

# Stabilnost kosina u stenskoj masi - savremeni koncepti i metode proračuna

Zoran Berisavljević, Dušan Berisavljević, Miloš Marjanović



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

**[ДР РГФ]**

Stabilnost kosina u stenskoj masi - savremeni koncepti i metode proračuna | Zoran Berisavljević, Dušan Berisavljević, Miloš Marjanović || 2021 ||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0005700>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)



Univerzitet u Beogradu  
Rudarsko-geološki fakultet



Zoran Berisavljević  
Dušan Berisavljević  
Miloš Marjanović

# Stabilnost kosina u stenskoj masi

Savremeni koncepti i metode proračuna

Beograd, 2021.

**ZORAN BERISAVLJEVIĆ  
DUŠAN BERISAVLJEVIĆ  
MILOŠ MARJANOVIĆ**

# **STABILNOST KOSINA U STENSKOJ MASI**

savremeni koncepti i metode proračuna

**BEOGRAD, 2021.**

## **STABILNOST KOSINA U STENSKOJ MASI**

-savremeni koncepti i metode proračuna-

**Dr Zoran Berisavljević, dipl. inž. geol.**

**Dr Dušan Berisavljević, dipl. inž. geol.**

**Dr Miloš Marjanović, dipl. inž. geol.**

---

Recenzenti:

**Prof. dr Slobodan Čorić, dipl. inž. građ.**

**Prof. dr Milorad Jovanovski, dipl. inž. geol.**

**Prof. dr Vojkan Jovičić, dipl. inž. građ.**

Publikacija je odobrena za štampu od strane Nastavno-naučnog veća  
Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu odlukom br. 2288 od 28.12.2020. godine

Izdavač:

**Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet**

**Đušina 7, Telefon 011/3219-101, Telefaks 011/3235-539**

Za izdavača:

**Dekan prof. dr Zoran Gligorić, Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet**

Urednik publikacije:

**Prof. dr Biljana Abolmasov, Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet**

Tehnička priprema i dizajn korica:

**Dr Zoran Berisavljević, dr Miloš Marjanović i dr Dušan Berisavljević**

Tiraž: **100 primeraka**

Štampa: **DATA COPY d.o.o. Beograd**

Slika na naslovnoj strani:

**Nestabilnost kosine 2 u Grdeličkoj klisuri, autoput E75**

**ISBN 978-86-7352-361-3**

## Predgovor

Mehanika stena predstavlja multidisciplinarnu naučnu oblast koja se bavi proučavanjem mehaničkih i fizičkih svojstva stenske mase i njihovom primenom u inženjerstvu. Ova oblast se danas nalazi pod okriljem Međunarodnog društva za mehaniku stena (ISRM), koje je osnovano 1962. godine u Salzburgu, a najveće zasluge za formiranje društva ima prof. Leopold Muller. Prvi put je potreba za razvojem jedne ovakve discipline prepoznata između 1910. i 1964. godine, kada je tokom izgradnje Panamskog kanala registrovano više od 60 klizišta. Razvoj moderne mehanike stena, kao discipline koju danas poznajemo, počeo je nakon katastrofalnog rušenja brane Malpasset, 1959. godine, kada je poginulo 450 ljudi. Mehanika stena spada u krug veoma razvijenih disciplina i primenjuje se u sledećim oblastima: kod fundiranja objekata, stabilnosti kosina, izgradnje podzemnih objekata i tunela u građevinarstvu, kod podzemne i površinske eksploatacije u rudarstvu, prilikom istraživanja i eksploatacije ležišta čvrstih mineralnih sirovina, gasa i nafte, geotermalne energije i za potrebe odlaganja radioaktivnog otpada. Istraživanja se mogu vršiti na kopnu (onshore) i iznad površine vode (offshore), kao i na površini drugih nebeskih tela.

Stena je prirodan materijal koji je predstavljen zajednicom minerala. U prirodi se stene javljaju kao ispucale sredine što je posledica uslova formiranja same stenske mase, koja je kroz geološku istoriju bila izložena visokim pritiscima i temperaturama. U tom pogledu, a za razliku od tla (koje se uspešno može modelirati principima mehanike kontinuuma) ili veštačkih materijala (beton, čelik, plastika) stenska masa predstavlja diskontinualnu sredinu čije ponašanje je uslovljeno, pre svega, karakteristikama pukotina. Eksplicitno uključivanje kritičnih diskontinuiteta u proračun je veoma važno. Kako bi se ovladalo principima mehanike stena potrebno je poznavati petrološka i strukturna svojstva stena i stenskih masa. Ova svojstva se izučavaju kroz dve discipline: petrologiju i strukturnu geologiju. Bez ovih znanja, ozbiljno bavljenje mehanikom stena nije moguće.

