

4. Utvrđivanje geomehaničkih značajki stijenske mase

- Kategorizacija stijenske mase
- Procjena čvrstoće stijenske mase
- Procjena deformabilnosti stijenske mase
- Formiranje geotehničkog modela



Geomehanička klasifikacija ili RMR (Rock Mass Rating)

- Bieniawski (1973, ...) je razvio klasifikaciju na temelju bodovanja šest karakterističnih veličina kojima se pridružuju različite numeričke vrijednosti
- Veličine koje se ocjenjuju:
 - Jednoosna tlačna čvrstoća intaktnog materijala
 - RQD – indeks kvalitete jezgre
 - Razmak diskontinuiteta
 - Stanje diskontinuiteta
 - Stanje podzemne vode
 - Orijentacija diskontinuiteta

Veličine RMR klasifikacije

A KLASIFIKACIJSKE VELIČINE I NJIHOVE OCJENE VRIJEDNOSTI									
Veličina		Raspon vrijednosti							
1	Čvrstoća intaktnog materijala	PLI indeks čvrstoće Jednoosna tlačna čvrstoća	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Preporuča se jednodavno isplivanje		
	Ocjena		>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25	1-5	<1
2	Indeks kvalitete jezgre RQD		90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	<25 %		
	Ocjena		20	17	13	8	3		
3	Razmak diskontinuiteta		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Ocjena		20	15	10	8	5		
4	Stanje diskontinuiteta		Vrlo hrapave, nekontinuirane, zahvorene i nerastrošene stijene	Neznatno hrapave, zjijeva <1 mm, neznatno rastrošene stijene	Neznatno hrapave, zjijeva <1 mm, vrlo rastrošene stijene	Glatke, kontinuirane stijene, zjijeva 1-5 mm ili ispuna <5 mm debljine	Glatke, kontinuirane stijene, zjijeva >5 mm ili ispuna >5 mm debljine		
	Ocjena		30	25	20	10	0		
5	Stanje podzemne vode	Dotok na 10 m dužine tunela	Nema	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		(Pritisak vode) / (gl. naprezanje)	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
	Opcije stanje podzemne vode	Potpuno suho	Vlažno	Mokro	Kapanje	Tečenje			
Ocjena			15	10	7	4	0		

Veličine RMR klasifikacije

B KOREKCIJE VRIJEDNOSTI ZBOG ORIJENTACIJE DISKONTINUITETA						
Pruzanje i pad		Vrlo povoljno	Povoljno	Dobro	Nepovoljno	Vrlo nepovoljno
Ocjena	Tuneli	0	-2	-5	-10	-12
	Temelji	0	-2	-7	-15	-25
	Kosine	0	-5	-25	-50	-60

E SMJERNICE ZA OCJENU STANJA DISKONTINUITETA					
Postojanost	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
Ocjena	6	4	2	1	0
Zijev	Bez	<0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm
Ocjena	6	5	4	1	0
Hrapavost	Vrlo hrapavo	Hrapavo	Neznatno hrap.	Glatko	Zagladeno
Ocjena	6	5	3	1	0
Ispuna	Bez	Tvrda <5 mm	Tvrda >5 mm	Meka <5 mm	Meka >5 mm
Ocjena	6	4	2	2	0
Trošnost	Nerastrošeno	Neznatno troš.	Umjereno troš.	Izrazito troš.	Raspadnuto
Ocjena	6	5	3	1	0

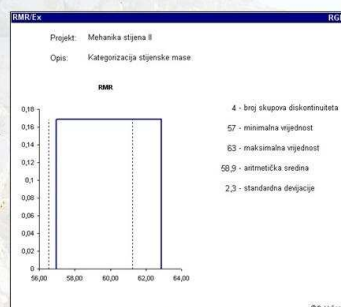
Kategorije stijenske mase prema RMR klasifikaciji

C KATEGORIJE STIJENSKE MASE UTVRĐENE NA TEMELJU UKUPNE OCJENE					
Ukupna ocjena	100-81	80-61	60-41	40-21	<21
Oznaka kategorije	I	II	III	IV	V
Opis	Vrlo dobra	Dobra	Povoljna	Slaba	Vrlo slaba

D ZNAČENJE KATEGORIJA					
Oznaka kategorije	I	II	III	IV	V
Prosječno vrijeme stajanja	10 g. za 15 m	6 mje. za 10 m	1 tjedan za 5 m	10 h za 2,5 m	30 min za 1 m
Kohezija stijenske mase (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Kut unutarnjeg trenja (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Primjer kategorizacije stijenske mase prema RMR klasifikaciji

