

Slaba stijenska masa

Nekić, Petra

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:195606>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Petra Nekić

SLABA STIJENSKA MASA

Završni rad

Rijeka, 2020. godina

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Preddiplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

Petra Nekić
JMBAG: 0114031307

SLABA STIJENSKA MASA

Završni rad

Rijeka, rujan 2020.

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

Tema završnog rada

SLABA STIJENSKA MASA

WEAK ROCK MASS

Kandidat: **PETRA NEKIĆ**

Kolegij: **MEHANIKA TLA I STIJENA**

Završni rad broj: **20-P-24**

Zadatak:

U radu su prikazane karakteristike slabe stijenske mase, koja podrazumijeva materijal između tla i čvrste stijene, posebno parametri čvrstoće te njihova degradacija pod utjecajem trošenja i djelovanja vode općenito. Dan je osvrt na značajke svojstvene kategorijama slabe do vrlo slabe stijene u najpoznatijim klasifikacijskim sustavima. Obradene su nestabilnosti karakteristične za slabu stijensku masu, kao i način njihova rješavanja. Inženjerstvo u stijenskoj masi koja po svojim parametrima čvrstoće i uvjetima u kojima se nalazi predstavlja teške geotehničke uvjete nalaže posebne vrste iskopa stijene te korištenje opservacijskih metoda kako bi se prevladali izazovi takve sredine.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.

Mentorica:

doc. dr. sc. Sanja Dugonjić Jovančević,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Petra Nekić

U Rijeci, 14. rujna 2020.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Sanji Dugonjić Jovančević na pomoći, strpljenju i vremenu tijekom izrade ovog završnog rada.

Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima, koji su mi bili podrška tijekom cijelog studija.

Najveće hvala mojim roditeljima i braći na ukazanom povjerenju i razumijevanju. Bez njih ovaj uspjeh ne bi bio moguć.

SAŽETAK

Završni rad „Slaba stijenska masa“ osvrće se na karakteristike slabe stijenske mase koja zbog svoje povećane izloženosti trošenju predstavlja izazov u projektiranju i građenju. Na temelju inženjerske klasifikacije, odnosno razvrstavanjem stijenske mase na temelju međusobnih odnosa karakteristika, može se odrediti čvrstoća i deformabilnost stijenske mase. Osim drugih fizikalnih i kemijskih čimbenika koji utječu na degradaciju parametara čvrstoće slabe stijenske mase, veoma je bitno kako voda utječe na ponašanje stijene i kakav utjecaj ima na inženjerske radove. Izloženost čimbenicima koji potiču trošenje, dovodi potencijalno do degradacije parametara čvrstoće, što može dovesti do dugotrajno prevelikog opterećenja na stijensku masu. Kako bi se spriječilo povećano opterećenje i visoka naprezanja, potrebno je stabilizirati stijensku masu podgrađivanjem prilagođenim za uvjete iskopa u slaboj stijenskoj masi. Uz klasične i moderne metode projektiranja i građenja, potrebno se u teškim geotehničkim uvjetima slabe stijenske mase osloniti na opservacijsku metodu uz koju se mogu na vrijeme predvidjeti potencijalni problemi nestabilnosti tijekom gradnje i spriječiti neželjeni pomaci ili slom stijenske mase.

Ključne riječi: slaba stijenska masa, klasifikacija, parametri čvrstoće, trošenje, stabilnost

ABSTRACT

The final paper "Weak rock mass" looks at the characteristics of weak rock mass, which due to its increased exposure to weathering is a challenge in design and construction. Based on rock mass classification, which is classifying the rock mass on the basis of the mutual relations of characteristics, the strength and deformability of the rock mass can be determined. In addition to other physical and chemical factors that affect the degradation of the strength parameters of weak rock mass, it is very important how water affects the behavior of the rock and what impact it has on engineering works. Exposure to factors which contribute weathering potentially leads to degradation of strength parameters, which can lead to long-term overload on the rock mass. In order to prevent increased load and high stresses, it is necessary to stabilize the rock mass by substructure adapted to the excavation conditions in low rock mass. In addition to classical and modern design and construction methods, it is necessary to rely on the observation method in difficult geotechnical conditions of low rock mass, which can predict potential problems of instability during construction and prevent unwanted displacements or rock mass collapse.

Key words: weak rock mass, classification, strength parameters, weathering, stability

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. SLABA STIJENSKA MASA..... | 3 |
| 2.1. Slabe sedimentne stijene | 3 |
| 3. KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE | 12 |
| 4. ČVRSTOĆA STIJENSKE MASE | 26 |
| 4.1. Čvrstoća slabe stijenske mase | 26 |
| 5. DEGRADACIJA PARAMETARA ČVRSTOĆE | 31 |
| 5.1. Trošenje..... | 31 |
| 5.2. Utjecaj vode na stijensku masu..... | 34 |
| 6. INŽENJERSTVO U SLABOJ STIJENSKOJ MASI..... | 39 |
| 6.1. Nestabilnosti karakteristične za slabu stijensku masu | 39 |
| 6.2. Iskop u slaboj stijenskoj masi | 44 |
| 6.3. Opservacijske metode | 45 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 47 |
| 8. LITERATURA | 48 |