Primena sofisticiranih programskih alata i naprednih tehnologija se u mehanici stena često pokazuje kao nedovoljna. Ovo proizilazi iz činjenice da smo još uvek na niskom stadijumu poznavanja fundamentalnih parametara stenske mase. U skorijoj budućnosti bi se za rešavanje problema u mehanici stena vrlo verovatno mogla koristiti „Bajesova verovatnoća“. Zbog toga je za predviđanje ponašanja objekta izgrađenog u, ili na stenskoj masi potrebno kombinovati i iskustvo.

Danas se mehanika stena posebno brzo razvija u oblasti: monitoringa optičkim i drugim postupcima, eksploatacije čvrstih, tečnih i gasovitih mineralnih sirovina, diskretnog modelovanja (Discrete Element Modeling) sa mrežama pukotina (Discrete Fracture Network) i interpretaciji strukturnih i petrografskih podataka iz fotogrametrisjkih i laserskih metoda. Vrše se i ispitivanja u oblasti interpretacije rezultata infracrvenih termalnih merenja za potrebe detektovanja npr. materijalnih mostova unutar stenske mase, kao i ispitivanje šupljina unutar stenske mase kosmičkim zracima (mionima).

Tehnološki razvoj omogućio je primenu 3D štampača, a skorija ispitivanja ukazuju na mogućnost primene 3D štampe na nivou mineralnih zrna. Veliki napredak ostvaren je u segmentu rezanja i bušenja kroz čvrstu stensku masu, gde se primenjuju termalni, laserski i plazmeni postupci topljenja i zamaranja stene. Primena veštačke inteligencije danas je sve prisutnija u mehanici stena.

U monografiji se izučavaju teorijski i praktični aspekti primene mehanike stena za rešavanje problema stabilnosti kosina. Knjiga je jednim svojim delom prilagođena studentima master studija Rudarsko-geološkog fakulteta kao i inženjerima - geotehničarima u praksi, ali je mogu koristiti i rudarski i građevinski inženjeri u obimu koji im je potreban. Veliki deo materije prevazilazi obim koji je neophodan studentu ili inženjeru i pogodan je za onoga ko želi da se dalje usavršava u ovoj oblasti. Reference navedene na kraju knjige omogućavaju zainteresovanom čitaocu da produbi svoje znanje iz oblasti koja ga zanima.

Knjiga je podeljena u šest poglavlja i koncipirana je tako da se, pored teorijskih znanja, savladaju i osnovni principi projektovanja u stenskoj masi.

**U prvom poglavlju** se razmatraju **naponi, čvrstoća i deformacije** i to sledećim redosledom: tenzor napona i naponsko stanje u stenskoj masi i okolini pukotina, merenje napona, Svetska mapa napona; fenomenološki kriterijumi loma - čvrstoća intaktnih homogenih i kompozitnih uzoraka, diskontinuiteta i stenske mase (kriterijumi loma: Mohr-Coulomb-ov, Hoek-Brown-ov, Barton-Bandis-ov i hiperbolička anvelopa); tenzor deformacije, deformabilnost intaktnih uzoraka i stenske mase; normalna i smičuća krutost pukotina.

**U drugom poglavlju** su dati osnovni koncepti **diskontinualnosti i anizotropije**: ispucalost i svojstva pukotina; prikupljanje podataka o pukotinama sa terena (klasični postupak i primena laserskih i fotogrametrijskih metoda); modeli pukotina na bazi Poisson-ovog slučajnog procesa (Voronoi, Baecher, Veneziano); mreže pukotina (DFN); anizotropija čvrstoće - pukotine na malom rastojanju i direkcioni modeli; primena mehanike loma kod stena; čvrstoća masivnih i umereno ispucalih krutih stenskih masa (kriterijum S-oblika, Kajzerov efekat i akustična emisija, Griffith-ova teorija pukotina).