Projekt: <input type="text"/>	
Opis: <input type="text"/>	
DIREKCIJA INŽINJERINGA	
Jedinična jedinica: <input type="text"/>	
Mjerna jedinica: <input type="text"/>	
Mjerna jedinica: <input type="text"/>	
DOKUMENTI	
Skupina 1	Skupina 2
Skupina 3	Skupina 4
Skupina 5	Skupina 6
Skupina 7	Skupina 8
Skupina 9	Skupina 10
Skupina 11	Skupina 12
Skupina 13	Skupina 14
Skupina 15	Skupina 16
Skupina 17	Skupina 18
Skupina 19	Skupina 20
Skupina 21	Skupina 22
Skupina 23	Skupina 24
Skupina 25	Skupina 26
Skupina 27	Skupina 28
Skupina 29	Skupina 30
Skupina 31	Skupina 32
Skupina 33	Skupina 34
Skupina 35	Skupina 36
Skupina 37	Skupina 38
Skupina 39	Skupina 40
Skupina 41	Skupina 42
Skupina 43	Skupina 44
Skupina 45	Skupina 46
Skupina 47	Skupina 48
Skupina 49	Skupina 50
Skupina 51	Skupina 52
Skupina 53	Skupina 54
Skupina 55	Skupina 56
Skupina 57	Skupina 58
Skupina 59	Skupina 60
Skupina 61	Skupina 62
Skupina 63	Skupina 64
Skupina 65	Skupina 66
Skupina 67	Skupina 68
Skupina 69	Skupina 70
Skupina 71	Skupina 72
Skupina 73	Skupina 74
Skupina 75	Skupina 76
Skupina 77	Skupina 78
Skupina 79	Skupina 80
Skupina 81	Skupina 82
Skupina 83	Skupina 84
Skupina 85	Skupina 86
Skupina 87	Skupina 88
Skupina 89	Skupina 90
Skupina 91	Skupina 92
Skupina 93	Skupina 94
Skupina 95	Skupina 96
Skupina 97	Skupina 98
Skupina 99	Skupina 100



Q klasifikacija

- Barton, Lien, Lunde (1974) razvili su klasifikaciju za projekt podgrade podzemnih prostorija
- Temelji se na numeričkoj procjeni kvalitete stijenske mase preko šest veličina:
 - RQD – indeks kvalitete jezgre
 - J_n – broj skupova pukotina
 - J_r – indeks hrapavosti pukotina
 - J_a – indeks izmijenjenosti pukotina
 - J_w – faktor redukcije pukotinske vode
 - SRF – faktor redukcije naprezanja

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

Veličine Q klasifikacije

BROJ SKUPOVA PUKOTINA	
Opis uvjeta	J_n
a) masivna stijena bez ili s nekoliko pukotina	0,5 – 1,0
b) jedan skup pukotina	2
c) jedan skup pukotina plus slučajne	3
d) dva skupa pukotina	4
e) dva skupa pukotina plus slučajne	6
f) tri skupa pukotina	9
g) tri skupa pukotina plus slučajne	12
h) četiri ili više skupova pukotina, slučajne, jako ispucale stijene	15
i) zdrobljena stijena, slična zemlji	20
Kod križista koristiti $3,0 \times J_n$	
Kod portala koristiti $2,0 \times J_n$	

Veličine Q klasifikacije

INDEKS HRAPAVOSTI PUKOTINA	
Opis uvjeta	J_r
A Kontakt stijenki pukotine i	
B Kontakt stijenki pukotine prije posmika od 10 cm	
a) diskontinualne pukotine	4
b) hrapave ili iregularne, valovite	3
c) glatke, valovite	2
d) skliske, valovite	1,5
e) hrapave ili iregularne, ravne	1,5
f) glatke, ravne	1,0
g) skliske, ravne	0,5
C Bez kontakta stijenki pukotine pri smicanju	
h) glinovita mineralna ispunna dovoljne debljine da spriječi kontakt stijenki pukotina (nominalno)	1,0
i) pjeskovita, šljunčana ili zdrobljena ispunna dovoljne debljine da spriječi kontakt stijenki pukotina (nominalno)	1,0
Dodati 1,0 u slučaju ako je srednji razmak relevantnog skupa pukotina veći od 3 m	