POPIS TABLICA

Tablica 1: Podjela stijenske mase prema Terzaghijevoj klasifikaciji [17]

Tablica 2: Predloženi odnos između RQD indeksa i kvalitete stijene [20]

Tablica 3: RMR klasifikacija [24]

Tablica 4: Karakteristike stijenske mase [25]

Tablica 5: Q klasifikacija [26]

Tablica 6: Tablica za procjenu GSI stijenske mase [29]

Tablica 7: Rasponi GSI vrijednosti različitih komponenata fliša procijenjeni na usjecima i jezgrama bušotina [30]

Tablica 8: Procjena jednoosne čvrstoće jednostavnim pokusima na terenu [4]

Tablica 9: Klasifikacija stijenske mase na osnovi jednoosne tlačne čvrstoće [15]

Tablica 10: Čvrstoća stijenske mase [36]

Tablica 11: Stupnjevi trošenja stijenske mase [41]

Tablica 12: Terensko određivanje čvrstoće stijenske mase [36]

Tablica 13: Stupanj trošnosti i svojstva stijenske mase [36]

POPIS SLIKA

Slika 1: Slaba stijenska masa kao prijelazni materijal između stijenskih masa veće čvrstoće i tla [1]

Slika 2: Muljnjak [10]

Slika 3: a) Fliš u Zumaii, Španjolska b) Istra, Hrvatska [12]

Slika 4: Treset [13]

Slika 5: Lignit [13]

Slika 6: Sub bituminozni ugljen [13]

Slika 7: Bitumenski ugljen [13]

Slika 8: Antracit [13]

Slika 9: Koks [13]

Slika 10: Kreda koja se sastoji od kalcijeva karbonata [14]

Slika 11: Diatomit [14]

Slika 12: Stalaktiti i stalagmiti [16]

Slika 13: Vrste vapnenca: a) coquina b) tuf [16]

Slika 14: Odnos vremena postojanosti stijenskog iskopa nepodgrađenog raspona u odnosu na različite klase stijenske mase [18]

Slika 15: Postupak mjerenja i izračunavanja RQD indeksa [21]

Slika 16: Prikaz naprezanje – deformacija za tri vrste stijena [35]

Slika 17: Profil trošnosti u stijeni [36]

Slika 18: Dijagram naprezanje-deformacija za Barea pješčenjak pri različitim vrijednostima pornog pritiska i temperaturi od 24°C [5]

Slika 19: Prikaz trošenja vapnenačke stijenske mase [36]

Slika 20: Odnos između trajnosti i volumena pora [1]

Slika 21: Primjer ispadanja malih blokova po konturi iskopa [44]

Slika 22: Primjer zatvaranja profila iskopa u obliku podizanja poda i pomicanja blokova [44]

Slika 23: Pokos stijenske mase s izraženim diskontinuitetima [45]

Slika 24: Slom u trošnoj stijenskoj masi [45]

Slika 25: Plitki slom u stijenskoj masi [45]

Slika 26: Stabilnost kosina u stijeni visine do 20 m [36]

Slika 27: Oblikovanje kišobrana u Jet Grouting Metodi [44]

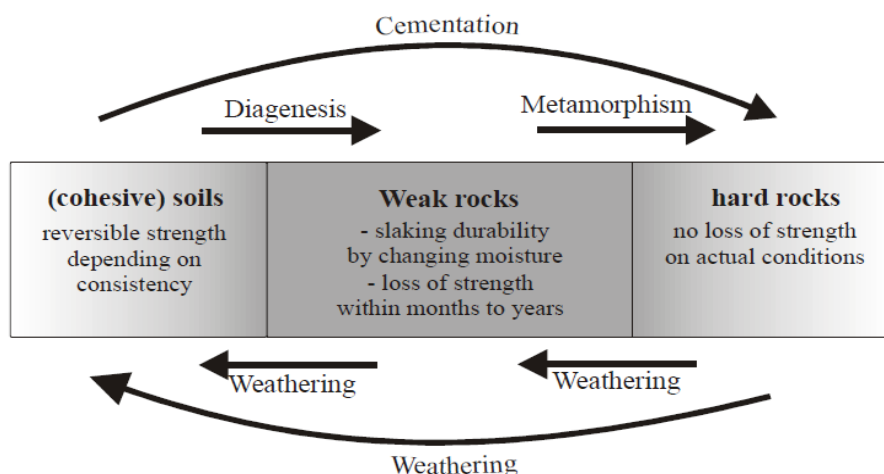
Slika 28 : Vrste iskopa za različite kategorije stijenske mase [36]

Slika 29: Tehnike iskopa tunela u stijenskoj masi [36]

Slika 30: a) Monitoring iskopa tunela [20] b) monitoring građevne jame [47]

1. UVOD

Slaba stijenska masa, u geotehničkom inženjerstvu, označava prijelazni materijal između kompetentnih stijenskih masa, odnosno stijenskih masa veće čvrstoće i tla (slika 1.) [1]. Samo podrijetlo i izmjene uzrokovane različitim vanjskim utjecajima rezultiraju promjenom svojstava stijenske mase koja utječu na cjelokupno ponašanje zbog čega je potrebno razumjeti razlike između pojedinih stijenskih masa [2].



