj klasi kojoj je pridružena odgovarajuća numerička vrijednost. Zbog složenosti, tehničkih ograničenja i troškova mjerenja svojstava stijenske mase, u praksi se razvio cijeli niz indeksnih veličina kojima kvantitativno određujemo kvalitetu stijenske mase. Osnovno načelo svih indeksa je izravno mjerenje jedne ili više veličina koje su uspoređene s izmjerenim svojstvima stijenske mase u inženjerskim zadaćama. Time se dobiva sustav koji prikazuje kvalitetu stijenske mase kvantitativno temeljem tog indeksa. Osnovni nedostatak i opasnost korištenja takvih veličina je to što je to pokušaj da se kvaliteta stijenske mase iskaže jednim parametrom. Bez obzira na činjenicu da su takvi sustavi razvijeni na temelju iskustva stečenih mjerenjem, stijenska masa je prirodna tvorevina koja je na svakoj lokaciji jedinstvena, stoga da se samnji mogućnost pogreške prilikom klasifikacije stijenske mase preko indeksnih veličina potrebno je zadovoljiti neke uvjete.

Svaka klasifikacija stijenskih masa mora zadovoljiti sljedeća četiri uvjeta (Dugonjić, 2015):

- 1) podjela stijenske mase u grupe (kategorije, klase) sličnog ponašanja,
- 2) osiguranje osnove za razumijevanje karakteristika i ponašanja svake grupe,
- 3) davanje kvantitativnih podataka za inženjerski projekt i
- 4) osiguranje zajedničke osnove za uspješnu suradnju svih sudionika u projektu.

S obzirom da se radi o terenskim metodama potrebno je omogućiti jednostavnost prilikom klasificiranja stijenskih masa stoga klasifikacijski sustavi moraju imati povoljna svojstva za obavljanje na terenu i kasnije tumačenje te razradu u uredu.

Svojstva klasifikacijskih sustava stijenske mase (Dugonjić, 2015):

- 1) jednostavna, razumljiva, lako se shvaća i pamti,
- 2) svaki izraz mora biti jasan, a terminologija opće prihvaćena,
- 3) uključena samo najznačajnija svojstva stijenske mase,
- 4) temeljena na parametrima koji se mogu mjeriti i odrediti brzim i jeftinim pokusima,
- 5) bodovnom sustavu koji ocjenjuje relativnu važnost klasifikacijskih parametara i
- 6) daje kvantitativne podatke za projekt podgradnog sustava

3. Q – KLASIFIKACIJA (ENGL. *ROCK MASS QUALITY SYSTEM*)

Klasifikacija je razvijena u Norveškoj (Barton et al., 1974.) na osnovi velikog broja analiza, izvedenih tunela te podzemnih iskopa. Sustav je primarno korišten za određivanje karakteristika stijenske mase i odgovarajuće tunelske podgrade. Zasnovana je na numeričkoj procjeni kvalitete stijenske mase koja se opisuje sa šest parametara (Barton et al., 1974):

RQD – Indeks kvalitete jezgre (engl. *Rock Quality Designation*),

J_n – broj skupova pukotina,

J_r – indeks hrapavosti pukotina,

J_a – indeks alteracije (promjene) pukotina,

J_w – faktor pukotinske vode i

SRF – faktor redukcije naprezanja (in-situ stanja naprezanja)

Vrijednost Q varira od 0.0001 do 1000, a određena je izrazom 3-1. (Barton et. al., 1974):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (3-1)$$

U objašnjenu značenja pojedinih parametara koji se koriste za odrediti vrijednost Q daje se sljedeće tumačenje (Barton et. al. 1974):

- **Kvocijent** $\frac{RQD}{J_n}$; predstavlja cjelokupnu strukturu stijenske mase i na neki način prezentira relativnu veličinu bloka (isključeno učešće glinenih čestica),
- **Kvocijent** $\frac{J_r}{J_a}$; predstavlja veličinu približne posmične čvrstoće između blokova u funkciji hrapavosti i alteracije pukotina. Ustanovljena je veza u kojoj $\tan^{-1}\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$ odgovara vrijednosti posmične čvrstoće pukotina i
- **Kvocijent** $\frac{J_w}{SRF}$; predstavlja aktivni pritisak kroz odnos pritiska vode u pukotinama i parametra SRF koji predstavlja opterećenje rastresene zone u području rasjednih zona ili zona stijenske mase s glinom, naprezanja kod zdravih stijenskih masa ili naprezanja nastala uslijed gnječenja ili bubrenja plastičnih stijenskih masa.

Indeks kvalitete jezgre, broja skupova pukotina, hrapavosti pukotina, indeks alteracije, faktor pukotinske vode te faktor redukcije naprezanja se obično u literaturama prikazuju tablično uz određene napomene gdje već imamo određene numeričke vrijednosti, pa onda naše izmjerene vrijednosti svrstavamo u određenu grupu temeljem dobivenih numeričkih podataka.

Osim napomena koje su navedene u tablicama pri odabiru pojedinih parametara potrebno je obratiti pažnju i na sljedeće (Barton et. al., 1974):

- 1) U nedostatku podataka dobivenih bušenjem, vrijednost RQD indeksa može se odrediti iz broja pukotina po jedinici volumena.
- 2) Pri procjeni i odabiru parametra J_n često se susreće s pojavom listanja, škrljavosti, plohamama cijepanja i slojevitosti. Ova pojava mora se usvojiti kao skup pukotina. Ukoliko je vidljivo samo nekoliko takvih diskontinuiteta ili uslijed istih pojava dolazi do povremenih pojava pucanja jezgre, opravdano je iste usvojiti kao slučajne pukotine.
- 3) Parametri J_r i J_a koji predstavljaju posmičnu čvrstoću pukotina mjerodavni su za najslabiji skup pukotina ili glinom ispunjeni diskontinuitet. Ukoliko je isti skup pukotina ili diskontinuitet ispunjen glinom s obzirom na stabilnost pozitivno orijentiran, usvajaju se vrijednosti drugog skupa pukotina ili diskontinuiteta ispunjenog glinom, koji može imati veći utjecaj na stabilnost, iako ima veću vrijednost J_r/J_a .
- 4) Ukoliko stijenska masa sadrži glinu, faktor SRF usvaja se prema smanjenom opterećenju. U tom slučaju je čvrstoća intaktne stijene od manjeg značaja. U suprotnom slučaju, kad je prisutnost pukotina mala i uz gotovo potpuno odsustvo glinovitog sadržaja u stijenskoj masi, čvrstoća intaktne stijene postaje mjerodavna, a stabilnost ovisi o odnosu naprezanja u stijenskoj masi i čvrstoće stijenske mase.
- 5) Tlačna i vlačna čvrstoća stijene treba biti ispitana u smjeru mjerodavnom za stabilnost stijenske mase. To je posebno važno u slučaju jake anizotropnosti stijenske mase. Nadalje, uzorci moraju biti saturirani u skladu sa sadašnjim ili budućim uvjetima u procjenjenoj stijenskoj masi. Konzervativna procjena čvrstoće stijenske mase nužna je u uvjetima kada stijenska masa u uvjetima vlaženja ili saturacije gubi svoje značajke čvrstoće.

Na osnovi vrijednosti Q – indeksa, stijenska masa se može kategorizirati u devet kategorija kako je prikazano u tablici 3-1.

Tablica 3-1. Klasifikacija stijenske mase na osnovi Q indeksa (Barton et. al., 1974)

| Q | Grupa | Klasifikacija |
|------------|-------|-------------------------|
| 0,001-0,01 | | Izuzetno loša kvaliteta |
| 0,01-0,1 | 3 | Krajnje loša kvaliteta |
| 0,1-1 | | Vrlo loša kvaliteta |
| 1-4 | 2 | Loša kvaliteta |
| 4-10 | | Povoljna kvaliteta |
| 10-40 | | Dobra kvaliteta |
| 40-100 | 1 | Vrlo dobra kvaliteta |
| 100-400 | | Odlična kvaliteta |
| 400-1000 | | Izuzetna kvaliteta |

4. GEOMEHANIČKA KLASIFIKACIJA (ENGL. *ROCK MASS RATING*)

Geomehaničku klasifikaciju razvio je 1972.-73.g Z.T. Bieniawski u Južnoj Africi za potrebe projektiranja podgradnog sustava za iskop tunela. Klasifikacija je razvijena na temelju iskustva pri iskopu 30 podzemnih građevina, a sam klasifikacijski sustav je mijenjan i modificiran na osnovi rezultata primjene i provjere na većem broju podzemnih građevina. To se posebice odnosi na primjenu klasifikacije u različitim geološkim uvjetima te prilagodba klasifikacije različitim standardima i procedurama iskopa i podgrađivanja (Bieniawski, 1979). Posljednja izmjena koju je predložio Bieniawski objavljena je 1989.g. pod nazivom *RMR* (Bieniawski, 1989.).

RMR klasifikacija temelji se na određivanju i/ili procjenjivanju 5 osnovnih parametara te jedne korekcije (Bieniawski, 1989.):

1. jednoosna tlačna čvrstoća (*UCS*) / Indeks točkaste čvrstoće (*PLT*),
2. *RQD* indeks kvalitete jezgre (engl. *Rock Quality Designation*),
3. razmak pukotina (diskontinuiteta),
4. stanju pukotina (diskontinuiteta),
5. uvjeti podzemne vode i
6. korekcija obzirom na orijentaciju diskontinuiteta prema objektu.

Tablica 4-1. prikazuje dodjelu parametara svakoj skupini parametara za određivanje *RMR*-a.

Tablica 4-1. RMR klasifikacija (engl. Rock Mass Rating System) (Bieniawski, 1989.)

| A. Klasifikacijski parametri i njihovi bodovi | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------|---|--|--|--|--|---|-----|----|
| Parametri | | | Vrijednosti parametara | | | | | | |
| 1 | Čvrstoća intaktne stijene (Mpa) | Indeks čvrstoće u točki | >10 | 4 – 10 | 2 – 4 | 1 – 2 | Preporučuje se ispitat tlačnu čvrstoću | | |
| | | Jednosa tlačna čvrstoća | 250 | 100 – 250 | 50 – 100 | 25 – 50 | 5-25 | 1-5 | <1 |
| | Bodovi | | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 2 | RQD (%) | | 90 – 100 | 75 – 90 | 50 – 75 | 25 – 50 | <25 | | |
| | Bodovi | | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | |
| 3 | Razmaka diskontinuiteta | | >2 m | 0,6 – 2 m | 200-600 mm | 60-200 mm | <60 mm | | |
| | Bodovi | | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | |
| 4 | Stanje diskontinuiteta | | Vrlo hrapave površine, Nisu kontinuirani, Zijev =0, Rastrošeni | Neznatno hrapave površine, Zijev < 1 mm, Stijenka zidova neznatno rastrošena | Neznatno hrapave površine, Zijev < 1 mm, Stijenka zidova jako rastrošena | Skliske površine ili ispuna < 5 mm, Zijev 1 – 5 mm, Kontinuirani | Mekana ispuna > 5 mm ili Zijev > 5 mm, kontinuirani | | |
| | Bodovi | | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 | | |
| 5 | Podzemna voda | Dotok na 10 m duljine tunela (l/m) | Nema | <10 | 10-25 | 25-125 | >125 | | |
| | | Odnos tlaka puk. vode i većeg gl. napreznja | 0 | <0,1 | 0,1-0,2 | 0,2-0,5 | >0,5 | | |
| | | Opći uvjeti | kompletno suho | vlažno | mokro | kapanje | tečenje | | |
| Bodovi | | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | | |

| B. Korekcija bodova s obzirom na orijentaciju diskontinuiteta | | | | | | |
|---|------------------|---------------|----------|-------|------------|-----------------|
| Orijentacija diskontinuiteta | | Vrlo povoljna | Povoljna | Dobra | Nepovoljna | Vrlo nepovoljna |
| Bodovi | Tuneli i rudnici | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 |
| | Temelji | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 |
| | Kosine | 0 | -5 | -25 | -50 | -60 |

| C. Kategorizacija stijenske mase na osnovi ukupnog broja bodova | | | | | |
|---|--------------------|---------------|------------------|---------------|--------------------|
| Ukupni bodovi | 100-81 | 80-61 | 60-41 | 40-21 | <21 |
| Oznaka kategorije | I | II | II | IV | V |
| Opis | Vrlo dobra stijena | Dobra stijena | Povoljna stijena | Slaba stijena | Vrlo slaba stijena |

| D. Značenje pojedinih kategorija | | | | | |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| Oznaka kategorije | I | II | III | IV | V |
| Prosječno vrijeme postojanosti | 20 god/15 m raspona | 1 god/10 m raspona | 1 tj/5 m raspona | 10h/2,5 m raspona | 30 min/1 m raspona |
| Kohezija stijenske mase (kPa) | >400 | 300-400 | 200-300 | 100-200 | <100 |
| Kut trenja stijenske mase | >45 | 35-45 | 25-35 | 15-25 | <15 |

| E. Vodič za klasifikaciju stanja diskontinuiteta | | | | | |
|--|--------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| Duljina diskontinuiteta | <1 | 1-3 | 3-10 | 10-20 | >20 |
| Bodovi | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| Zijev diskontinuiteta | Nema zijeva | <0,1 mm | 0,1-1,0 mm | 1-5 mm | >5 mm |
| Bodovi | 6 | 5 | 4 | 1 | 0 |
| Hrapavost disontinuiteta | Vrlo hrapavi | Hrapavi | Neznatno hrapavi | Glatki | Skliški |
| Bodovi | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| Ispuna diskontinuiteta | Bez ispune | Tvrda ispuna <5 mm | Tvrda ispuna > 5 mm | Meka ispuna <5 mm | Meka ispuna > 5 mm |
| Bodovi | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 |
| Trošnost diskontinuiteta | Nerastrošene | Neznatno rastrošene | Umjereno rastrošene | Jako rastrošene | Potpuno rastrošene |
| Bodovi | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |

| F. Efekt orijentacije diskontinuiteta u tunelogradnji | | | |
|---|---|-------------------------------|--------------|
| Pružanje okomito osi tunela | | Pružanje paralelno osi tunela | |
| Iskop u smjeru nagiba diskontinuiteta 45-90° | Iskop u smjeru nagiba diskontinuiteta 20-45° | Nagib 45- 90° | Nagib 20-45° |
| Vrlo povoljno | Povoljno | Vrlo nepovoljno | Dobro |
| Iskop u smjeru suprotnom od nagiba diskontinuiteta 45-90° | Iskop u smjeru suprotnom od nagiba diskontinuiteta 20-45° | | |
| Dobro | Nepovoljno | Dobro | |

Osnovna ideja *RMR* klasifikacije je da se na temelju prethodno navedenih parametara stijenska masa ocjenjuje određenim brojem bodova te da se na kraju prema zbroju bodova odredi njena kvaliteta i potrebna podgrada ukoliko je riječ o podzemnim iskopima. Maksimalan broj bodova koji je moguće dobiti je 100. Prvi korak primjene *RMR* klasifikacije za određeni inženjerski zahvat u stijeni je podijeliti stijenu na pojedinačne inženjersko geološke zone koje se klasificiraju zasebno. Granice inženjersko geoloških zona su u pravilu određene značajnijim strukturnim pojavama kao što su rasjedi, zdrobljene zone

ili promjene vrste stijenske mase. Ponekad, pojedina stijenska masa bez obzira što pripada istom tipu stijene može se podijeliti u više zona kao posljedica različite orijentacije ili razmaka diskontinuiteta.