Veličine Q klasifikacije

INDEKS IZMIJENENOSTI PUKOTINA		
Opis uvjeta	J_v	φ (°)
A Kontakt stijeni pukotina		
a) zbijena, zacijepljena, čvrsta pukotina, nerazmekšavajuća, nepropusna ispunjena t.j. kvarc ili epidot	0,75	-
b) nepromijenjene stijenske pukotina, površina samo s mrljama	1,0	25 - 35
c) neznatno promijenjene stijenske pukotina, nerazmekšavajuća mineralna prevlaka pjeskovite čestice, dezintegrirana stijena bez gline itd.	2,0	25 - 30
d) prašnasta, ili pjeskovito-glinovita prevlaka, mali dio glinene frakcije (nerazmekšavajuća)	3,0	20 - 25
e) meka ili s niskim kutom trenja prevlaka od glinenih materijala tj. kaolin, talc, gips i grafit itd. te male količine bujajućih gline (diskontinuirana prevlaka, 1-2 mm ili manje debljine)	4,0	8 - 16
B Kontakt stijeni pukotina prije smicanja od 10 cm		
f) pjeskovite čestice, dezintegrirana stijena bez gline	4,0	25 - 30
g) jako prekonsolidirana nerazmekšavajuća glinovita mineralna ispunjena (neprekinuta < 5 mm debljine)	6,0	16 - 24
h) srednja ili mala prekonsolidirana, razmekšana glinovito mineralna ispunjena (neprekinuta < 5 mm)	8,0	12 - 16
i) bujajuća glinovita ispunjena, tj. montmorilonit (neprekinuta < 5 mm debljine)	8,0 - 12,0	6 - 12
C Pri smicanju nema kontakta stijeni pukotina		
j) zone ili pojasevi dezintegrirane ili zдробljene stijene i gline (vidi g. h. i za opis uvjeta u pogledu gline)	8,0 - 12,0	6 - 24
k) zone ili pojasevi prašnaste ili pjeskovite gline, mala frakcija gline (nerazmekšavajuća)	5	-
l) debela neprekinuta zona gline	13 - 20	6 - 24

Vrijednosti φ predstavljaju aproksimativne vrijednosti mineralnog sastava produkta trošenja

Veličine Q klasifikacije

FAKTOR REDUKCIJE PUKOTINSKE VODE		
Opis uvjeta	J_w	Pritisak (MPa)
a) suhi iskop ili manji priliv tj. < 5 l/min	1,0	< 0,1
b) srednji priliv ili pritisak, ponegdje isprana ispunjena iz pukotina	0,66	0,10 - 0,25
c) veliki priliv ili visoki pritisak u zdravoj stijeni s pukotinama bez ispune	0,5	0,25 - 1,0
d) veliki priliv ili visoki pritisak uz značajno ispiranje ispune pukotina	0,33	0,25 - 1,0
e) iznimno veliki priliv ili vodeni pritisak kod miniranja koji ipak opada s vremenom	0,2 - 0,1	> 1,0
f) iznimno velik priliv ili pritisak vode ali bez značajnog opadanja	0,1 - 0,05	> 1,0

Vrijednosti faktora c) – f) su grubo procijenjene
Posebni problemi uzrokovani smrznutim formacijama nisu razmatrani

Veličine Q klasifikacije

FAKTOR REDUKCIJE NAPREZANJA		SRF
Opis uvjeta		
A Oslabljena zona koja stvara iskop ili može uzrokovati rastresanje stijenske mase pri iskopu		
a) učestali slučaj oslabljenih zona koje sadrže glinu ili kemijski raspadnutu stijenu, vrlo rastresena okolina		10,0
b) jedna oslabljena zona koja sadrži glinu ili kemijski raspadnutu stijenu (dubina iskopa < 50 m)		5,0
c) jedna oslabljena zona koja sadrži glinu ili kemijski raspadnutu stijenu (dubina iskopa > 50 m)		2,5
d) učestale smične zone u zdravoj (bez gline) rastresena okolna stijena		7,5
e) jedna smična zona u zdravoj stijeni (bez gline, dubina iskopa < 50 m)		5,0
f) jedna smična zona u zdravoj stijeni (bez gline, dubina iskopa > 50 m)		2,5
g) rastresene i otvorene pukotine, ispućanost		5,0
B Zdrava stijena, problemi stijenskog naprezanja		
h) malo naprezanje, blizu površine ($\sigma_v/\sigma_1 > 200$)		2,5
i) srednje naprezanje ($\sigma_v/\sigma_1 = 200-10$)		1,0
j) veliko naprezanje, vrlo zbijena struktura (obično povoljno za stabilnost ali može biti i ne ($\sigma_v/\sigma_1 = 10-5$))		0,5 - 2,0
k) gorski udani malog intenziteta (masivna stijena) ($\sigma_v/\sigma_1 = 5-2,5$)		5 - 10
l) gorski udani jakog intenziteta (masivna stijena) ($\sigma_v/\sigma_1 < 2,5$)		10 - 20
C Zgnječena stijena, plastični tok nekompetetne stijene pod utjecajem visokog stijenskog naprezanja		
m) mali pritisak zgnječene stijene		5 - 10
n) veliki pritisak zgnječene stijene		10 - 20
D Bujajuće stijene		
o) mali pritisak bujajuće stijene		5 - 10
p) veliki pritisak bujajuće stijene		10 - 15