Slika 1: Slaba stijenska masa kao prijelazni materijal između stijenskih masa veće čvrstoće i tla [1]

Stijenska masa je masa intaktne stijene isprekidana diskontinuitetima, a u prirodi se javlja raspucala, slojevita, anizotropna te prirodno napregnuta [3]. Intaktna stijena sastavljena je od zrna nastalih u geološkoj prošlosti, a ne sadrži diskontinuitete, odnosno pukotine ili plohe slojevitosti s malom ili nikakvom vlačnom čvrstoćom.

Na temelju geoloških promjena i podrijetla, slaba stijena se klasificira kao tektonski poremećena kompetentna stijena, istrošena kompetentna stijena i mlada sedimentna stijena.

Velika razlika slabe stijene u odnosu na čvrstu stijenu je njezina tlačna čvrstoća, ali i podložnost trošenju odnosno dezintegraciji u vrlo kratkom vremenu (nekoliko dana do nekoliko godina) uslijed djelovanja atmosferilija. Uniaxial Compressive Strength (UCS), odnosno neograničena/jednoosna tlačna čvrstoća predstavlja opterećenje koje uzrokuje slom uzorka materijala između dvije ravne ploče, bez sile bočnog otpora. Kod čvrstih stijena UCS premašuje

100 MPa, dok je kod slabih stijena ne prelazi 25 MPa [4]. Čvrste stijene su slabo raspucane i minimalno trošne, dok je karakteristika slabih stijena, kao što je spomenuto, izuzetna podložnost trošenju što dovodi do raspucavanja i uslojavanja. Bitna je i stabilnost temelja i kosina, koju osigurava čvrsta stijena za razliku od slabe stijene, kod koje postoji problem usjedanja temelja i slom pri malim nagibima kosina.

Veoma bitna stavka u inženjerstvu je razlika u ponašanju kompetentnih (stijenskih masa veće čvrstoće) i nekompetentnih (stijenskih masa manje čvrstoće). Odnos kompetentnosti može varirati i ovisi o nekoliko čimbenika. Jedan od čimbenika je veličina bočnih naprezanja, tj. kako se porastom vrijednosti bočnih naprezanja smanjuje kompetentnost stijenske mase. Uz veličinu bočnih naprezanja, bitna je brzina i trajanje naprezanja, odnosno da sniženjem brzine naprezanja stijenska masa deformira plastično – povećava se nekompetentnost stijenske mase. Na mehanička svojstva i ponašanje stijenske mase utječe i prisutnost fluida. Kod stijenskih masa koje sadrže konstitucijsku, kristalnu ili adsorpcijsku vodu smanjuje se kompetentnost stijenske mase, koja se deformira plastično. U slučaju da je u stijenskoj masi prisutna porna voda, porast pornog pritiska snižava efektivna naprezanja što dovodi do smanjenja bočnih naprezanja. Viši porni tlak smanjuje čvrstoću i plastičnost stijene. Osim spomenutih čimbenika, temperatura, osim što negativno utječe na elastičnost, svojim povećanjem rezultira izrazitoj plastičnoj deformaciji stijenske mase [5].

Uvjeti unutar iste stijene variraju uslijed lokalnih pojava i procesa te uslijed prisutnosti špilja, pećina, jama, nagnutih ploha smicanja i ljudskih zahvata koji mogu oslabiti stijensku masu.

2. SLABA STIJENSKA MASA

Slaba stijenska masa naziv je za mlade sedimentne stijene niske tlačne čvrstoće i uvelike izmijenjene čvrste stijene s intenzivnim diskontinuitetima [6-8]. Na terenu se mogu pronaći kao produkt litogenetskih procesa, ali i kao rezultat retrogradnih promjena izvorno čvrstih stijena.

Mlade sedimentne stijene, kao što su blato i glinjaci, imaju slabu litifikaciju i cementaciju čestica te relativno nisku jednoosnu tlačnu čvrstoću [7,8]. Kod istrošenih kompetentnih stijena, kao što je pješčenjak, tijekom dužeg izlaganja vremenskim prilikama, dijelovi kamene mase počinju se razgrađivati i pucati duž postojećih mikropukotina, što dovodi do smanjenja mehaničke čvrstoće stijenske mase. Tektonski poremećene kompetentne stijene sadrže široke, intenzivne prijelome, koji su nastali uništavanjem izvornih struktura zbog čega ova vrsta stijene ima niska mehanička svojstva [8].

2.1. Slabe sedimentne stijene

Sedimentne stijene nastaju zbog uvjeta na površini ili plitko ispod površine Zemlje. Nastaju od zrna sedimenata koji su se nataložili uz pomoć vode, vjetra ili leda i formirali slojeve. [9]

Postoji nekoliko tipova slabih sedimentnih stijena, a jedan od njih je i muljnjak. Muljnjak (slika 2.) je vrsta slabe sedimentne stijene koju tvore sitne čestice gline (veličine ispod 0,05 mm) i kvarcna zrnca mulja. Čine oko polovinu svih stijena, čime su najraširenija skupina stijena. Uglavnom su prekrivene vegetacijom jer su sklone trošenju. Sitne čestice muljnjaka talože se na mjestima kao što su jezera, dna dubokih mora, poplavne ravnice, bazenske padine i drugi.