Kao što je prethodno navedeno parametri *RMR* klasifikacije grupirani su u pet odvojenih kategorija vrednovanja. Kako različiti parametri nisu jednako značajni u sklopu cjelokupne klasifikacije, značaju pojedinih parametara pridružena je i različita vrijednost bodova, pri čemu veći broj bodova određuje bolje uvjete stijenske mase. Ono što je važno naglasiti jest činjenica da je prije početka procesa bodovanja potrebno odrediti broj i orijentaciju setova diskontinuiteta iz razloga što se svaki set diskontinuiteta boduje, ocjenjuje i opisuje zasebno.

Rezultat procjene *RMR*-a su bodovi na temelju kojih se stijena svrstava u određenu kategoriju. Na temelju dobivene vrijednosti *RMR*-a, Bieniawski dijeli stijensku masu u pet kategorija (Bieniawski, 1979):

1. vrlo dobra stijenska masa – *RMR* 100-81,
2. dobra stijenska masa – *RMR* 80-61,
3. povoljna stijenska masa – *RMR* 60-41,
4. slaba stijenska masa – *RMR* 40-21 i
5. vrlo slaba stijenska masa – *RMR* <21.

Kao što je prethodno navedeno, geomehanička (*RMR*) klasifikacija napravljena je na temelju iskustva u tunelogradnji tj. iskustva u građevinarstvu. Kako je cilj klasifikacije stijenske mase da bude primjenjiva za različite inženjerske probleme u stijenama, a ne ograničena na usko područje tunelogradnje, kroz povijest je razvijeno nekoliko sustava klasifikacija za različite primjene koji su temeljeni na standardnom *RMR*-u. Tri najpoznatije modifikacije su:

1. *MRMR* – engl. *Modified Rock Mass Rating system for mining MBR* (engl. *Modified Basic RMR*), (Cummings i dr., 1982.),
2. *SRM* (engl. *Slope Mass Rating*), (Romana, 1993) i
3. *QTBM* – *Q* klasifikacija za strojni punoprofilni iskop tunela, (Barton, 2000).

MRMR (engl. *Modified Rock Mass Rating*) je klasifikacija razvijena za potrebe rudarske industrije. Upravo sugestijama te prilagodbom klasične geomehaničke klasifikacije za potrebe rješavanja problema u rudarstvu razvijena je *MRMR* klasifikacija za rudarstvo. Razvio ju je Laubscher (Laubscher, 1977.), na temelju iskustva u dubokim rudnicima zlata u Južnoj Africi, a sadrži osnovne *RMR* vrijednosti određene po Bieniawskom kojima se pridodaje proračun i in-situ stanja naprezanja, naprezanja uslijed promjene opterećenja i

promjene naprezanja te utjecaj miniranja i trošenja stijenske mase. S druge strane, Dummings i drugi također su napravili svojevrsnu modifikaciju *RMR*-a i dobili *MBR* (engl. *Modified Basic RMR*). Modifikacija je provedena zahvaljujući iskustvu na iskopima blokova u kamenolomima diljem SAD-a. *MBR* u obzir tako uzima i stupanje oštećenja stijenske mase miniranje, utjecaj trošenja, utjecaj dodatno izazvanih naprezanja, strukturnih utjecaja, udaljenosti od fronti iskopa te veličine bloka. Ova klasifikacija predlaže i podgradni sustav kao trajnu i privremenu podgradu.

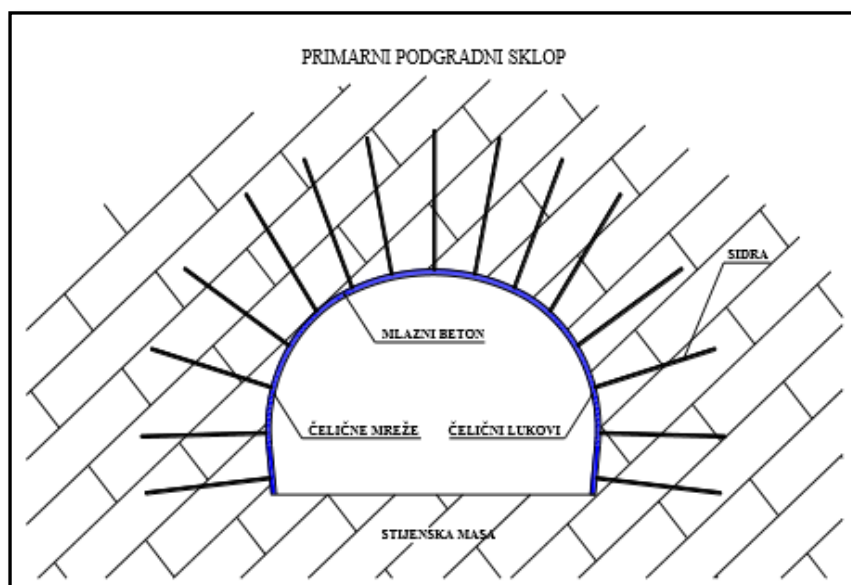
Stabilnost kosina predstavlja jednu od glavnih zadataka koje je potrebno riješiti u mehanici stijena. Romana (Romana, 1985.) u svom radu definira *SMR* klasifikaciju (engl. *Slope Mass Rating*). Ova modificirana *RMR* klasifikacija razvijena je za potrebe rješavanja problema stabilnosti kosina. *SMR* klasifikacija sastoji se od *RMR* klasifikacije kojoj se oduzima produkt faktora ovisnih o odnosu položaja pukotina – kosina i dodaje faktor metode iskopa kosine. Osim što se stijenska masa na temelju zbrojenih bodova razvrstava u jednu od 5 kategorija po kvaliteti, njoj se pridružuje i kategorija stabilnosti kosine i mogući tipovi sloma u kosini za koji se predlaže određena metoda stabilizacije. Kao i sve prethodne klasifikacije i ova je razvijena na temelju praktičnog iskustva i to prilikom izvođenja zasjeka i usjeka na području Španjolske.

5. PRIMARNA PODGRADA

Primarna podgrada primjenjuje se za vrijeme ili odmah nakon iskopa kako bi se osigurali sigurni radni uvjeti tijekom kasnijeg iskopa i inicirao proces mobiliziranja i konzervacije čvrstoće stijenske mase na način da se kontrolira pomak granica iskopa. Svaka dodatna podgrada primijenjena u kasnijoj fazi se naziva sekundarnom.

Elementi primarne podgrade, kako je prikazano na slici 5-1., su:

- 1) stijenska masa,
- 2) mlazni beton,
- 3) čelične mreže,
- 4) čelični lukovi i
- 5) sidra.

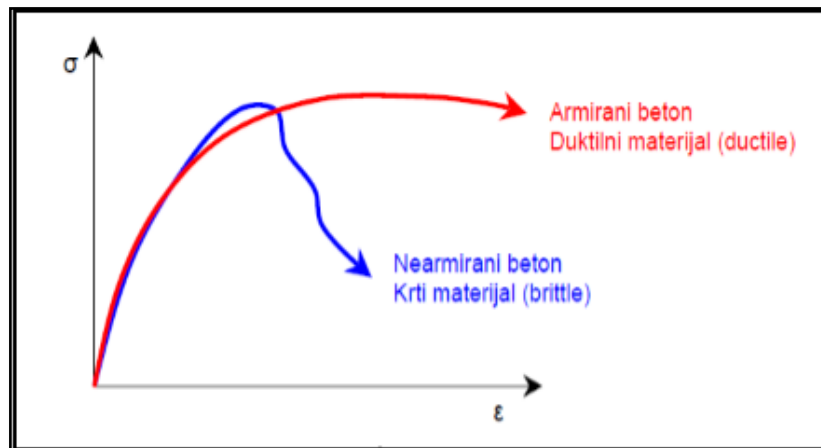


Slika 5-1. Shematski prikaz elementa primarne podgrade tunela (Unknown, n.d.)

Mlazni beton se upotrebljava za sprečavanje rahljenja stijene i kao podgradni element. Obloga od mlaznog betona zatvara pukotine u stijeni sprečava ispadanje blokova stijene iz kalote i bokova i time pojavu progresivnog loma. Vezanjem za stijenu poboljšava kvalitetu stijene i sprečava redukciju njezine čvrstoće.

Za izgradnju primarne podgrade i sekundarne obloge tunela može se umjesto normalnog mlaznog betona primijeniti i mikroarmirani mlazni beton (*MAMB*) primjenom čeličnih ili polipropilenskih vlakana propisanih karakteristika. Kod klasičnog nearmiranog betona nema

dotatne deformacije nego dolazi do razdvajanja, tj. nastaje krta lom dviju polovica, dok se kod mlaznog betona s čeličnim vlaknima uočava znatna postpukotinska nosivost kao što je i prikazano na slici 5-2.



Slika 5-2. Dijagram ovisnosti napreznja i deformacije krtog i duktilnog betonskog materijala (Unknown, n.d.)

Čelične mreže (slika 5-3.) se upotrebljavaju u kombinaciji s mlaznim betonom. Uobičajeno se primjenjuju zavarene mreže "Q" i "R". Kod većih debljina mlaznog betona (> 25 cm) primjenjuje se dvostruka mreža, dok kod slabijih stijena se primjenjuju čelični lukovi (slika 5-4.) koji podupiru iskop zajedno s armiranim mlaznim betonom kao elastična podgrada i sprečavaju rastresanje stijene. Postavljaju se neposredno nakon iskopa ako nema izgleda da će lagana podgrada zaustaviti napredovanje deformacije stijene.



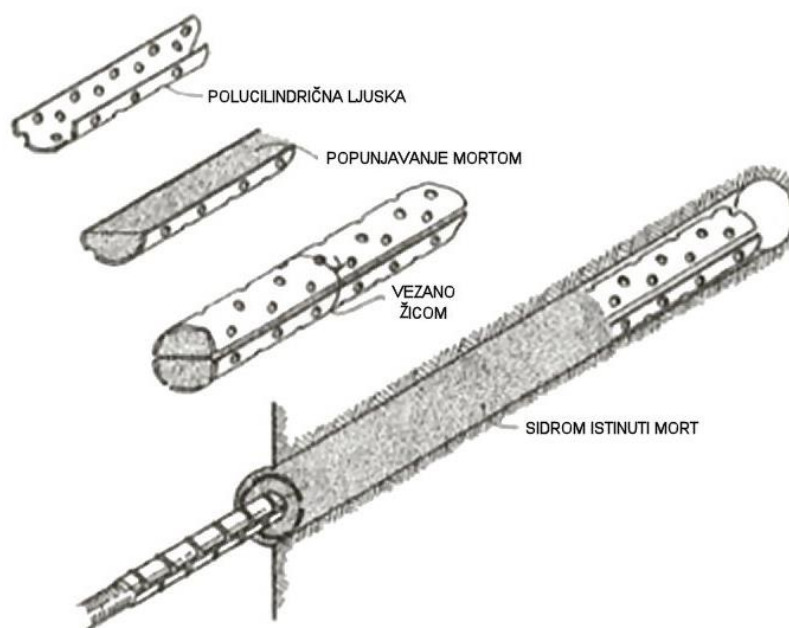
Slika 5-3. Čelična mreža pričvršćema sidrima (TEDESA - Técnicas de Entibación, S.A., 2013.)



Slika 5-4. Detalj čeličnog luka pri bušenju ulaznog portala tunela (TEDESA - Técnicas de Entibación, S.A., 2013.)

Sidra su osnovni podgradni element s kojim se poboljšavaju fizičke i mehaničke karakteristike stijene oko iskopa. Ugrađuju se sustavno kao dio standardnog podgradnog sustava. Broj sidara, njihova dužina, nosivost i raspored ovise o kvaliteti stijene, veličini i obliku poprečnog presjeka i dužini napredovanja.

Uloga pojedinačnog sidrenja je da sanira lokalne pojave nestabilnosti i smanjuje mogućnost geoloških odvala stijenske mase, dok je uloga sistematskog sidrenja povećanje ili održavanje čvrstoće stijenske mase i ravnomjerna raspodjela opterećenja oko podzemnog iskopa. Neke poznatije vrste sidara su: čelično sidro s rascjepkom, "PERFO" sidro, injektirano sidro, sidro vezano plastičnom masom, sidro s mehaničkom bravom, sidro u obliku razrezane cijevi, swellex sidro, samobušćeće sidro, plastična sidra itd. Na slici 5-5. je kao primjer prikazano "PERFO" sidro koje sadrži mort u dvodjelnoj perforiranoj cijevi koji prilikom uguravanja sidra pneumatskim čekićem u bušotinu izlazi kroz perforacije i zapunjava bušotinu.



Slika 5-5. "PERFO" sidro (Hoek i Brown; 1980).

Djelovanje sidara u stijenskoj masi može se opisati kao (Unknown, n.d.):

- 1) dodatni unutrašnji pritisak na granicu iskopa,
- 2) poboljšanje karakteristika stijenske mase,
- 3) pridržanje nestabilnih blokova,
- 4) povezivanje slojeva uz povećanje posmične čvrstoće u diskontinuitetima i
- 5) formiranje nosivog svoda od stijene ojačane sidrima.

Navedeni elementi su klasični pri izradi primarnih podgrada, no u ekstremnim slučajevima se uz klasično podgrađivanje koriste i posebne metode podgrađivanja i iskopa. Od posebnih mjera podgrađivanja treba istaknuti sljedeće: čelična koplja, cijevni kišobran, mlazno injektiranje, iskop pod komprimiranim tlakom, zamrzavanje tla i stijene te odvodnja.