**Treće poglavlje** izučava **klasifikacione sisteme** koji se koriste u praksi za rešavanje problema stabilnosti kosina, a u svojoj osnovi se uglavnom baziraju na tri sistema GSI, RMR i Q. Na početku je definisan pojam klasifikacioni sistem. Zatim se prelazi na sledeće klasifikacije:

- GSI i njegove modifikacije (primena za različite tipove stenskih masa, kvantifikacija GSI dijagrama, primena za klasifikaciju iskopa, CGSI);
- RMR i njegove modifikacije (RMQR, ARMR, MRMR, SMR);
- Q i Q-slope;
- RMI.

Na kraju su prikazane najčešće korišćene korelacije između pojedinih klasifikacionih sistema.

**Četvrto poglavlje** obrađuje **stabilnost kosina** sa različitih aspekata. Prikazani su: tipovi nestabilnosti u ispucalost stenskoj masi; kinematski uslovi formiranja nestabilnosti - planarno klizanje, klizanje klina, prevrtanje blokova; koncept faktora sigurnosti, koncept parcijalnih faktora prema Eurokod 7 normama; metode za analizu stabilnosti kosina - metode granične ravnoteže (kružno-cilindrična i složena klizna površ, planarno klizanje, klizanje klina, preturanje blokova); koncept teorije plastičnosti (granična analiza); naponsko-deformacijska analiza primenom phi-c redukcije; verovatnoća loma.

Nakon toga prikazani su osnovni postupci: ojačanja kosina ankerima, zaštite kosina torkretom i primenom plastičnih materijala, stabilizacije kosina (različite vrste potpornih konstrukcija i elastičnih barijera) i dreniranja kosina.

Zatim je obrađena stabilnost kosina u seizmičkim uslovima. Ovde su prikazane osnove projektovanja prema domaćim i Eurokod normama, kada je u obzir potrebno uzeti dejstvo inercijalne sile od zemljotresa.

Na samom kraju obrađena je analiza trajektorija odronjenih blokova.

**U petom poglavlju** prikazana je metodologija **osmatranja kosina**, pri čemu su obrađeni principi merenja deformacija, opterećenja i porednih pritisaka.

**Šesto poglavlje** se bavi konceptom **mekih stena i vremenski zavisnim ponašanjem stenske mase**. Obrađene su sledeće celine: raspadanje mekih stenskih masa i vremenski zavisno ponašanje.

Napominje se da se danas u praksi sve češće koriste i trodimenzionalni postupci modeliranja, pa je iz tog razloga u poglavlju 4 prikazan trodimenzionalni postupak za analizu odrona.

Na kraju, želimo da se najiskrenije zahvalimo revidentima koji su korisnim sugestijama i komentarima omogućili da tekst dobije na dodatnom kvalitetu, kao i svojim porodicama bez čije podrške ova monografija ne bi mogla biti pripremljena.

Želimo da naglasimo da ćemo sa zahvalnošću prihvatiti primedbe i sugestije čitalaca koje bi dovele do poboljšanja publikacije.

Beograd, 2021.

Autori

## SADRŽAJ

<b>1. NAPONI, ČVRSTOĆA I DEFORMACIJE</b> .....	<b>2</b>
1.1. Tenzor napona i naponsko stanje u stenskoj masi i okolini pukotina.....	2
1.2. Merenje napona .....	14
1.2.1. Metoda rejezgrovanja (overcoring) .....	17
1.2.2. Metode hidrauličkog loma i hidrauličkog ispitivanja na postojećim pukotinama ...	23
1.3. Svetska mapa napona .....	30
1.4. Čvrstoća i fenomenološki kriterijumi loma .....	36
1.4.1. Čvrstoća kompozitnih uzoraka pri jednoosijalnoj kompresiji .....	41
1.4.2. Mohr-Coulomb-ov (MC) kriterijum loma .....	43
1.4.3. Barton-Bandis-ov (BB) kriterijum loma (čvrstoća na smicanje diskontinuiteta) ....	45
1.4.4. Hoek-Brown-ov (HB) kriterijum loma .....	50
1.4.5. Hoek-Brown-ov kriterijum loma za anizotropnu intaktnu stenu .....	60
1.4.6. Hoek-Brown-ov kriterijum loma za anizotropnu stensku masu .....	62
1.4.7. Nelinearna anvelopa hiperboličkog tipa .....	62
1.5. Deformabilnost stena i stenskih masa.....	67
1.5.1. Normalna i smičuća krutost pukotina .....	76
<b>2. PUKOTINE I ANIZOTROPIJA</b> .....	<b>80</b>
2.1. Ispucalost i svojstva pukotina.....	80
2.2. Primena laserskih i fotogrametrijskih metoda za karakterizaciju pukotina .....	99
2.2.1. Primena LIDAR tehnologije za karakterizaciju pukotina .....	99
2.2.2. Primena fotogrametrijskih metoda za karakterizaciju pukotina .....	112
2.3. Diskretne mreže pukotina i modeli na bazi Poisson-ovog slučajnog procesa.....	116
2.3.1. Baecher model .....	118
2.3.2. Veneziano model .....	119
2.3.3. Voronoi model.....	121
2.4. Anizotropija stena i stenskih masa .....	127
2.4.1. Direkcionni modeli.....	130