Muljnjaci se upotrebljavaju u lončarstvu, gdje se izrađuje posuđe od visokokvalitetnih gline. Koriste se i u građevinarstvu za proizvodnju opeke i krovnih pločica te za proizvodnju cementa. [10]



Slika 2: Muljnjak [10]

Fliš (engl. flysch) (slika 3.) je opisni termin za kompleks klastičnih sedimentnih stijena nastalih mutnim tokovima odnosno podmorskim klizanjima sedimenata [11]. Termin je u geološku literaturu uveo Švicarac Bernhard Studer (1827.), a odnosio se na tip litologije, posebice na izmjenu serije pješčenjaka i škriljavaca sa sadržajem breča, konglomerata i vapnenaca Gornje Krede švicarske regije Siemmenthal.

Različiti članovi flišne stijenske mase imaju različitu podložnost trošenju. Pješčenjaci i karbonati su otporniji na trošenje od manje rezistentnih šejlova. Kad je u pitanju intenzivnije trošenje fliša, šejlovi se relativno brzo raspadaju u naslage gline i praha i to predstavlja prijelaz između ekstremno slabih stijena i koherentnog tla. Za ovakvo, površinsko trošenje, zaslužne su atmosferilije, a dublje trošenje šejlova uzrokuju podzemne vode. Pješčenjaci su čvrsta komponenta flišne stijenske mase i otporni su na eroziju i trošenje, a zbog trošenja šejlova pojavljuju se kao nepravilni odlomci.

Osim sastava sedimentne stijene, na stabilnost utječu nagib i debljina slojeva, izmjena slojeva između pješčenjaka i šejlova, tektonika, utjecaj atmosferilija te podzemna i procjedna voda. Diferencijalno trošenje i erozija pridonijeli su različitosti nagiba, debljine i ritmičnosti slojeva što uzrokuje slomove stijenske mase fliša prilikom zasijecanja u naslage fliša. Narušavaju se geomehaničke karakteristike šejlova što dovodi do destabilizacije slojeva i podslojeva pješčenjaka i karbonata. U šejlovima se najviše odražava tektonska poremećenost, u smjeru tektonskih deformacija. Na stabilnost utječu i procjedne vode, koje prolaze kroz slojeve pješčenjaka te erodiraju i troše šejlove koji se nalaze pored.

Fliš se uglavnom sastoji od šejlova, a uslijed djelovanja atmosferilija i procjednih voda odnosno zbog trošenja i erodiranja poprima obilježja muljevitoz tla. Dolazi do taloženja gline i praha te do diferencijalnih slijeganja tla, a na padinama i pokosima dolazi i do pojave klizišta. [12]



Slika 3: Fliš: a) Zumaii, Španjolska b) Istra, Hrvatska [12]

Ugljen je slaba, organska sedimentna stijena koja je nastala iz biljnih ostataka u vlažnoj, močvarnoj sredini. Spada u zapaljive stijene, i uz naftu i zemni plin, jedan je od najvažnijih fosilnih goriva, a upotrebljava se za proizvodnju električne energije.

Nastaje taloženjem biljnih ostataka u močvarnom okruženju koje se s vremenom prekriju blatom ili pijeskom i težina tog blata zbija biljni ostatak i pomaže u pretvorbi u ugljen. Da bi se formirao ugljen potrebno je da se održi savršen odnos količine sedimenta u močvarnom području i uvjeta propadanja.

Postoje različite vrste ugljena podijeljene u različite kategorije i svaki od njih ima određene karakteristike. Podijeljeni su po razini organskog metamorfizma odnosno po fizikalnim i kemijskim procesima koji se događaju zbog djelovanja topline, povišenog tlaka i zbog reagiranja s kemijskim otopinama. Razlikujemo treset, lignit, sub bituminozni, bituminozni ugljen i antracit.

Treset (slika 4.) je karakterističan po tome što se sastoji od karboniziranih biljnih ostataka, a u ugljen se pretvara pokapanjem, sabijanjem i karbonizacijom. Udio ugljika je manji od 60% u suhom pepelu. [13]



Slika 4: Treset [13]

Lignit (slika 5.) je treset pretvoren u stijenu, prepoznatljivu po ugljenu smeđe-crne boje. Sadrži biljne strukture, a udio ugljena je između 60% i 70% na osnovi suhog pepela. U Europi se lignit naziva još i „smeđim ugljenom”.



Slika 5: Lignit [13]

Sub bituminozni ugljen (slika 6.) je lignit koji je dio ugljika i vodika pretvorio u ugljen što tvori ugljen s većim udjelom ugljika od 71% do 77% na osnovi suhog pepela.