6. PRIMJENA Q KLASIFIKACIJE U PROJEKTIRANJU PRIMARNE PODGRADE TUNELA

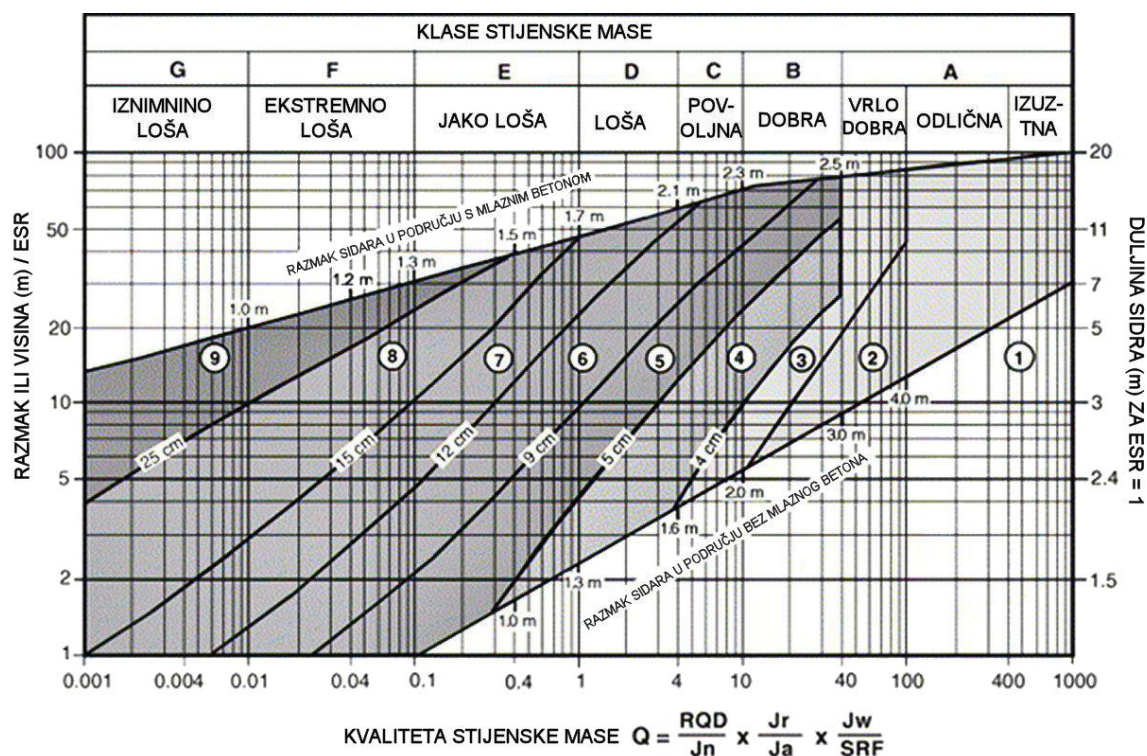
Kvaliteta stijenske mase, Q – indeks, povezana je s ekvivalentnom dimenzijom iskopa što je rezultiralo potrebnim podgradnim sustavom tunela (Barton et al., 1974). Ekvivalentna dimenzija dobivena je kao odnos raspona, promjera ili visine zidova i veličine nazvane indeksom (koeficijentom) podgrade ESR (engl. *Excavation Support Ratio*). Općenito gledajući potreba za podgradom se povećava ukoliko se povećava raspon i visina iskopa. Potreba za sigurnosti pak varira ovisno o namjeni objekata koji se izgrađuje pa tako npr. cestovni tunel ili podzemna nuklearna elektrana će trebati veće mjere sigurnosti prilikom iskapanja i izgradnje od recimo tunela za prijenos vode ili privremenog rudnika.

Vrijednosti ESR utvrđene su empirijski, odgovarajućim mjerenjima na podgradnim sustavima u različitim uvjetima stijenske mase na 38 kategorija iskopa (Barton et al., 1974). Vrijednosti ESR -a ovisno o tipu stijenske kategorije dane su u tablici 6-1. Manja vrijednost ESR -a nam ukazuje na potrebu za većim sigurnosnim zahvatima, dok nam veća vrijednost ESR -a ukazuje na manju potrebu za povećanjem sigurnosti prilikom izrade objekata. Treba napomenuti kako vrijednosti ESR -a se razlikuju od države do države i nisu opće prihvaćene. Preporučljivo je uzeti vrijednost $ESR=1,0$ kada Q – indeks iznosi $Q \leq 0,1$ i to za tipove stijena B, C i D. Razlog tome što stabilnost može biti vrlo ugrožena zbog tako niskih vrijednosti Q – indeksa pa može doći do urušavanja.

Tablica 6-1. Vrijednosti ESR -a obzirom na tip stijenske kategorije (Barton et al., 1993)

| | | |
|---|--|-----|
| A | Privremeni rudnici i slični iskopi | 3-5 |
| B | Vertikalna okna kružnog presijeka | 2,5 |
| | Vertikalna okna pravokutnog/kvadratičnog presijeka | 2,0 |
| C | Trajni rudnici, visokotlačni hidro-tuneli, tuneli za dobavu vode, pilot tuneli i bušotine za veće iskope | 1,6 |
| D | Manji cestovni i tračni tuneli, prilazni tuneli, kanalizacijski tuneli, veći podzemni vodospremnici | 1,3 |
| E | Elektrane, veliki cestovni i željeznički tuneli, podzemna spremišta, civilne podzemne komore i skloništa, portali | 1,0 |
| F | Podzemne nuklearne elektrane, podzemni metro, temelji tvornica i sportskih te javnih ustanova | 0,8 |
| G | Kaverne i podzemne prostorije od velike važnosti s vijekom trajanja od minimalno 100 godina ili bez pristupa za održavanje | 0,5 |

Grimstad i Barton (Grimstad i Barton, 1993) predložili su podgradne sustave u odnosu na Q – indeks i ekvivalentnu dimenziju iskopa u izdvojenih 9 kategorija stijenske mase. Prijedlog je grafički prikazan na nomogramu (slika 6-1.). Nomogram nam prikazuje koja vrsta podgrade se primjenjuje u kojoj kategoriji stijena te koji je razmak sidara od centra do centra sidra te koja je debljina mlaznog betona. Također nam prikazuje i količinu apsorbirane energije koju mogu preuzeti vlakna unutar mlaznog betona te duljinu sidra i dizajn pojačanih mlaznobetonskih rebara. Ovaj prikaz je općeniti te ga se ne treba držati slijepo već su moguće određene izmjene osobito ukoliko se radi o teškim stijenskim uvjetima.



Slika 6-1. Prikaz kategorija podgrade zasnovanih na Q – indeksu

Prema vrsti klasificirane stijene razlikuje se devet načina podgrade kao što je numerirano na slici 6-1. brojevima od 1 do 9, a to su redom (Barton et al., 1993) :

1. nepodgrađeni prostor između geotehničkih sidara,
2. mjestimično sidrenje krutim geotehničkim sidrima,
3. sistematično sidrenje krutim geotehničkim sidrima,
4. sistematično sidrenje krutim geotehničkim sidrima od 40 mm do 100 mm nearmiranog mlaznog betona,
5. mikroarmirani mlazni beton debljine 50 mm do 90 mm i sidrenje,
6. mikroarmirani mlazni beton debljine 90 mm do 120 mm i sidrenje,

7. mikroarmirani mlazni beton debljine 120 mm do 150 mm i sidrenje,
8. mikroarmirani mlazni beton debljine >150 mm s armiranim lukovima od mlaznog betona i sidrenje,
9. lijevani armirani beton

6.1. Primjena mlaznog betona i sidrenje u ovisnosti o Q – indeksu

Debljina mlaznog betona se povećava ukoliko se vrijednost Q – indeksa smanjuje, no ukoliko dođe do određenih deformacija uzrokovanih velikim naprezanjima, pojačani mlazni beton treba koristiti bez obzira o kojoj se stijenskoj kategoriji radi. Kod većih vrijednosti Q – indeksa mlazni beton se može, ali ne mora koristiti, dok će srednji razmak između sidara ovisiti upravo o primjeni ili ne primjeni mlaznog betona. Zadnjih par godina je zakonom uvedeno da se mlazni beton nanosi u tankom sloju ukoliko se rade podzemne građevine unutar naseljenih područja radi sigurnosti izvođača radova i radi sigurnosti ostalih ljudi u okolini od potencijalnog urušavanja.

Pa onda tako razlikujemo dva područja u Q – dijagramu i to: "Razmak između sidara u području s primjenom mlaznog betona" i "Razmak između sidara u području bez primjene mlaznog betona". Izraz "*razmak između sidara*" ne treba shvatiti doslovno jer to u pravilu predstavlja količinu sidara potrebnih na određenom području, a ne precizan razmak između sidara. Pozicija i smjer pojedinog sidra se definira temeljem procjene geometrije diskontinuiteta prema Q – klasifikaciji, a to je posebno važno na područjima gdje su veliki razmaci između pojedinih sidara. Dok na područjima gdje se ne koristi mlazni beton, strogo sistematično sidrenje nije toliko nužno već je stvar procjene gdje će se i pod kojim kutom pojedino sidro unijeti.

Kada se govori o duljini sidra ona ovisi o rasponu i visini zidova podzemnih prostorija, a također dijelom ovisi i o kvaliteti stijenske mase, a preporučljive duljine sidara za pojedinu kategoriju stijene su na dijagramu prikazane na desnom dijelu dijagrama, no naravno ne treba ih se slijepo držati već učiniti procjenu na terenu. Općenito gledajući u slučaju vrlo nepovoljnih diskontinuiteta i malih vrijednosti Q – indeksa nužno je potrebno povećati duljine sidara i izvan granica preporučljivih duljina.

6.2. Primjena Q – indeksa kod projektiranja ravnih bočnih zidova podzemnih prostorija

Dijagram Q – indeksa primarno vrijedi za kalotu tunela i za bočne zakrivljene, potporne zidove tunela i kaverni. Dok primarna podgrada na ravnim bočnim zidovima nije važna u tolikoj količini i obično dobivamo srednje do visoke vrijednosti Q – indeksa ($Q > 0,1$). Dakle kada se Q – sustav klasifikacije stijenske mase koristi na bočnim ravnim zidovima podzemnih prostorija potrebno je više uzeti u obzir visinu zida, nego raspon zida, pa se stoga stvarni Q – indeks treba prilagoditi takvom slučaju i to se radi prema tablici 6-2.

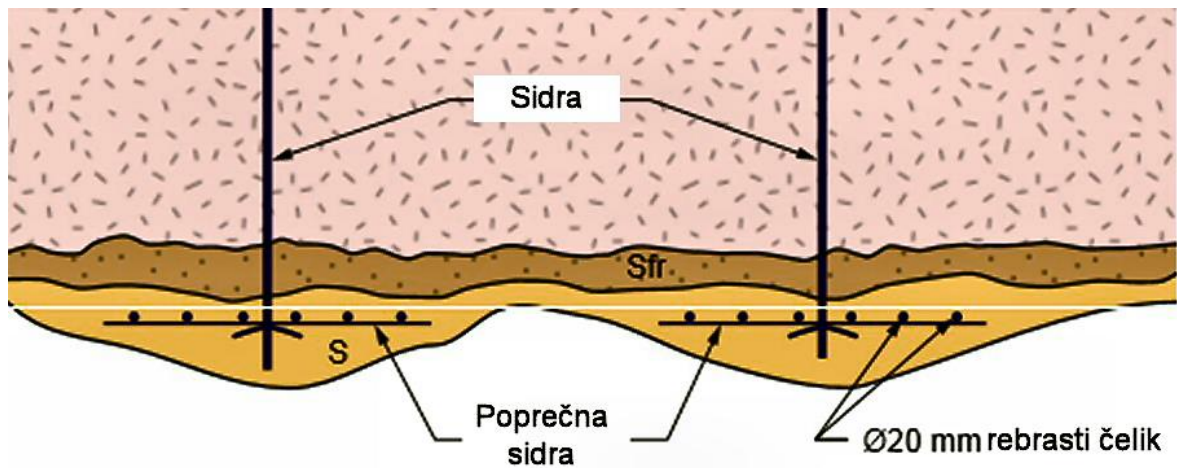
Tablica 6-2. Konverzija pravog Q – indeksa u slučaju projektiranja podgrade ravnih zidova (Barton et al., 1993.)

| Kvaliteta stijenske mase | Vrijednost Q | Konverzija |
|-----------------------------------|----------------|---|
| Kvalitetna stijenska masa | $Q > 10$ | Množenje Q vrijednosti s faktorom 5 |
| Srednje kvalitetna stijenska masa | $0,1 < Q < 10$ | Množenje Q vrijednosti s 2,5 (u slučaju velikih naprezanja koristiti stvarni Q -indeks) |
| Loša stijenska masa | $Q < 0,1$ | Koristiti stvarni Q – indeks |

Dobivena vrijednost Q – indeksa nakon konverzije se dalje koristi pri projektiranju podgrade prema ranije danom predlošku sa slike 6-1.

6.3. Armirana rebra od mlaznog betona

Armirana rebra od mlaznog betona (engl. *Reinforced Ribs of Sprayed concrete*) se koristi ukoliko imamo stijensku masu s jako lošim uvjetima ($Q < 1$). rebrasto mlazno betoniranje se često koristi kao povoljna alternativa lijevanom armiranom betonu. Rebra su konstruirana kao kombinacija čeličnih šipki promjera od 16 mm do 20 mm, mlaznog betona i sidara. Presjek *RRS*-a je prikazan na slici 6-2, a praktična izvedba u tunelu prikazana je na slici 6-3.

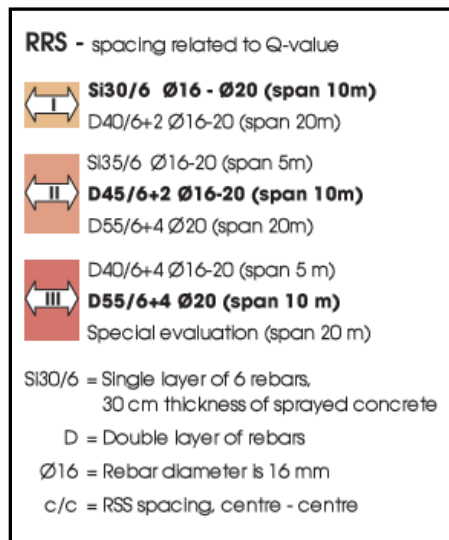


Slika 6-2. Presjek rebara kod rebrastog mlaznog injetiranog pojačanja (Norwegian Geotech. Inst., 2015.)