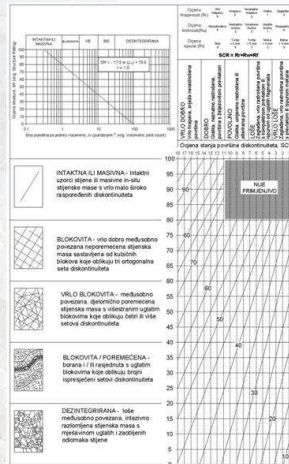
Smanjiti SRF vrijednosti za 25 - 50 % ako relevantna smična zona samo utječe ali ne i presjeca iskop

GSI (Geological Strenght Index)

- Hoek, Brown (1995) razvili su jednostavnu klasifikaciju koja se u početku temeljila na vizualnom pregledu geološkog stanja stijenske mase, da bi kasnije bile uvedene numeričke veličine pri određivanju GSI-a
- GSI relacije
 - $GSI = RMR_{76}$, za $GSI > 18$
 - $GSI = 9 \log Q'$, za $GSI < 18$
- Osnovne veličine koje se promatraju
 - Ocjena strukture stijene
 - Ocjena stanja površine diskontinuiteta

Veličine GSI klasifikacije

- Ocjena strukture, SR
 - Broj pukotina po jedinici volumena, J_v
$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i} + \frac{N_f}{5}$$
- Ocjena stanja površine diskontinuiteta, SCR
 - Ocjena hrapavosti, R_r
 - Ocjena trošnosti, R_w
 - Ocjena ispune, R_f



Čvrstoća stijenske mase (Hoek-Brownov kriterij)

- Opći izraz kriterija čvrstoće

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

- Konstante

- m_b

$$m_b = m_f \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

- s

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

- a

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

Čvrstoća stijenske mase (Hoek-Brownov kriterij)

- Jednoosna tlačna čvrstoća $\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a$
- Vlačna čvrstoća $\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b}$
- Opća čvrstoća $\sigma_{cm}' = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \cdot (m_b / 4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$
- Kohezija $c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}' (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}]}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}}$
- Kut unutarnjeg trenja $\varphi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}} \right]$

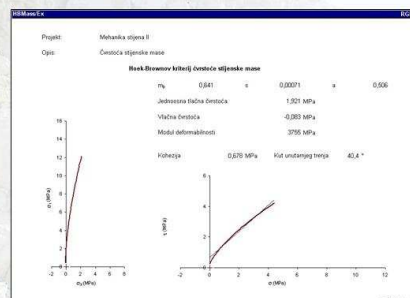
Deformabilnost stijenske mase

- Bieniawski, 1978. $E_m = 2 \cdot RMR - 100$
- Barton, 1980. $E_m = 25 \cdot \log_{10} Q$
- Serafim & Pereira, 1983. $E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$
- Hoek & Diederichs, 2006. $E_m = E_i \left(0,02 + \frac{1-D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$

Primjer izračuna čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase

- Značajke intaktnog materijala i stijenske mase:

- $\sigma_{ci} = 75$ MPa
- $m_i = 10$
- $GSI = 50$
- $D = 0,7$
- $E_i = 35000$ MPa



Formiranje geotehničkog modela

- Utvrđivanje geotehničkih sredina - područja istih litoloških, strukturnih i geomehaničkih značajki stijenske mase
- Utvrđivanje granica između geotehničkih sredina