Slika 6: Sub bituminozni ugljen [13]

U bitumenski ugljen (slika 7.) spada 50% ugljena proizvedenog u Sjedinjenim Američkim Državama. Nastaje kada je sub bituminozni ugljen podvrgnut povećanim razinama organskog metamorfizma. Udio ugljika je između 77% i 87% u suhom pepelu. Često se naziva i „meki ugljen”, što nema veze sa samom tvrdoćom ugljena.



Slika 7: Bitumenski ugljen [13]

Antracit (slika 8.) je vrsta ugljena koja se smatra metamorfnom stijenom. Udio ugljena na osnovi suhog pepela je 87%. Naziva se još i „tvrdim ugljenom”, što nema veze s tvrdoćom stijene.



Slika 8: Antracit [13]

Ugljen, osim što se koristi za proizvodnju električne energije, koristi se kao izvor topline za proizvodne procese te kao izvor energije za tvornice, gdje zagrijava paru, koja se koristi za pogon mehaničkih uređaja. Upotrebljava se i za proizvodnju koksa u kontroliranim uvjetima s nedostatkom zraka. Koks (slika 9.) se koristi kao gorivo (u kojem je udio ugljena vrlo visok) za obradu metala. Osim što se koristi u proizvodnji, može se pretvarati u tekuća i plinovita goriva (više u eksperimentalne svrhe). [13]



Slika 9: Koks [13]

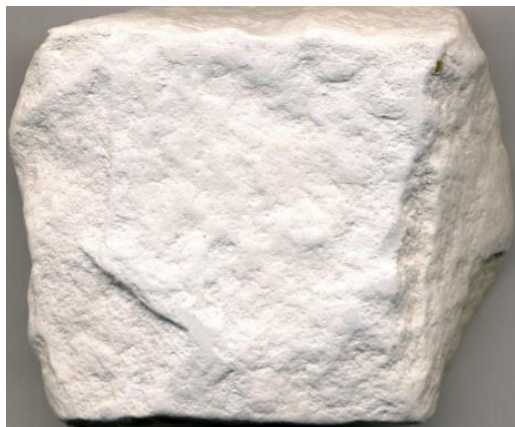
Kreda (slika 10.), slaba stijena koja spada u vapnence, sastoji se od kalcijevog karbonata koji potječe iz morskih životinja školjaka, poznatijih kao foraminifera i iz vapnenačkih ostataka morskih algi – kokolita. Prepoznatljiva je po svojoj bijeloj ili svjetlo sivoj boji te po poroznosti, propusnosti i mekoći.

Kreda se formira iz sedimenta morskih algi i drugih organizama, koji se nakupljaju na morskom dnu. Kako se najveći dio nakupljenog i istaloženog materijala sastoji od kalcijeva karbonata, kreda je vrsta stijene formirana iz kamenca [14].



Slika 10: Kreda koja se sastoji od kalcijeva karbonata [14]

Ukoliko se stijena formira iz ostataka od silicijeva dioksida, vrsta stijene će biti diatomit (slika 11.).



Slika 11: Diatomit [14]

Ležišta krede nalaze se svugdje po svijetu, a formiraju se u dubokim vodama. Veliki dio krede naslagao se tijekom razdoblja „Krede”, koje je obilježilo vrijeme visokih razina mora, gdje su topla mora preplavila kontinentalni dio Zemlje.

Topla voda mora olakšala je taloženje krede jer je kalcijev karbonat topljiviji u hladnoj vodi, zbog čega će organizmi ostatke kalcijevog karbonata bolje proizvoditi u toploj vodi. Razdoblje „Krede” je dobilo naziv po kredi jer je u njemu nastalo više te stijene nego u bilo kojem drugom razdoblju geološke prošlosti.

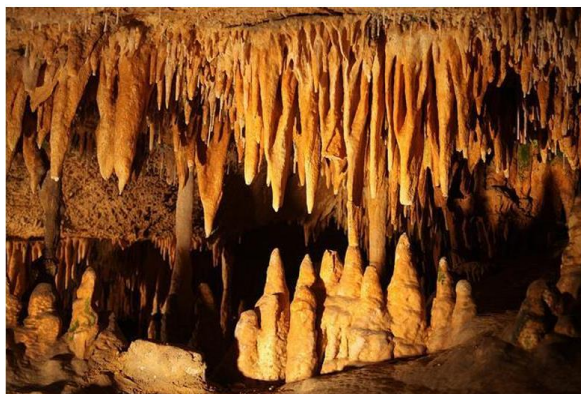
Kreda je prepoznatljiva po svojoj tvrdoći, sadržaju fosila i kiselinama. Na mikroskopskoj razini može se primijetiti veliki stupanj poroznosti krede, što uvelike utječe na njezinu propusnost.

Prirodna kreda se od davnih vremena koristila za pisanje po pločama, a ona koja se koristi danas, ne proizvodi se od krede od minerala, ali se i dalje naziva kredom. Osim što se koristi kao pribor za pisanje, može se koristiti za proizvodnju nafte i plina. [14]

Vapnenac može biti ekstremno slaba stijenska masa ($UCS < 1$ MPa), ali je uglavnom srednje čvrsta ($UCS 25-50$ MPa) do čvrsta stijenska masa ($UCS 50-100$ MPa) [15]. Iako vapnenice ne ubrajamo prema čvrstoći u tipične slabe stijene, podložan je kemijskom trošenju i čini veći dio našeg priobalja. U nastavku će se prikazati karakteristike i procesi kojima su podložni. Čvrstoća vapnenca je takva da se može zagrebat i džepnim nožićem, a uzorak se raspucava uslijed jednog ili više udara geološkim čekićem [4].