Slika 6-3. Praktična izvedba RRS sistema (Grimstad et. al, 2012.).

Debljina pojedinog rebra, razmak između njih i promjer čeličnih šipki unutar njih ponajviše ovisi o dimenzijama podzemnog otvora i kvaliteti stijenske mase, stoga često varira. Monitoringom i proučavanjem već postojećih RRS konstrukcija u različitim stijenskim uvjetima dane su neke smjernice za izradu RRS konstrukcija koristeći vrijednosti dobivenih Q – indeksa te dimenzije ekvivalentnog otvora podzemne prostorije D_e (Slika 6-4.)



Slika 6-4. Smjernice za izvođenje RRS konstrukcije temeljem Q – indeksa i D_e (Barton et. al., 1993.).

Gdje je:

Si – jedan red čeličnih šipki (engl. *single layer of steel bars*),

D – dupli red čeličnih šipki (engl. *double layers of steel bars*),

45 – ukupna debljina rebra iznosi 45 cm (engl. *total rib thickness of 45 cm*),

6 – šest čeličnih šipki (engl. *six steel bars*),

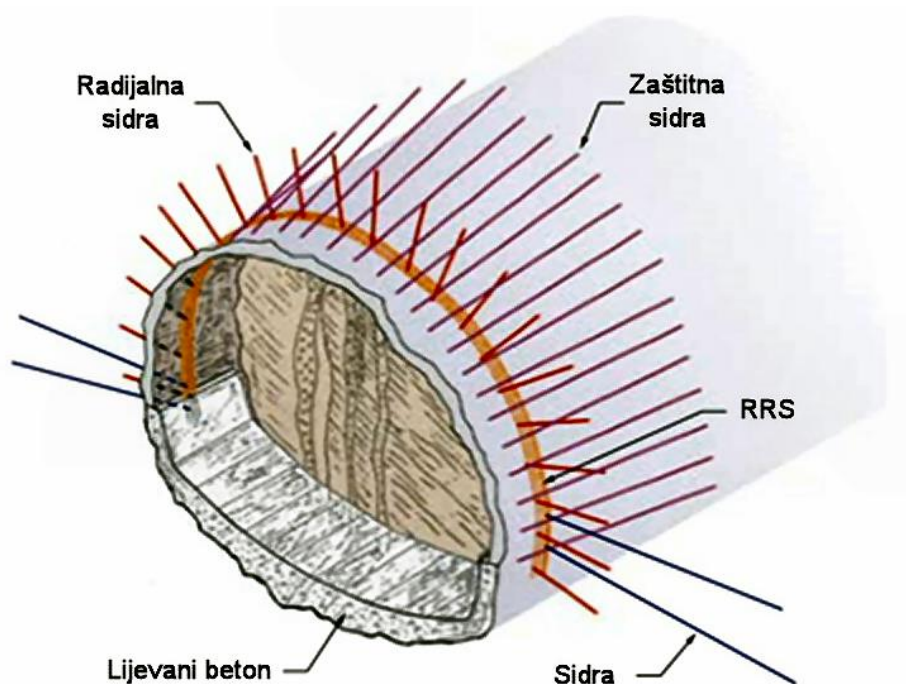
c/c – razmak od rebra do rebra 2 do 3 metra gledajući od centra rebra (engl. *centre to centre spacing of 2 to 3 m between the ribs*) i

$\phi 16 / \phi 20$ – promjer čeličnih šipki u mm (engl. *diameter of steel bar in mm*).

Na terenu, naravno, ne treba se slijepo držati danih smjernica već određenim inženjersko geološkim iskustvom procijeniti svaki pojedini razmak između rebara. U slučajevima kada se procjeni da je potrebno izraditi RRS, tada se prvo pristupa nanošenju sloja mlaznog betona i to debljina 12 cm do 15 cm. Taj sloj mlaznog betona ima funkciju privremene podgrade, a ujedno i zaglađuje površinu stijene na koju će se instalirati RRS sustav. Važno je napomenuti da debljina tog nanesenog sloja od 12 cm do 15 cm se uzima u konačnu debljinu RRS sustava.

6.4. Cijevni kišobran i Q – indeks

Metoda cijevnog kišobrana najčešće se primjenjuje u stijenskim masama slabe kvalitete koje su sklone urušavanju. Cijevni kišobran se instalira ispred radnog čela tunela kako bi spriječio prekomjerni iskop prilikom miniranja ili urušavanje prilikom strojnog otkapanja (slika 6-5.)



Slika 6-5. Podgrada stijene korištenjem metode cijevnog kišobrana (Norwegian Geotech. Inst., 2015)

Metoda cijevnog kišobrana nije unesena u nomogram podgrade prema Q – indeksu , no ostala predložena podgradna rješenja temeljena na maloj vrijednosti Q – indeksa su proizašla upravo promatranjem djelovanja cijevnog kišobrana na stijensku masu tijekom eksploatacije. Potreba za cijevnim kišobranom ponajviše ovisi o rasponu podzemne prostorije i kvaliteti stijenske mase. Općenito je preporučljivo koristiti ovu metodu podgrade u stijenskim masama u kojima smo dobili Q – indeks manji od 0,1 – 0,6 ovisno o rasponu podzemne prostorije. Razmak između šipki je obično srednjih 0,3 m (0,2 m – 0,6 m) i krajnji dio šipke je usidren u dio stijene koja leži iznad dijela koji se štiti od urušavanja i to preko radialnih vijaka u kombinaciji sa čeličnim trakama i mlaznim betonom kako bi se spriječilo urušavanje na području iskapanja.

6.5. Podgrada slabih i uskih zona

U slučaju nailaska na uske zone slabije stijenske mase razmatramo sljedeća dva faktora kod projektiranja podgrade: širinu zone te smjer širenja zone obzirom na os iskopne fronte. Na temelju ta dva faktora manje zone slabije stijenske mase mogu biti definirane kao zone kod kojih je potrebna jača podgrada, ali i ne mora tako biti. Ukoliko je zona širine 2 m – 3 m tada se obično pristupa projektiranju zasebnih podgrada za to područje koje su jače od ostatka podgrade, dok zone širine 0,5 m – 2 m će biti podgrađene pomoću sidara za i lukova i to vezano za okolnu stabilniju stijenu.

Za slabe i uske zone stijenskih masa nije pogodno koristiti samo Q – klasifikaciju zasebno zato jer upravo zbog njihove male širine primarna podgrada temeljena na Q – klasifikaciji će uključiti i okolnu stijenu u proračun podgrade. Drugim riječima, ukoliko imamo slabu zonu širine 1 m, podgrada će zahvatiti ukupno stijenu od 3 m širine kako bi se podgrada slabe zone povezala sa zdravom stijenom. Vrsta podgrade će biti projektirana temeljem srednje vrijednosti Q – indeksa na širini od 3 m stijenske mase.

Koristeći srednje vrijednosti Q – parametara u zoni podgrade može se izračunati srednja Q – vrijednost. A da bi se dobio egzaktni opis tog područja potrebno je odrediti posebno Q – vrijednost slabe uske zone i Q – vrijednost okolne zdrave stijene koju će podgrada zahvatiti. Obzirom da su Q – vrijednosti povezane logaritamskom skalom vrijedi izraz 6-1. (Lošet, 1977):

$$\log Q_{sr} = \frac{b \cdot \log Q_{zona} + \log Q_{zdrava}}{b+1} \quad (6-1)$$

gdje je:

Q_{sr} – srednja vrijednost Q – indeksa za ukupnu površinu (slaba zona + zdrava stijena),

Q_{zona} – vrijednost Q – indeksa za slabu usku zonu,

Q_{zdrava} – vrijednost Q – indeksa zdrave stijene i

b – širina slabe zone mjerena duž osi pružanja iskopa.

Pažnju je potrebno obratiti u slučajevima kada okolna zdrava stijena ima velike vrijednosti Q – indeksa tada ćemo u proračunu dobiti velike vrijednosti Q_m . Onda se temeljem iskustva odlučuje hoće li se ili neće sidriti podgrada u zdravu zonu. Nadalje potrebno je obratiti i pažnju ukoliko imamo vrlo uske zone od jedva 0,5 m koje se protežu paralelno osi iskopa, tada će biti $Q_m \approx Q_{zona}$ što može rezultirati da srednja Q – vrijednost (Q_m) bude premala.

7. PRIMJENA GEOMEHANIČKE (*RMR*) KLASIFIKACIJE U PROJEKTIRANJU PRIMARNE PODGRADE TUNELA

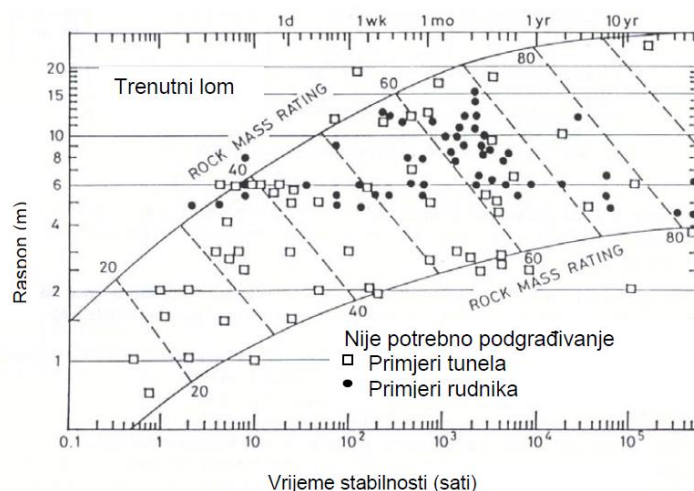
U ovom poglavlju će biti pobliže objašnjene preporuke i način primjene geomehaničke (*RMR*) klasifikacije, te jedan primjer projektiranja podgrade tunela temeljem rezultata dobivenih opažanjem stijenske mase na terenu koristeći smjernice *RMR* klasifikacije.

7.1. Preporuke geomehaničke klasifikacije za projektiranje primarne podgrade tunela

Na temelju određene vrijednosti *RMR*-a na terenu primjena u svrhu iskopa tunela može se promatrati sa dva aspekta:

- vrijeme koliko stijenska masa može ostati nepodgrađena i
- koju tunelsku podgradu primijeniti obzirom na kvalitetu stijenske mase.

Dijagram koji je u sklopu opisa geomehaničke klasifikacije 1989.g. objavio Bieniawski prikazan je na slici 7-1. Dijagram prikazuje preporuke za iskop i podgrađivanje prilikom iskopa podzemne prostorije za različite raspone podzemnih prostorija. Obzirom na kvalitetu stijenske mase (*RMR* vrijednost) može se iz dijagrama odrediti vrijeme stabilnosti nepodgrađene podzemne prostorije. Iz slike se može zaključiti da se s porastom vrijednosti *RMR*-a stijenska masa može duže ostaviti nepodgrađena. Detaljnije preporuke su iznešene u tablici 7-1.



Slika 7-1. Vrijeme stabilnosti u odnosu na raspon za različite vrijednosti *RMR*-a (Vrkljan, 2013).

Tablica 7-1. Preporuke za iskop i primarnu podgradu tunela raspona 10 m prema geomehaničkoj (*RMR*) klasifikaciji (Vrkljan, 2013).

| Kategorija stijenske mase | Iskop | Sidra (promjer 20 mm, adheziona) | Mlazni beton | Čelični lukovi |
|--|---|--|---|--|
| I – Vrlo dobra stijenska masa <i>RMR</i> : 81-100 | Puni profil, napredovanje 3 m | Općenito nije potrebna podgrada osim mjestimičnog sidrenja | | |
| II – Dobra stijenska masa <i>RMR</i> : 61-80 | Puni profil, napredovanje 1-1,5 m. Kompletna podgrada 20 m od čela iskopa | Mjestimično sidrenje svoda. Sidra duljine 3 m na razmaku od 2,5 m. Mjestimično čelična mreža | 50 mm u krovu po potrebi | Nepotrebno |
| III – Povoljna stijenska masa <i>RMR</i> : 41-60 | Iskop u dvije faze. Napredovanje u svodu 1-3 m. Započeti podgrađivanje nakon svakog miniranja. | Sistematsko sidrenje u svodu i zidovima. Sidra duljine 4 m na razmaku 1,5-2 m. Čelična mreža u svodu. | 50-100 mm u krovu i 30 mm na zidovima | Nepotrebno |
| IV – Slaba stijenska masa <i>RMR</i> : 21-40 | Iskop u dvije faze. Napredovanje u svodu 1-1,5 m. Započeti podgrađivanje nakon svakog miniranja. Kompletna podgrada 10 m od čela iskopa | Sistematsko sidrenje u svodu i zidovima. Sidra duljine 4-5 m na razmaku 1- 1,5 m. Čelična mreža u svodu i zidovima | 100-150 mm u krovu i 100 mm na zidovima | Lagani do srednji lukovi na razmaku 1,5 m po potrebi |
| V – Vrlo slaba stijenska masa <i>RMR</i> : <20 | Razrada profila, napredovanje u svodu 0,5-1,5m. Podgrađivanje | Sistematsko sidrenje u svodu i zidovima. Sidra duljine 5-6m na razmaku 1.1,5m u | 150-200 mm u krovu 150 mm na | Srednje teški do teški lukovi na razmaku |

| | | | | |
|--|---|--|--------------------------|---|
| | usporedno s iskopom. Nanošenje mlaznog betona odmah nakon iskopa | krovu i zidovima. Čelična mreža u svodu i zidovima. Sidrenje podnožnog svoda | zidovima i 50 mm na čelu | 0,75 m s čeličnim platicama i predbijanje m po potrebi. Zatvranje podnožnog svoda. |
|--|---|--|--------------------------|---|

Uz navedeni dijagram ovisnosti vremena stabilnosti o rasponu podzemne prostorije i kvaliteti stijenske mase date su i preporuke za podgrađivanje. Preporuke su date za svih pet kategorija stijenske mase, od vrlo slabe do vrlo dobre stijenske mase. Preporuke navedene u tablici 7-1. odnose se na tunela raspona 10 m koji je iskopan tehnikom miniranja s dominantnim primarnim geološkim naprezanjem u iznosu < 25 MPa. To naprezanje odgovara naprezanju uzrokovanom od približno 900 m nadsloja u stijeni (Hoek, 1995.). Iz navedene tablice može se zaključiti da su naponi da se izvede primarna podgrada i osigura stabilnost tunela veću u slučaju lošije stijenske mase. Također, sa smanjenjem kvalitete stijenske mase komplicira se i postupak iskopa tunela

7.2. Primjer projektiranja primarne podgrade tunela

Projektiranje primarne podgrade tunela bit će objašnjeno na primjeru tunela koji je izveden u granitnim stijenama. Primjer tunela uzet je iz priručnika „*Support of Underground Excavations in Hard Rock Tunnel*“ (Hoek, 1995.). Tunel se izvodi u blago trošnim granitima sa dominantnim setom diskontinuiteta nagibom u smjeru suprotnom od smjera iskopa pod kutom nagiba od 60° . Inženjerski geolog utvrdio je, kartiranje iz bušotine, da je riječ o stijeni prosječne vrijednosti $RQD = 70\%$ i Indeksne točkaste čvrstoće od 8 MPa. Plohe diskontinuiteta su neznatno hrapave i neznatno do blago trošne. Zijev diskontinuiteta je < 1 mm, a diskontinuiteti su na prosječnom razmaku od 300 mm. Uvijek iskopa su mokri, tj. očekuje se prtok podzemne vode. Na temelju utvrđenih parametara na terenu provedena je geomehanička klasifikacija i utvrđena RMR vrijednost. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 7-2.