2.5. Primena mehanike loma kod stena .....	136
2.6. Čvrstoća masivnih i umereno ispucalih krtih stenskih masa .....	139
<b>3. KLASIFIKACIJE STENSKIH MASA .....</b>	<b>148</b>
3.1. Opšte o klasifikacionim sistemima .....	148
3.2. GSI i njegove modifikacije .....	150
3.2.1. Kompozitni geološki indeks čvrstoće .....	162
3.3. RMR i njegove modifikacije .....	167
3.3.1. RMQR klasifikacija .....	174
3.3.2. ARMR klasifikacija .....	179
3.3.3. MRMR klasifikacija .....	181
3.3.4. SMR klasifikacija .....	190
3.4. Q sistem .....	194
3.4.1. Q-slope sistem .....	205
3.5. RMi klasifikacija .....	213
3.6. Korelacije između pojedinih klasifikacionih sistema .....	216
<b>4. STABILNOST KOSINA .....</b>	<b>219</b>
4.1. Tipovi nestabilnosti u ispucaloj stenskoj masi .....	219
4.2. Kinematski uslovi formiranja nestabilnosti .....	221
4.3. Koncept globalnog faktora sigurnosti .....	226
4.4. Projektovanje prema Eurokod 7 propisima i koncept parcijalnih faktora .....	227
4.5. Metode za analizu stabilnosti kosina .....	232
4.5.1. Metode granične ravnoteže .....	232
4.5.2. Koncept teorije plastičnosti .....	252
4.5.3. Naponsko-deformacijske metode za analizu stabilnosti kosina .....	258
4.6. Probabilistički pristup u analizi stabilnosti kosina .....	264
4.7. Mere ojačanja i zaštite kosina .....	281
4.7.1. Ojačanje stenske mase ankerima .....	281
4.7.2. Primena prskanog betona (torkreta) .....	299
4.7.3. Zaštita od erozije plastičnim materijalima, dreniranje i stabilizacija kosina .....	303
4.8. Stabilnost kosina u seizmičkim uslovima .....	311
4.9. Analiza trajektorija odronjenih blokova .....	325

<b>5. OSMATRANJE KOSINA</b> .....	<b>329</b>
5.1. Razlozi za osmatranje .....	329
5.2. Postupci i instrumenti za osmatranje.....	335
5.2.1. Površinska osmatranja.....	335
5.2.2. Potpovršinska osmatranja.....	340
5.2.3. Naprezanja u ankerima.....	349
<b>6. MEKE STENE I VREMENSKI ZAVISNE DEFORMACIJE</b> .....	<b>352</b>
6.1. Opšte o mekim stenskim masama.....	352
6.2. Raspadanje mekih stenskih masa.....	353
6.2.1. Podela i nomenklatura pelitnih sedimenata .....	357
6.2.2. Metodologija određivanja otpornosti prema raspadanju.....	358
6.2.3. Raspadanje crvenih permskih sedimenata - primer iz prakse .....	360
6.3. Vremenski zavisno ponašanje stenske mase .....	374
<b>PRILOZI:</b>	
A. LISTA SIMBOLA I SKRAĆENICA .....	381
B. INDEKS POJMOVA.....	392
C. BIBLIOGRAFIJA.....	399