Vapnenac koji nastaje u plitkim, morskim vodama iz ostataka školjki od kalcijeva karbonata, poznatiji je kao biološka sedimentna stijena, čije se podrijetlo otkriva prisutnošću fosila. Vapnenici koji nastaju taloženjem kalcijevog karbonata iz slatke ili slane vode poznati su kao kemijske sedimentne stijene.

Vapnenac se može stvoriti i isparavanjem. Špiljske formacije kao što su stalaktiti i stalagmiti (slika 12.) primjeri su vapnenca koji je nastao isparavanjem. Nastali su isparavanjem vode koja kapa kroz pore u špiljama, a takav vapnenac poznat je kao „travertin” i spada pod kemijske sedimentne stijene.



Slika 12: Stalaktiti i stalagmiti [16]

Vapnenac sadrži najmanje 50% kalcijevog karbonata te se u njemu mogu nalaziti čestice kvarca, feldspara, gline, pirita, siderita i drugih minerala. Kalcijev karbonat vapnencu daje svojstvo pomoću kojeg se vrši identifikacija stijenske mase, koje se pojavljuje u kontaktu s otopinom 5% klorovodične kiseline.



Slika 13: Vrste vapnenca: a) coquina b) tuf [16]

Zbog podložnosti kemijskom trošenju uslijed djelovanja atmosferilija otapa se u vodi, a neotopljivi minerali zaostaju na površini tvoreći crvenicu. Otapanjem i podzemnom erozijom u vapnencu nastaju krški oblici kao što su škrape, špilje i dr.

Vapnenac se upotrebljava u razne svrhe, a jedna je da služi kao građevinski materijal, odnosno koristi se kao drobljeni kamen u svrhu gradnje te kao agregat za beton i jedna od sirovina za proizvodnju cementa [16].

3. KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE

Kako bi odredili parametre, odnosno ocijenila stabilnost i značajke čvrstoće i deformabilnosti, potrebno je provesti klasifikaciju stijenske mase. Klasifikacija je postupak grupiranja na osnovi međusobnih odnosa određenih značajki stijenske mase. Najpoznatija klasifikacija je Terzaghijeva, koja je utemeljena na opterećenju stijenske mase [17]. Razvojem tehnologije, usvajali su se noviji klasifikacijski sustavi, a većina ih je razvijena na osnovi stečenih iskustava kroz inženjersko građenje u stijenskoj masi.

Terzaghijeva klasifikacija predstavlja prvu racionalnu i praktičnu metodu klasificiranja. Bazira se na tome koliko se opterećenje stijenske mase može prihvatiti instalacijom podgrade od čeličnih lukova. Sredinom prošlog stoljeća, klasifikacija je bila dominantna u SAD-u u tunelogradnji, ali je utvrđeno da klasifikacija ne daje vrijednosnu informaciju o značajkama stijenske mase odnosno da previše generalizira objektivno stanje kvalitete stijenske mase. Terzaghi je uveo pojmove i opise, što je pridonijelo inženjerskogeološkim informacijama potrebnim za inženjersko projektiranje. [17]

U tablici 1 prikazana je podjela stijenske mase po čvrstoći s detaljnim opisom kako je moguće stijensku masu prepoznati na terenu. Slaba stijena spada u kategorije od potpuno razlomljene, ali kemijski netaknute (VI.) do stijene sklone bubrenju zbog prisutnih minerala gline (IX.).

Tablica 1. Podjela stijenske mase prema Terzaghijevoj klasifikaciji [17]

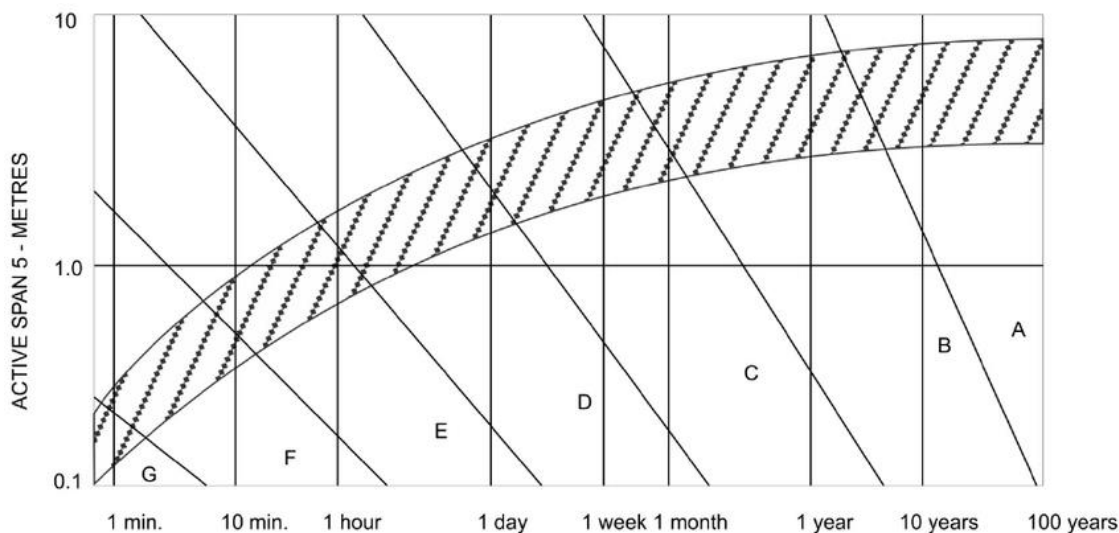
| Rock Class | Definition | Rock Load Factor H_p (in feet, B and H_t in feet) | Remark |
|--|--|---|--|
| I. Hard and intact | Hard and intact rock contains no joints and fractures. After excavation, the rock may have popping and spalling at excavated face. | 0 | Light lining required only if spalling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