Tablica 7-2. Prikaz dobivenih bodova geomehničke klasifikacije (Hoek, 1995.).

| Parametar | Utvrđena vrijednost | RMR vrijednost |
|---|---------------------|----------------|
| Indeksna čvrstoća | 8 MPa | 12 |
| <i>RQD</i> | 70% | 13 |
| Razmak diskontinuiteta | 300 mm | 10 |
| Stanje diskontinuiteta | Dodatak 1 | 22 |
| Stanje podzemne vode | Mokro | 7 |
| Korekcija obzirom na orijentaciju diskontinuiteta | Dodatak 2 | -5 |
| | Ukupno | 59 |

Dodatak 1. Za neznatno hrapave i blago trošne površine stijenci diskontinuiteta sa zijevom < 1 mm, Tablica 4-1. daje vrijednost 25. Međutim, provedena je i dodatna analiza koja je uzela u obzir i parametre kao što su prostiranje diskontinuiteta, zijev, ispuna te trošnost. Stoga je ukupni zbroj bodova 22 dobiven kao zbroj: 4 (1-3 m prostiranje), 4 (zijev od 0,1-1 mm), 3 (neznatno hrapave), 6 (bez ispune) te 5 (neznatno trošne).

Dodatak 2. Tablica 4-1. daje opis „Dobra“ za orijentaciju diskontinuiteta obzirom na smjer iskopa tunela. Iskop je planiran u smjeru suprotnom od smjera nagiba dominantnog seta diskontinuiteta. Uporabom opisa „Tuneli i rudnici“ dobivena je vrijednost -5.

Iz svega navedenog slijedi da je stijenska masa na temelju vrijednosti RMR=59 okarakterizirana kao povoljna stijenska masa. Sukladno tome na temelju tablice 7-1. Potrebno je definirati primarnu podgradu i definirati postupak iskopa. Iskop je potrebno provesti u dvije faze. Napredovanje u svodu treba biti od 1 m do 3 m. Podgrađivanje je potrebno provesti nakon svakog miniranja. Kompletna podgrada treba biti izvedena 10 m od čela tunela. Podgrada se sastoji od kombinacije adhezijskih sidra promjera 20 mm i mlaznog betona. Potrebno je provesti sistemsko sidrenje u svodu i u zidovima. Potrebno je koristiti sidra duljine 4 m na razmaku od 1,5 m do 2 m uz instalaciju čelične mreže. Mlazni beton nanosi se u debljini od 50 mm do 100 mm u krovu i 30 mm u zidovima.

8. USPOREDNA PRIMJENA RMR I Q-KLASIFIKACIJE

U ovom poglavlju će biti predstavljeno nekoliko primjera iz prakse tijekom čije izvedbe su bile korištene *RMR* i *Q* – klasifikacija. Prikazat će se kako ljudski faktor tj. procjena pojedinca može uvelike utjecati na ishod bodovanja kod ovakvog načina klasifikacije stijenske mase, a ujedno će se usporedno razmotriti vrijednosti dobivene pojedinom klasifikacijom te odstupanja u odabiru podgrade prema teoretskim dijagramima i tablicama od stvarno odabrane podgrade u realnom projektantsko tehničkom rješenju.

8.1. Varijacije opažanja prilikom kartiranja stijenske mase kod bušenja tunela

Empirijske metode se često koriste prilikom projektiranja podgrade podzemnih prostorija zajedno sa klasifikacijom stijenske mase nekim od klasifikacijskih sistema. Mnogi parametri korišteni u takvim klasifikacijskim sustavima su slični, stoga, primjenjivost tih različitih metoda sa sličnim parametrima je često bila tema raznih strukovnih rasprava tijekom godina. Na Norveškom fakultetu znanosti i tehnologije (NTNU) 2003. godine u sklopu izgradnje jednog tunela je izvršena usporedna primjena dviju najzastupljenijih metoda klasificiranja stijenske mase u svrhu izrade primarne podgrade; *Q* – klasifikacije i *RMR* klasifikacije. Sudjelovalo je četiri inženjera i voditelj profesor Björn Nilsen s odjela za geologiju i mineralne sirovine s NTNU-a. Svaki inženjer koji je sudjelovao je neovisno odradio terensku klasifikaciju stijenske mase, a kasnije su rezultati objedinjeni u laboratorijskim istraživanjima kako bi se dobila usporedba i eventualne razlike procjena pojedinih parametara kod svakog opažača (inženjera). No, treba napomenuti kako obje metode (*RMR* i *Q* – klasifikacija) sadrže veliku količinu parametara koje treba zabilježiti, stoga su se u ovom istraživanju koristili parametri koji su imali najznačajne varijacije od opažača do opažača. (Nilsen et. al. 2003.)

Primarna podgrada tunela je prema procjenama bila 6 km dužine i 8,5 m širine. Stijenske jedinice na mjestu promatranja su bile većinom magmatskog podrijetla; granodioriti i vulkanski tufovi. Istočno mjesto proučavanja (Trolla) je bilo sa svježim stijenama do srednje istrošenim s manjom do srednjom količinom diskontinuiteta, dok je na zapadnom mjestu proučavanja (Folafoten) bilo svježije i blokovite stijenske mase. S Folafoten područja, koje se sastojalo od zelenih škriljavaca s povremenom pojavom jastučaste lave, te s Trolla područja

koje se sastojalo primarno od granodiorita, uzeta su dva stijenska uzorka, sa svakog područja po jedan, za laboratorijsko istraživanje jednoosne tlačne čvrstoće intaktnog materijala. Iz tih uzoraka testirale su se tri jezgre promjera 32 mm i duljine 80 mm, a dobiveni rezultati su prikazani u tablici 8-1. (Nilsen et. al. 2003.)

Tablica 8-1. Prikaz rezultata ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće na uzorcima granodiorita i zelenog škriljavca (Nilsen, et. al., 2003.).

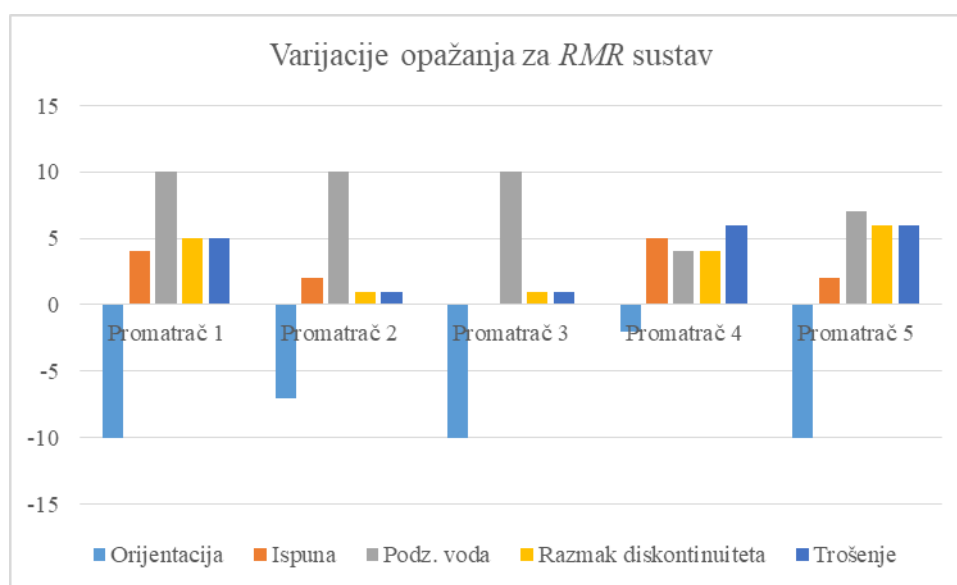
| Lab. metoda ispitivanja | Trolla – granodioriti | Folafoten – zeleni škriljavci |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Jednoosna tlačna čvrstoća | 74 MPa | 87 MPa |

Ocjena terenskih parametara provedena je korelacijom terenskih uvjeta s odgovarajućim opisima danim u tablici za pojedinu metodu (*RMR* ili *Q* tablici). Reprerentativnost se određuje tako da se gleda koliko se blisko stanje terena može predstaviti pomoću opisa nekog parametara. Za svaki parametar dodjeljuje se brojčana ocjena ovisno o metodi. Kada stanje terena najbolje odgovara opisu parametra, procjena parametara biti će prikladna pa se stoga slične vrijednosti ocjenjivanja mogu dobiti za isti parametar od strane različitih promatrača tzv. "ponovljivost rezultata". Inače će postojati varijacije u pojedinim ocjenama vrijednosti parametara. Pravilna reprerentativnost i ponovljivost vrijednosti parametara opravdavaju primjenjivost odgovarajuće empirijske metode. (Nilsen et. al. 2003.)

8.1.1. Rezultati za *RMR* klasifikaciju

Od deset parametara, pet je pokazalo varijaciju. To su razmak pukotina, ispuna diskontinuiteta, trošnost stijenki diskontinuiteta, uvjeti podzemne vode i orijentacija pukotina (Slika 8-1.) Dva su pokazala dobru ponovljivost, a to su *RQD* i hrapavost diskontinuiteta. Parametar podzemne vode sastoji se od predviđanja stanja podzemnih voda, ovisno o promjenama tijekom promatranja. Iako nije bilo strujanja vode u promatranom Folafoten stijenskom ležištu, predviđanje stanja stijene za planirani tunel variralo je od potpunog suhog do kapanja, dajući značajne varijacije u vrijednostima procjena. Zbog klorita u zelenom škriljavcu, neki promatrači su procijenili kako se ne očekuje voda tijekom gradnje tunela. Međutim, neki su procijenili obrnuto, zbog zamjetne količine diskontinuiteta (pukotina). Niti jedna posebna preporuka nije korištena za kvantificiranje vrijednosti

ocjenjivanja za orijentaciju. Razmak pukotina, ispuna i trošnost diskontinuiteta također su bili promjenjivi u kratkom razmaku u svim smjerovima. Tako su svi promatrači procijenili drugačije stanje, a od tuda i varijacije u vrijednostima. Parametar hrapavosti diskontinuiteta sastoji se od proučavanja hrapavosti površine diskontinuiteta. Svih pet promatrača ocijenilo je taj parametar s ocjenom vrijednosti jedan (1) za zeleni škrljavac, budući da se njegovo terensko stanje poistovjećuje sa glatkom do skliskom površinom. No, vrednovanje istog parametara za slučaj granodiorita ima razna tumačenja. Slična, dobra ponovljivost, kao za hrapavost zelenog škrljavca, uočena je i pri određivanju *RQD* vrijednosti s opsegom veličina do 20 za granodiorit jer je imao manje pukotina po metru. (Nilsen et. al. 2003)



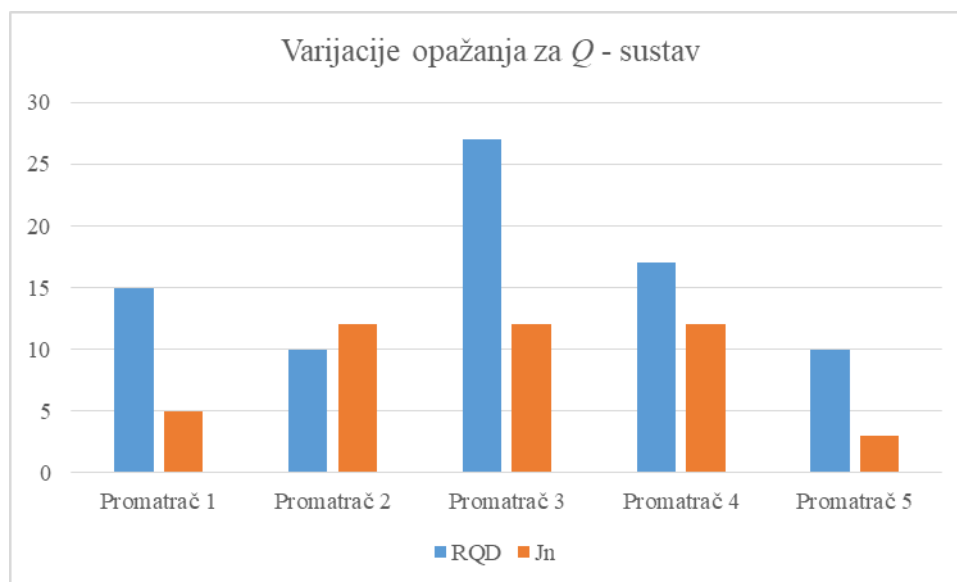
Slika 8-1 Prikaz varijacija rezultata ovisno o promatraču, prilikom *RMR* klasifikacije (Nilsen, et. al., 2003.)

8.1.2. Rezultati za *Q* – klasifikaciju

Od šest parametara, *RQD* i J_n , pokazuju značajne varijacije (Slika 8-2.), a J_f pokazuje dobru ponovljivost u vrijednostima. Zanimljiv je primijetiti da prilikom određivanja *RQD* i J_n , razlika u načinu varijacije ovisi o vrsti stijenske mase. Vrijednosti za ova dva parametra značajno variraju za zeleni škrljavac koji je više ispucao nego stijena granodiorita. *RQD* vrijednost izračunata je iz broja pukotina (J_v) po metru kubnom (m^3) korištenjem sljedećeg izraza (Palmstrom, 1982.):

$$RQD = 115 - 3,3 \cdot J_v \quad (8-1)$$

Kako je stijena s Folafoten područja manje raspucala, bilo je varijacija među promatračima u određivanju relevantnog broja pukotina po m³. Sličan je razlog prevladao u definiranju stvarnih i slučajnih skupova pukotina za J_n vrijednosti. Svi promatrači su se složili oko vrijednosti indeksa hrapavosti pukotina (J_r), te ga ocijenili s jedan (1) što predstavlja, glatke i ravne pukotine. (Nilsen et. al., 2003.)



Slika 8-2. Prikaz varijacija rezultata ovisno o promatraču prilikom Q – klasifikacije (Nilsen, et. al., 2003.)

8.1.3. Usporedba rezultata

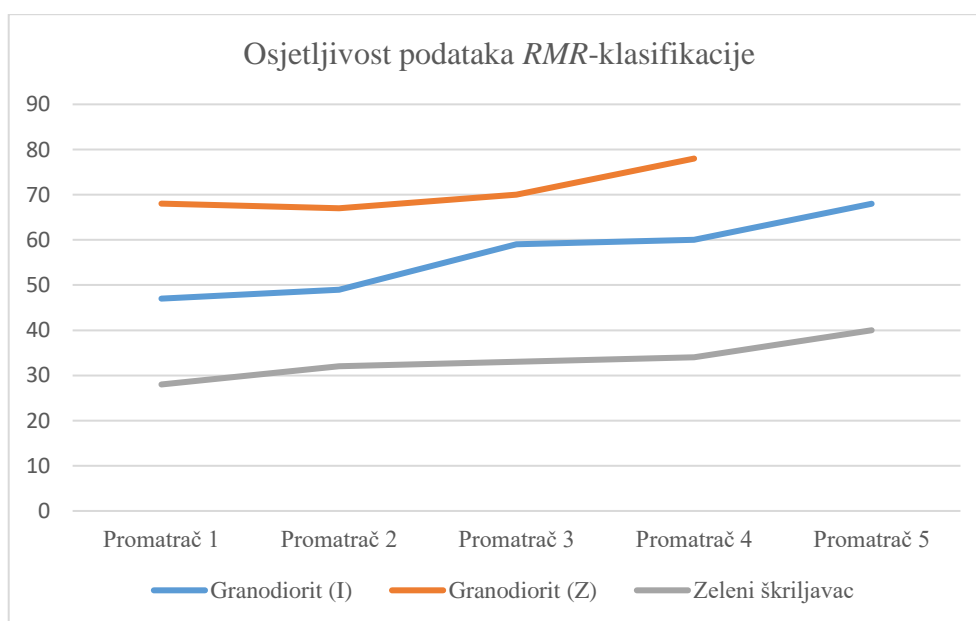
Pregledom dobivenih podataka terenskih parametara, rezultata laboratorijskih istraživanja, vrijednosti klasifikacijskih sustava i predviđene podgrade dovode nas do rasprave o praktičnosti procjene terenskih parametara, varijacijama u vrijednostima parametara i usporedbi vrijednosti pojedine klasifikacije stijenske mase i količini procijenjene podgrade. Prilikom korištenja obje metode, svih pet sudionika imalo je poteškoća pri korelaciji i opisu nekoliko terenskih parametara. Stoga je došlo do varijacije u vrijednosti kod nekih parametara zbog varijacije u procjeni određenih vrijednosti na terenu kod pojedinog promatrača. No, gledajući sveukupno, svi oni su iskusili sličan stupanj lakoće prilikom procjene terenskih parametara tijekom korištenja obje metode. Da bi se usporedile vrijednosti klasifikacijskih metoda stijenske mase, za svaku metodu je izrađen grafikon s pripadajućim vrijednostima. Analizom grafikona primjećuje se da je *RMR* klasifikacija

manje osjetljiva na varijaciju vrijednosti parametara. Izuzev zelenog škriljavca, sveukupna *RMR* ocjena stavlja sve vrste stijena u približno istu kategoriju kao što je prikazano u tablici 8-2. (Nilsen et. al., 2003.)

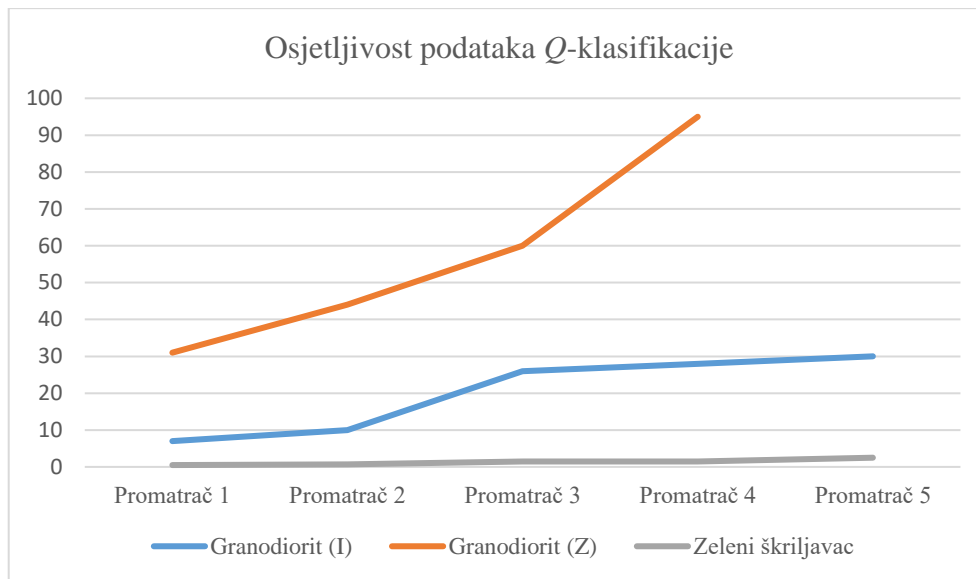
Tablica 8-2. Kategorična klasifikacija stijenske mase (Nilsen, et. al., 2003.).

| Vrijednosti | Granodiorit (Istok) | | Granodiorit (Zapad) | | Zeleni škriljavac | |
|-------------------|---------------------|-------|---------------------|-------|-------------------|-------|
| | Min. | Maks. | Min. | Maks. | Min. | Maks. |
| <i>RMR</i> metoda | 45 | 67 | 65 | 77 | 27 | 40 |
| Kategorija | povoljna do dobra | | dobra | | loša | |
| <i>Q</i> – metoda | 5,1 | 30,4 | 32,7 | 95 | 0,2 | 2,5 |
| Kategorija | povoljna do dobra | | dobra do vrlo dobra | | jako loša do loša | |

Uočeno je da je *Q* – sustav osjetljiviji na varijaciju vrijednosti parametara. Varijacije u vrijednostima parametara mijenjaju *Q* – indeks dovoljno da premjestiti sve tipove stijene iz jedne klase u drugu, čak i sa dna jedne klase do vrha sljedeće klase višeg razreda ili obrnuto (tablica 8-2). Klasifikacijska vrijednost stijenske mase je funkcija mnogih parametara. Međutim, može se vidjeti u oba grafikona (slika 8-3. i 8-4.) da varijacija u klasifikacijskim vrijednostima ipak nije toliko velika za prelazak bilo koje krivulje preko susjedne, odnosno nemaju sjecišta. (Nilsen et. al., 2003.)



Slika 8-3. Osjetljivost podataka *RMR* metode (Nilsen, et. al., 2003.)



Slika 8-4. Osjetljivost podataka Q – metode (Nilsen, et. al., 2003.)

Obje su metode kvalitativno slične. Većina sudionika osjećala se uvjerljive i pouzdanije prilikom korištenja RMR klasifikacijskog sustava, jer on uzima u obzir parametar stijenske čvrstoće. Usporedbom predviđenih podgradnih sistema određenih različitim metodama (tablica 8-3.) pokazuje da se količina i način podgrade međusobno ne razlikuje mnogo. Naposljetku, uzimajući u obzir sve navedeno, svi sudionici su se složili da su ipak Q – sustav i njegov grafikon najprikladniji za predviđanje podgrade tunela. (Nilsen et. al., 2003.)

Tablica 8-3. Procjenjeni načini podgrade temeljem dobivenih rezultata. (Nilsen et. al., 2003.).

| Metoda | Granodiorit (Istok) | Granodiorit (Zapad) | Zeleni škriljavac |
|-------------------|--|-------------------------------------|--|
| <i>RMR</i> metoda | Sidra i mlazni beton | Djelomično sidrenje i mlazni beton | Sistematično sidrenje i mlazni beton |
| Q – metoda | Sistematično sidrenje, mlazni beton i mjestimično sidrenje | Mjestimično sidrenje i mlazni beton | Mikroarmirani mlazni beton i sistematično sidrenje |

8.2. Recenzirani radovi podzemnih projekata izvedeni u sličnim geotehničkim uvjetima

Kako bi se u što većoj mjeri minimalizirao utjecaj geoloških i regulatornih uvjeta pojedinih regija na ocjenjivanje kvalitete stijenske mase, a prema tome neposredno i na izbor podgrade ili armiranja stijene, za prikaz su uzeti samo dobro dokumentirani primjeri na području Sydneyja, Australija. (Janković et. al., 2008.)

8.2.1. Podzemna garaža opere u Sydney

Projekt i izvedbu ove krafno-like podzemne prostorije raspona 18 m opisali su Pells i dr. 1995. (Pells et. al., 1994). Nadsloj prostorije obuhvaćao je 6-8 m pješčenjaka klasificiranog *RMR* i *Q* – sustavom na sljedeći način:

- *Q*= 20 – 60 (projektom usvojena vrijednost je 50), *ESR*=0,8,
- *RMR*= 60 – 55 (projektom usvojena vrijednost je 65).

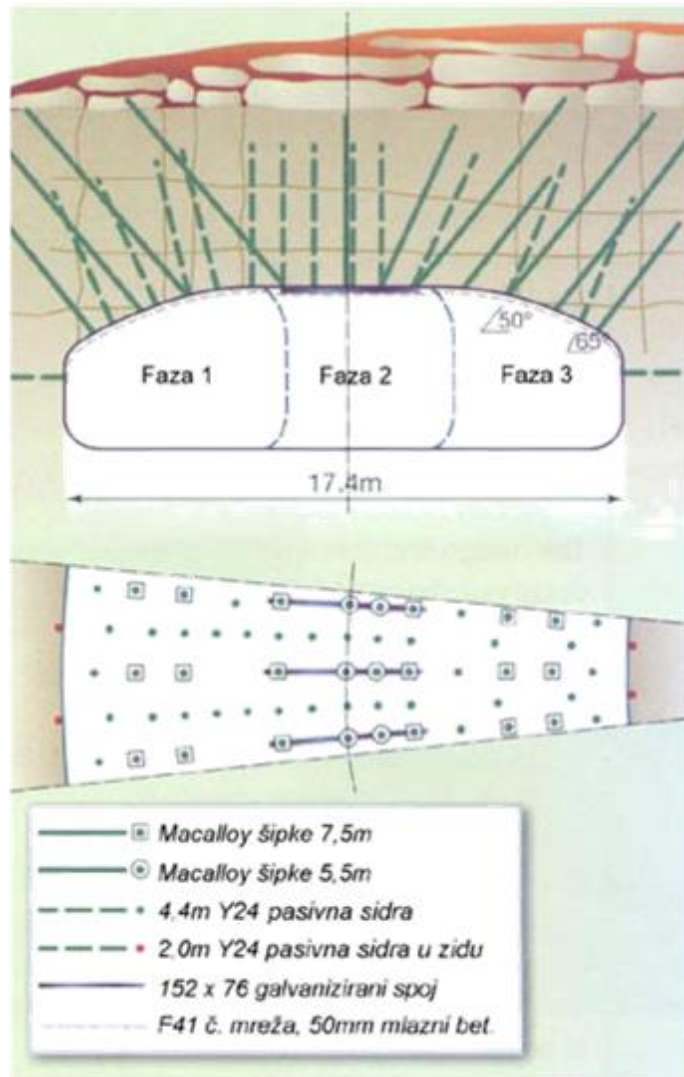
Preporučena podgrada prema pojedinom sustavu dana je u tablici 8-4.

Tablica 8-4. Podgradni sklop prema kategorizacijskim sustavima za 18 metarski raspon podzemne garaže opere u Sydneyju. (Janković et. al., 2008.).

| Sustav | Bodovi | Predviđena podgrada |
|------------|--------|---|
| <i>RMR</i> | 65 | sidra (d=3 m) na razmaku 2,5 m s mjestimično postavljenim čeličnim mrežama i 50 mm mlaznog betona |
| <i>Q</i> | 50 | Sidra (d=6 m) na oko 3 m razmaka, bez mlaznog betona |

Postavljena podgrada prikazana je na slici 8.5. Sastoji se od 4,4 m dugačkih adhezijskih pasivnih sidara (230 kN) i 7,5 mdugačkih adhezijskih štapnih aktivnih sidara (450 kN) međusobno razmaknutih 1,3 m, plus čelična mreža i 150 mm mlaznog betona. Projekt se zasnivao na eksplicitnoj strukturnoj analizi. (Janković et. al., 2008.)

Uspoređujući tu podgradu s preporučenom iz tablice 8-4. sugerira se da su ili projektanti podzemne garaže bili vrlo konzervativni (što nije bilo mišljenje revizora) ili su predviđanja temeljena samo na kategorizacijskim sustavima bila opasna. (Janković et. al., 2008.)



Slika 8.5. Stabilizacija svoda Sydney opera podzemne garaže (Janković et. al., 2008.).

Podaci dobiveni monitoringom bili su u skladu s projektantskim očekivanjima, što dokazuje da je ponstrukcija podgrade bila ispravna ili pak s malim pomakom na stranu veće sigurnosti. (Janković et. al., 2008.)

8.2.2. Naplatni tunel – Norfolk tunel

Ovaj projekt obuhvaća dvije dvotračne tunelske cijevi širine 11,9 m, s međusobnim razmakom od 5,5 m. Debljina nadsloja varira između 16 m – 22 m i uglavnom se sastoji od pješčenjaka vrlo dobre kvalitete uz pojave 1,0 m – 1,5 m slojeva pješčenjaka slabije kvalitete. Q – vrijednosti u svodu su se kretale od 20 – 45, a RMR vrijednosti od 55 – 75. Korištenjem

ovih vrijednosti kategorizacijski sustavi daju sljedeću preporuku za konstrukciju podgrade prikazanu u tablici 8-5. (Janković et. al., 2008.)