Notes: The tunnel is assumed to be below the ground water table. For tunnel above water tunnel, H_p for Classes IV to VI reduces 50 %.

The tunnel is assumed excavated by blasting. For tunnel boring machine and road header excavated tunnel, H_p for Classes II to VI reduces 20 - 25 %.

Laufferova klasifikacija temeljila se na spoznajama iz područja mehanike stijena i tunela odnosno na značaju strukture stijenske mase. Lauffer sugerira poveznicu između vremena trajnosti nepodgrađenog iskopa u stijeni određenog raspona s obzirom na raznovrsne kategorije stijenske mase. Laufferova metoda vodi k razvoju Nove austrijske tunelske metode (NATM), koja uključuje tehnologije osiguranja izdrživosti stijenskog iskopa, u kojoj je ograničeno vrijeme prije nego se pojavi slom. Laufferova klasifikacija zapravo skraćuje vrijeme potrebno za ugradnju podgrade da bi se stabilizirao iskop. [18]

Na slici 14 prikazan je odnos vremena postojanosti stijenskog iskopa nepodgrađenog raspona u odnosu na različite klase stijenske mase. Slabu stijensku masu karakterizira kratko vrijeme postojanosti nepodgrađenog iskopa od najviše jednog dana (kategorija E) do jedne minute kod izrazito razlomljene stijenske mase (kategorija G). [18]



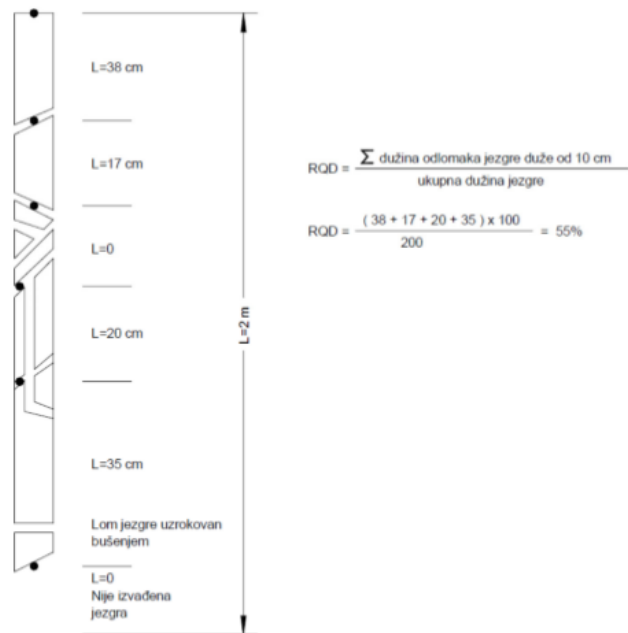
Slika 14: Odnos vremena postojanosti stijenskog iskopa nepodgrađenog raspona u odnosu na različite klase stijenske mase [18]

Rock Quality Designation (RQD) indeks je pokazatelj kvalitete stijenske mase kojeg je razvio Deere [19]. RQD je udio intaktne jezgre koji se sastoji od odlomaka većih od 100 mm (4 inča) u ukupnoj dužini izbušene jezgre. International Society for Rock Mechanics (ISRM) definira dijametar jezgre od 54.7 mm (2.15 inča) bušen dvostrukom sržnom cijevi, kao standardni za određivanje RQD indeksa. Uz standardiziran promjer, određeno je i nekoliko korekcijskih faktora za određivanje RQD indeksa za različite promjere.

Vrlo slaba stijenska masa ima RQD indeks manji od 25%, a slaba između 25-50% (tablica 2.).