Tablica 8-5. Podgradni sklop prema kategorizacijskim sustavima za tunel Norfolk (Janković et. al., 2008.).

| Sustav | Bodovi | Predviđena podgrada |
|------------|---------|---|
| <i>RMR</i> | 55 – 75 | Sidra dužine 3m do 4 m s razmakom od 1,5 m do 2 m i 50 – 100 mm debljine mlaznog betona |
| <i>Q</i> | 20 – 45 | Sidra dužine 4m s razmakom od 2,5 m i mjestimično sidra dužine 4 m, bez mlaznog betona ili po potrebi |

Ugrađena podgrada je varirala od sistematskog sidrenja sa sidrima dužine 4 m na 1,7 m razmaka plus 110 mm mikroarmiranog mlaznog betona do sistematskog sidrenja na 2,4 m razmaka i 50 mm mikroarmiranog mlaznog betona. Dakle u ovom slučaju je *Q* klasifikacija "podbacila" i predviđela vrijednosti koje su znatno niže od stvarnih. (Janković et. al., 2008.)

8.2.3. Istočni tunel M5

Ovaj naplatni tunelski sustav sastoji se od dvije, 4 km dugačke, dvotračne cijevi raspona 8,6 m. U potpunosti je probijen kroz pješčenjake. Nadsloj je uzduž gotovo cjelokupne dužine tunela debljine između 15 m do oko 70 m. Tunelska podgrada konstruirana je kombinacijom analitičke i empirijske metode i obuhvaća; 3 m dugačka sidra nosivosti 200 kN i mlazni beton 50 mm debljine do 100 mm debljine. Podgradni sklopovi su konstruirani za 3 tipa stijene s *Q* – vrijednostima kako slijedi (Janković et. al., 2008.):

- tip 1: $Q=4,7 - 75$ (47% tunela),
- tip 2: $Q= 0,9 - 17,5$ (50 % tunela) i
- tip 3: Rasjedi i žile (3% tunela).

U ovom slučaju *Q* – sustav sugerira dužinu sidra od 2,8 m za tipove 1 i 2, što je u osnovi isto kao i ugrađena 3 m dugačka sidra. Razlike između ugrađene i *Q* – sustavom predviđene podgrade bile su u broju sidara i količini mlaznog betona kako je prikazano u tablici 8-6. (Janković et. al., 2008.)

Tablica 8-6. Usporedni podaci o podgradi – Tunel M5 (Janković et. al., 2008.).

| Naziv | Q predviđena količina | Stvarno ugrađena količina | Stvarno / predviđeno |
|--------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|
| Sidra | 12300 | 14000 | 1,14 |
| Mlazni beton | 2400 m ³ | 5850 m ³ | 2,44 |

Bitno je napomenuti da je čak i sa ovako ugrađenom podgradom dolazilo do sporadičnih ispadanja manjih komada stijenske mase iz svoda od kojih je jedan ozlijedio osobu. (Janković et. al., 2008.)

8.3. Valjanost koeficijenata pri klasificiranju stijenske mase

U posljednjih nekoliko desetaka godina objavljeno je dosta radova o nedostacima kategorizacijskih sustava. Neki od njih su: Palmstrom, Broch, 2006.; Russo i dr., 1998.; Milne i dr., 1998.; Riedmüller, Schubert, 1999.; Hoek, 2002.; Stille, Palmstrom, 2003.; Pells, Bertuzzi, 2007. No, dvojica autora (Palmstrom, Broch, 2006.) detaljno su obrazložili neke nedostatke Q – sustava koji su u višoj ili manjoj mjeri prisutni i u ostalim sustavima kategorizacije, koje, obzirom na koncepte i strukture, možemo svrstati u empirijske projektne metode (RMR , RMi i sl.). (Janković et. al., 2008.)

Kvantitativni koeficijenti koji se koriste za opis svojstava stijenske mase često nisu u dosljednoj korelaciji sa svojstvom kojeg opisuju. To možemo vidjeti na primjeru dvaju kvocijenata u Bartonovoj jednadžbi (3-1) za ocjenjivanje stijenske mase. Prvi kvocijent čine dva koeficijenta, jedan karakterizira stupanj razlomljenosti stijenske mase (RQD), a drugi broj familija diskontinuiteta koji se javlja na predmetnoj lokaciji (J_n). (Janković et. al., 2008.)

Prema definiciji, RQD je postotak komada jezgara bušotine dužih od 10 cm (Deere, 1963.). Mjerenje RQD je jednostavno i brzo, jer obuhvaća samo komade jezgre duže od 10 cm, pa je zato često jedina metoda koja se koristi za karakterizaciju veličine bloka. To može biti nedostatak, jer orijentacija diskontinuiteta u odnosu na os jezgrovanja utječe na mjerenje. Broj familija diskontinuiteta (J_n) nije nužno pouzdan indikator razlomljenosti stijenske mase, budući da je lako zamisliti situaciju u kojoj jako razlomljena stijenska masa sadrži samo nekoliko familija diskontinuiteta, a osim toga J_n uvelike ovisi i o iskustvu opažača. U posljednje vrijeme preporuča se da se diskontinuiteti koji su posljedica miniranja također kartiraju i uključe u J_n kao nasumične pukotine. Imajući ovo u vidu, nije neočekivano da se

prvi kvocijent u Bartonovoj jednadžbi (3-1) koja ocjenjuje kvalitetu stijenske mase sve manje smatra očitom mjerom veličine bloka. Treći koeficijent (J_w/SRF) najbolje je razmotriti preko njegovog utjecaja na izbor sugerirane podgrade prema (Grimstad, Barton, 1993.) u tablici 8-7.. (Janković et. al., 2008.)

Tablica 8-7. Utjecaj podzemne vode na podgradu 10 m širokog tunela (suhi uvjeti, $Q=4$, ESR=1).

| Stanje obzirom na podzemnu vodu | Q – vrijednost | Razmak sidara | Debljina mlaznog betona | Komentar |
|---|------------------|-----------------|-------------------------|--|
| $J_w=1$; suha stijena ili minamalan dotok | 4 | 2,1 m × 2,1 m | 45 mm | / |
| $J_w=0,3$; veliki dotok ili veliki pritisak, znatno ispiranje ispune diskontinuiteta | 1,2 | 1,75 m × 1,75 m | 70 mm | Nemoguće nanošenje mlaznog betona u uvjetima velikog i iznimno velikog dotoka vode |
| $J_w=0,1$; izuetno obilan dotok ili pritisak vode prilikom miniranja | 0,4 | 1,5 m × 1,5 m | 100 mm | Nemoguće nanošenje mlaznog betona u uvjetima velikog i iznimno velikog dotoka vode |

Kako je vidljivo iz tablice 8-7., neke od mjera za stabilizaciju podzemnog iskopa nemoguće je primijeniti u uvjetima koji bi odgovarali većim dotocima ili pritisku podzemne vode. Ne ulazeći u rasprave o značenju posljednjeg kvocijenta u Bartonovom obrascu (3-1), može se reći da je on u obrascu (3-1) korišten kao svojevrsan alat za "fino podešavanje" Q – sustava, a manje ima praktično značenje (Janković et. al., 2008.)

8.4. Osvrt na prezentirane projektne radove i zapažanja

Iz ispred prezentiranih primjera podzemnih iskopa u sličnim geotehničkim uvjetima može se zaključiti da Q – sustav prognozira slabiju podgradu za podzemne iskope u pješčenjacima nego što se ispostavilo da je nužno u praksi. U prosjeku kod četiri od sedam analiziranih projekata u Sydneju, konstrukcija podgrade od startanja projekata bila je znatno masivnija, nego što je Q – sustavom predviđeno. U prva dva analizirana slučaja nije došlo do sloma podgrade tako da nije moguće znati je li ugrađena podgrade, konstruirana korištenjem principa primijenjene mehanike, možda prekonzervativna. (Janković et. al., 2008.)

Međutim, u trećem slučaju (Istočni tunel M5) ugrađena podgrade je odgovarala smjernicama Q – sustava, ali dolazilo je do popuštanja podgrade i trebalo je značajno povećati njenu nosivost. Možda je ovdje potrebno ponoviti ono što je naglasio jedan od tvoraca danas uobičajenih sustava kategorizacije u inženjerskoj praksi, a to je da su sustavi kategorizacije pomoć pri planiranju (Bieniawski, 1988.), što sugerira da ne treba očekivati da pomoću njih možemo odrediti konačan raspored, točne količine, a u nekim slučajevima i vrste podgradnih elemenata koje smo planirali na početku. (Janković et. al., 2008.)

Također, nekoliko modela ponašanja stijene/tla nije obuhvaćeno niti jednim kategorizacijskim sustavom. To su bujanje, konvergencija i istakanje tla. Stoga ih je najbolje koristiti, kako sugeriraju čak i autori nekih sustava, za onaj tip stijenske mase gdje daju najbolje rezultate, a to su obično stijene srednjeg stupnja razlomljenosti. Izbor podgrade koju sugeriraju kategorizacijski sustavi temelji se na statistici koja varira od zemlje do zemlje. To je značajan problem kada se iskustva sa različitih područja koriste za kalibraciju preporuka podgrađivanja u sustavima kategorizacije. (Janković et. al., 2008.).

9. METODE TUNELIRANJA

U konačnici ću ukratko spomenuti metode tuneliranja koje su se razvile iz Q – klasifikacije i RMR klasifikacije tzv. Norveška Metoda Tuneliranja odnosno NMT metoda (Barton et. al. 1992) te Nova Austrijska Tunelska Metoda tj skraćeno $NATM$ (Rabcewicz, Müller, Pacher; 1978). Potrebno je naglasiti da je kod obje metode osnovni strukturni materijal tunelske građevine sama stijenska masa ili tlo, te tuneli izvedeni u skladu s $NATM$ i NMT spadaju u geotehničke konstrukcije. $NATM$ i NMT su temeljene na geomehanici, a nepoznavanje i nepriznavanje ove osnovne činjenice uzrokom je, kako u prošlosti tako i danas, brojnih nedorazuma i neuspjeha u tunelogradnji. U ovom poglavlju će biti obrađene svaka od tih metoda posebno te usporedno, ističući neke njihove razlike tj. prednosti i mane.

9.1. Norveška metoda tuneliranja (NMT)

Osnovne značajke NMT metode dane su u tablici 9-1. Prema navedenim osobinama upotreba NMT je primjerena u čvrstim stijenama gdje dominira ispucalost i prekoprofilni iskop i gdje su uobičajene metode iskopa bušenje i miniranje ili strojni iskop krticama za čvrstu stijenu.

Podgradni se sklopovi određuju na osnovi rezultata inženjersko-geološkog kartiranja, upotrebom Q – klasifikacijskog sustava modificiranog za primjenu podgrada od mikroarmiranog mlaznog betona. Kod značajnijih iskopa ili na projektima, gdje investitor to zahtijeva, obavlja se provjera preporuka Q – sustava glede sidrenja, numeričkim modelom. Radi nepravilne površine iskopa, za podgrađivanje se uglavnom koristi sidrenje i mikroarmirani mlazni beton, te u uvjetima vrlo loše stijenske mase rebrastim čelikom, armirana rebra od mlaznog betona. Privremena podgrada je dio trajne podgrade, koju određuje raspon i namjena tunela. Upotrebljava se mokri postupak nanošenja mikroarmiranog mlaznog betona što omogućuje učinke od $10 \text{ m}^3/\text{h}$ do $25 \text{ m}^3/\text{h}$, odskok od 5 % do 10 %, te sigurnije i bolje radne uvjete.

Tablica 9-1. Osnovne značajke NMT metode (Barton i Grimstad, 1993.).

| | |
|--|---|
| Područje uobičajene primjene | Ispucala stijenska masa, jednoaksijalne čvrstoće stijenskog materijala $\sigma = 3 \text{ MPa}$ do 300 MPa , zone s glinom i slučajevi pločastog odlamanja uslijed naprezanja $Q=0,001$ do 10 |
| Uobičajene metode iskopa | Bušenje i miniranje, <i>TBM</i> , strojno iskopavanje u područjima s glinovitim primjesama |
| Izvedbe privremene podgrade i trajne podgrade tunela | Lijevani betonski lukovi, mikroarmirani mlazni beton, lukovi od armiranog mlaznog betona, sistematsko sidrenje, sistematsko sidrenje i mikroarmirani mlazni beton, sistematsko sidrenje i mlazni beton, mikroarmirani mlazni beton, mlazni beton, sistematsko sidrenje, pojedinačno sidrenje i bez podgrade |
| Karakterizacija stijenske mase | Predviđanje kvalitete stijenske mase, predviđanje potrebne podgrade, monitoring i kontrola predviđenih stijenskih kvaliteta te određenih podgrada |
| Prednosti | Niski troškovi, brz napredak (osobito metodom bušenja i miniranja), povećana sigurnost, poboljšanje uvjeta na radilištu u tunelu |

Norveški sustav ugovaranja tunela, *NoTCoS* (engl. *Norwegian Tunnelling Contract System*), je bitna karakteristika *NMT*. Sustav je temeljen na podjeli rizika, te dobroj suradnji investitora, izvođača i konzultanta što rezultira smanjenjem troškova projekta.

9.2. Nova Austrijska tunelska metoda (*NATM*)

Metoda je temeljena na do tada akumuliranim spoznajama mehanike stijena, te je predstavljala prekretnicu u tunelogradnji. *NATM* je tehnologiju izvođenja nastojala uskladiti s procesima koji u okolnom mediju nastaju tijekom gradnje tunela, kako bi maksimalno mogućom eksploatacijom prirodnog fenomena aktiviranja funkcije nosivosti medija postigla optimum sigurnosti i ekonomičnosti pri gradnji tunela. Predstavlja metodu kod koje je okolna geološka formacija uključena u podgradnu strukturu prstenastog oblika, što pojednostavljeno znači da sama stijena postaje dio podgradne konstrukcije. Dotadašnji načini gradnje tunela (npr. stara austrijska ili belgijska metoda) bili su prikazani shemom

iskopa i podgrađivanja tunela. *NATM* nije mogla biti opisana na takav način, jer nije bila vezana ni na kakvu shemu napredovanja, već na pridržavanje principa koji su proizlazili iz zakonitosti reakcije masiva na tehnički zahvat, što je u različitim materijalima i za različite odnose naprezanja u masivu rezultiralo različitim formama izvođenja. Nepostojanje određene sheme napredovanja, uz nepoznavanje geomehanike, dovelo je do kaosa u primjeni i tumačenju *NATM*. U pokušaju rješavanja nastalog stanja, te kao zamjenu za nepostojeću shemu napredovanja, Müller je 1978.g. postavio 22 temeljna principa *NATM* koji zbog njihove opsežnosti neće biti navedeni u radu. Bitno je naglasiti da su prema Müller-u navedeni principi univerzalni tj. vrijede za sve medije i pripadna stanja naprezanja u kojima je moguća primjena *NATM*.

S geomehanikom je *NATM* u tunelogradnju uvela i pristupe koji su karakteristični samo za rješavanje geotehničkih konstrukcija, kao što su empirijski i opažачki pristup:

- empirijski pristup je potaknuo daljnji razvoj klasifikacija stijenskih masa u tunelogradnji.
- opažачki pristup čiju osnovu čine opažanja i mjerenja, u slabijim je stijenskim masama i tlima integralni dio *NATM*-a te praćenjem procesa u geotehničkoj konstrukciji tijekom i nakon izvedbe omogućuje niže faktore sigurnosti.

Činjenica je da je *NATM* nastala na do tada akumuliranim spoznajama mehanike stijena, te da su se podgradni elementi koje koristi *NATM* (mlazni beton, sidra, armaturne mreže, čelični i rešetkasti lukovi) i prije koristili u tunelogradnji, no tzv. *Salzburgški krug* (Rabcewicz, Müller, Pacher) je uvođenjem geomehanike i opažачkog pristupa (opažanja i mjerenja) uz primjenu postojeće tehnologije, tj. spajanjem teorije i prakse u tunelogradnji potaknuo njen daljnji razvoj usko vezan za razvoj teorije i prakse mehanike tla i stijena i razvoj tehnologije iz čega slijede ova četiri načela *NATM*-a:

1. Zadržati čvrstoću stijene:

Izbjeći nepoželjno oslabljivanje (razrahljivanje) stijene pažljivim iskopom i trenutnom primjenom podgrade i očvršćivanja.

2. Zaobljeni oblici presjeka:

Izbjegavati koncentracije naprezanja u kutovima u kojima počinje progresivni lom

3. Popustljiva tanka podgrada:

Primarna podgrada treba biti fleksibilna da bi se smanjilo momente savijanja i da bi se olakšao proces preraspodjele naprezanja, a da se podgrada ne izvrgava nepovoljnim unutrašnjim silama. Potrebu dodatnog podgrađivanja ne treba ostvarivati

podebljavanjem podgrade nego sidrenjem. Podgrada mora biti u potpunom kontaktu sa vidljivom stijenom.

4. Mjerenja in-situ:

Opažanje tunela za vrijeme gradnje je integralni dio *NATM*-a. Praćenjem i interpretacijom deformacija i naprezanja može se optimizirati radne postupke i potrebe podgrađivanja. Koncept *NATM*-a je kontrola deformacija odnosno procesa preraspodjele naprezanja da bi se zajamčio traženi stupanj sigurnosti.

Unatoč određenih kritika koje prate *NATM*, ova metoda osvojila je svijet jer je fleksibilna i može se primjenjivati u brojnim situacijama, zbog čega je postala rasprostranjena diljem svijeta. Pa tako većina tunela u svijetu (a i u Hrvatskoj) u novije vrijeme je izvedena u skladu s principima *NATM*.

9.3. Razlike i sličnosti NMT i NATM-a

U tablici 9-2. prikazana je usporedba između *NATM* i *NMT* metode. Potrebno je istaknuti sljedeće: navedene razlike između *NATM* i *NMT* su nebitne ili djelomično netočne i u svakom slučaju zanemarive u odnosu na sličnosti. Obje metode su temeljne na mehanici stijena, odnosno geomehničkom konceptu ili pristupu projektiranju tunela. Nastoje očuvati i mobilizirati čvrstoću okolne stijenske mase ili tla, a primarna uloga podgradnih sklopova je da pomognu prirodnom fenomenu aktiviranja funkcije nosivosti medija. Izbor metode iskopa nije presudan za koncept tunelogradnje, a ovisi o karakteristikama materijala i ekonomičnosti. Na osnovi provedene analize može se zaključiti da *NATM* i *NMT* predstavljaju jedan te isti koncept tunelogradnje, a isticane razlike su posljedica primjene u različitim geološkim situacijama.

Tablica 9-2. Usporedba NMT i NATM metode (Unknown, n.d.)

| | NATM | NMT |
|-----------------------|--|--|
| Upotreba | Slabiji materijali | Ispucala stijenska masa |
| Iskop | Strojni | Bušenje i miniranje- prekopofilni iskop |
| Izbor podgrade | Privremena podgrada temeljena na klasifikaciji tla, konačno dimenzioniranje na osnovu mjerenja tijekom izvođenja | U projektu i tijekom izvođenja, na temelju Q – klasifikacije |
| Površina iskopa | Pravilna | Neppravilna |
| Mjere podgrađivanja | Čelične zavarene mreže i čelični ili rešetkasti lukovi u kombinaciji sa mlaznim betonom | Sistematsko sidrenje i mikroarmirani mlazni beton (<i>MAMB</i>) |
| Ostale karakteristike | Uobičajena izvedba podnožnog svoda, nepropusne izolacije, trajne betonske obloge | Betonska obloga se rijetko izvodi, trajna podgrade se uglavnom sastoji od <i>MAMB</i> -a i sidara |

10. ZAKLJUČAK

Projektiranje primarne podgrade u podzemlju se uobičajeno zasniva na geološkom kartiranju iskopa. Kada se proračuna, Q – indeks, daje dobar opis i klasifikaciju stijenske mase svrstanu u određene kategorije temeljem kojih se bira vrsta potrebne podgrade. Kao i svaka druga klasifikacija, tako i Q – klasifikacija i njen dijagram imaju određene mane pa nije moguće predvidjeti baš svaki detalj ili obuhvatiti pojedine specifične slučajeve na koje je moguće naići kod projektiranja. Zato je potrebno sve proračune i analize nadopuniti iskustvenim terenskim radom te prije projektiranja primarne podgrade neizbježno je detaljno razmotriti geometriju svakog pojedinog diskontinuiteta, definirati slabe zone u stijeni i njihovu orijentaciju s obzirom na os iskopa te im odrediti širinu i mineralni sastav kako bi proračunata Q – vrijednost bila što reprezentativnija, a mogućnost za pogrešku i urušavanje pojedinih blokova što manja.

Ograničenja prilikom primjene Q – klasifikacije stijenske mase se većinom svode na stijene slabije kvalitete. Može se reći kako se kroz povijest Q – klasifikacija samostalno najviše koristila u čvrstim stijenama prožetim diskontinuitetima uključujući par slabijih zona prožetih unutar čvrste cjeline i dobivali su se zadovoljavajući rezultati.

Što se tiče *RMR* klasifikacije, iz svega prethodno navedenog proizlazi da je osnovna prednost korištenja *RMR* klasifikacije na terenu relativno jednostavna primjena (uz dodatne laboratorijske analize). Kao i sve klasifikacije i *RMR* klasifikacija podložna je subjektivnosti onoga tko ju provodi pa joj je to ujedno i najveća mana, a uz to originalna geomehanička klasifikacija ne usvaja suvremene načine ojačanja stijenske mase. Uspješnost njene primjene stoga najviše ovisi o iskustvu inženjera koji je provodi, tj. njegove mogućnosti da adekvatno procjeni parametre bodovanja.

Praktičnost i dobra ponovljivost glavni su čimbenici koji opravdavaju primjenjivost ovih klasifikacijskih metoda. Metode opisane u ovom radu su slične u smislu praktičnosti procjene terenskih parametara, no, gledajući usporedno, neki parametri u obje metode imaju relativno visoku varijaciju vrijednosti prilikom ocjenjivanja od strane različitih promatrača. Negativni učinak tih varijacija može se svesti na najmanju moguću mjeru definiranjem određenog raspona vrijednosti, a ne opisivanjem izrazito samo jednom vrijednošću.

Prilikom usporednog proučavanja, zaključeno je da je Q – sustav osjetljiviji na varijacije vrijednosti parametara od *RMR* metode. Iako su kvantifikacijom određenih ulaznih parametara identificirane razlike, rezultirajuće vrijednosti pojedine klasifikacije stijenske

mase su slične, a zahtjevane podgrade tunela procijenjene pomoću obje metode su također slične kako u količini tako i u vrsti. U tom je slučaju Q podgradni grafikon odabran kao najprikladniji za izradu tunelske podgrade, ponajprije jer se smatra najjednostavnijim za uporabu, a temelji se samo na kartiranju terena i nije potrebno laboratorijsko testiranje kao kod RMR metode (osim u slučajevima s potencijalnim problemima naprezanja, gdje Q – sustav poput RMR -a zahtijeva ulazni podatak koji se tiče stijenske čvrstoće).

Glavni nedostatak sustava kategorizacije stijenske mase (Q , RMR i sl.) je taj što oni, u osnovi, nisu klasifikacije u pravom smislu. Prema svojim konceptima i strukturama, oni su empirijske metode projektiranja temeljene na karakterizaciji stijenske mase. Upotreba riječi klasifikacija je zato pogrešna. U brojnim slučajevima, pa i u ovima iznesenim u radu, bilo je neophodno adaptirati postojeći kategorizacijski sustav prema stvarnom stanju i problemu nađenom na terenu i korigirati postojeće sustave kategorizacije stijenske mase prema iskustvima stečenim u pojedinim projektima. To znači da je razvijena nadzirana kategorizacija "po mjeri", gdje je indeks kvalitete stijenske mase deriviran iz postojećih sustava kategorizacije indikator za izbor podgrade ili armiranja stijena. U mnogim slučajevima, indeks je korišten kao jedini indikator. To je stvorilo probleme u vrednovanju ugovorenog posla kada su izvođači iskopom naišli na nepredviđene geološke pojave, odnosno gdje sustav nije bio primjenjiv. Tipične geološke pojave koje nisu uzete u obzir su bujanje, konvergencija i istakanje tla. Niti jedan od proučavanih sustava kategorizacije nije kompetentan za asimilaciju drugih tipova informacija, kao, na primjer, rezultata mjerenja deformacija. Ovo je veliki nedostatak jer, posebno za složenije podzemne zahvate, obično se koristi više projektnih metoda čije se slaganje sa izvedenim stanjem prati tijekom iskopa/gradnje (npr. *NATM*).

Glavni zaključak ovog rada je, da je, unatoč osnovnim razlikama između dviju različitih metoda i nekih značajnih varijacija između pet različitih promatrača u procjeni pojedinih parametara, ipak je utvrđeno da su klasificirane stijenske mase i procjene podgrade vrlo slične, no s podosta odstupanja od onih upotrebljenih u praksi. Iako se ovim radom ne namjerava dati neka opća ocjena empirijskih sustava za klasifikaciju stijenske mase, ilustrira se da takvi sustavi predstavljaju korisne alate za karakterizaciju kvalitete stijenske mase u fazi planiranja dizajna podgrade za podzemne iskope. Međutim, kod nekoliko ulaznih parametara takvih sustava, kao što su J_w i SRF u Q – sustavu, često je teško odrediti vrijednost prilikom faze planiranja, zbog toga treba upozoriti kako korištenje takvih sustava kao jedinih alata prilikom projektiranja podgrade tunela nije sretno rješenje.

11. LITERATURA

Barton N.R. (1974): **A review of the shear strength of filled discontinuities in rock**. Norwegian Geotech. Inst. Publ. No. 105. Oslo: Norwegian Geotech. Inst.

Barton N.R. (2011): **Nonveiller lecture and Course of Rock Engineering for tunnels, Q-support**

Bieniawski, Z.T., (1973): **Engineering Classification of Jointed Rock Masses**, Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs, 15, pp. 335-344.

Bieniawski, Z.T., (1979): **The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications**, Proc. 4th Congr. Int. Soc. Rock. Mech., Montreux 2, pp. 41-48.

Bieniawski, Z.T., (1989): **Engineering Rock Mass Classification**, New York: John Wiley & Sons, 251 p.

Cummings, R., Kendorski, F., Bieniawski, Z.T., (1982): **Caving Rock Mass Classification and Support Estimation**, US Bureau of Mines Contract Report, #J0100103, Chicago: Engineers International Inc.

Deere, D.U., (1968): **Geological Considerations, Rock Mechanics in Engineering Practice**, Ed. R.G. Stagg and D.C. Zenkiewicz, New York, pp. 1-20.

Dugonjić Jovančević S., **Skripta Inženjerska mehanika stijena** (str. 76-82), Građevniski fakultet; Sveučilište u Rijeci

Hoek E. (2000): **Rock Engineering**, A course Notes, <http://www.rocscience.com>, 313 p.

Janković, B.; Mihalić, S.; Frgić L. (2008): **Neka ograničenja sustava kategorizacije stijenskih masa dio III**, Mineral; Časopis za područje rudarstva i graditeljstva. (1331-3797) 6 (2008); 22-25

Lauffer, H., (1958): **Gebirgsklassifizierung fur den Stollenbau**, Geol. Bauwesen 74, pp. 46-51.

Norwegian Geotech. Inst. (2015): **Using the Q-system, Rock mass classification and support design** (str 32-38, 40), Norway, Oslo; Ullevål Stadion 0806

Nilsen B.; Kanta Oanthi K.; Lal Shrestha G.; Hilde Holmoy K. (2003): **RMR vs Q vs RMI**, Article in Tunnels and Tunnelling International (May 2003)

Romana, M., (1993): **A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating**, In: J.A. Hudson ed. Comprehensive Rock Engineering, Vol. 3, Oxford: Pergamon Press, pp. 576-598.

Terzaghi, K., (1946): **Rock Defects and Loads on Tunnel Support**, In Rock Tunneling with Steel Supports, (Eds R.V. Proctor and T.L. White), 1, Youngstown, OH: Commercial Shearing and Stamping Company, pp. 17-99.

TEDESA - Técnicas de Entibación, S.A. Pol. de Silvota, Parcela nº10 - 33192 LLANERA-ASTURIAS – ESPAÑA (2013.)

URL: https://www.dfdurofelguera.com/catalogo_tedesas/obras_en.htm (2.9.2018.)

Unknown, (n.d.): **Predavanje 9., Podzemne građevine** (2009): Zavod za Geotehniku, Građevinski fakultet; Sveučilište u Zagrebu

URL:(https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/GI_9.predavanje_Tunelogradnja.pdf) (15.6.2018)

Unknown (n.d.): **Predavanje 13.,Tunelogradnja** (2009): Geotehničko inženjerstvo, Građevinski fakultet; Sveučilište u Zagrebu

URL:(https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/GI_13.predavanje_Tunelogradnja.pdf) (15.6.2018).

Vrkljan I. (2013): **Skripta Inženjerska mehanika stijena**, Građevinski fakultet, Rijeka.

Wickham, G.E., Tiedemann, H.R., Skinner, E.H., (1972): **Support Determination Based on Geological Predictions**, Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf., AIME, New York, pp. 43-64.