Tablica 2: Predloženi odnos između RQD indeksa i kvalitete stijene [20]

| RQD (%) | Kvaliteta stijene |
|-----------|-------------------|
| < 25 | vrlo slaba |
| 25 – 50 | slaba |
| 50 – 75 | povoljna |
| 75 – 90 | dobra |
| 90 – 100 | odlična |



Slika 15: Postupak mjerenja i izračunavanja RQD indeksa [21]

Vrijednost RQD indeksa potrebna je na mjestima gdje je provedeno inženjerskogeološko kartiranje, gdje nije potrebno korištenje jezgre iz bušotina. U takvim situacijama slika stijenske mase može se dobiti iz kartiranja na površini i na osnovi rezultata prostornog kartiranja stijenske mase. Iz kartiranja na površini dobivamo prosječnu udaljenost pukotina, a prostornim kartiranjem stijenske mase je moguće kreirati trodimenzionalnu sliku odnosa pukotina u stijenskoj masi.

RQD indeks je jedan od osnovnih elemenata kod RMR i Q klasifikacije te se koristi kao element u logovima i formama pri istražnim bušenjima, ali se mora uzeti u obzir da nije dovoljan sam RQD indeks za optimalan opis stijenske mase. [19]

Rock Structure Rating (RSR) je model koji daje kvantitativnu metodu opisa stijenske mase i odabira metoda podgrađivanja iskopa tunela. RSR klasifikaciju razvili su Wickham, Tiedemann i Skinner u SAD-u i to je prvi detaljan model klasifikacije stijenske mase nakon Terzaghijeve klasifikacije. [22]

U RSR-u je mlazni beton usvojen kao sustav podgrade, a zasnovan je empirijski iz kvalitete stijenske mase. U klasifikaciji se davala važnost podacima kao što je vrijeme potrebno da se ugradi podgrada i tip podgrade koji odgovara.

Glavna karakteristika sustava je da je RSR metoda zapravo sustav bodovanja stijenske mase tj. osjenjivanja pojedinih parametara stijenske mase. U RSR-u je usvojen odnos relativnih vrijednosti određenih klasifikacijskih parametara, a i usvojene su dvije osnovne kategorije čimbenika koji djeluju na samo ponašanje stijenske mase u tunelu: faktori podgradne konstrukcije i geološki faktori. Čimbenici podgradne konstrukcije su veličina, raspon tunela, smjer širenja tunela i tehnologija iskopa, dok su geološki parametri: tip stijenske mase, srednji razmaci pukotina, orijentacije pukotina, glavni smjer smicanja, preklapanja i rasjeda, tip diskontinuiteta, karakteristike stijenske mase te trošenje ili alteracija.

Ukupna vrijednost RSR bodova koju može imati stijenska masa je 100, i ta vrijednost povezuje karakterističnu stijensku masa s podgradom, koja ovisi o načinu iskopa tunela. Zbog nejasno definiranih parametara, kako ne bi došlo do zabune, ova klasifikacija se danas rijetko koristi pri izgradnji tunela. [3]

Rock Mass Rating (RMR) klasifikacija ili geomehanička klasifikacija je sustav opisa kvalitete stijenske mase i odabira podgrade za tunele. Razvio ju je Bieniawski u Južnoj Americi [23], a usavršenu verziju RMR sustava predložio je 1989. [24]

Klasifikacija se zasniva na određivanju šest čimbenika, a to su: jednoosna tlačna čvrstoća, RQD indeks, razmak pukotina, ponašanje pukotina, uvjeti podzemne vode te orijentacija pukotina.

Klasifikacija se također temelji na bodovanju kvalitete stijenske mase, a veći broj bodova označava bolje karakteristike stijenske mase. [3]

Tablica 3: RMR klasifikacija [24]

| A. Klasifikacijski parametri i njihovi bodovi | | | | | | | | | |
|---|----------------------------------|--|--|--|--|---|--|-----|-----|
| Parametri | | | Vrijednosti parametara | | | | | | |
| 1 | Čvrstoća intaktnih stijene (MPa) | Indeks čvrstoće u točki | > 10 | 4 - 10 | 2 - 4 | 1 - 2 | Preporučuje se ispitati tlačnu čvrstoću | | |
| | | Jednoosna 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 | Razmak 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 mm Zidovi nisu Rastrošeni | Neznatno hrapave površine Zijev < 1 mm Stijenka zidova neznatno rastrošene | Neznatno hrapave površine Zijev < 1 mm Stijenka zidova jako rastrošene | Sliske 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 | Pozemna voda | Dolok na 10 m duljine tunela (l/m) | nema | < 10 | 10-25 | 25-125 | >125 | | |
| | | Odnos tlaka puk. vode i većeg gl. naprezanja | 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. Korekcije 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 | III | 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 | 1god/10 m raspona | 1 tj/ 5 m raspona | 10 h/ 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 (m) | <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 diskontinuiteta | vrlo hrapavi | hrapavi | neznatno hrapavi | glatki | skliski |
| Bodovi | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| Ispuna diskontinuiteta | bez ispune | tvrdi ispuna <5 mm | tvrdi ispuna >5mm | meka ispuna <5 mm | meka ispuna >5 mm |
| Bodovi | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 |
| Trošnost stijenki diskontinuiteta | nerastrošene | neznatno rastrošene | umjereno rastrošene | jako rastrošene | potpuno rastrošene |
| Bodovi | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |

| F. Efekt orijentacije diskontinuiteta u tunelogradnji | | | |
|---|---|------------------------------------|--------------|
| Pružanje okomito na os tunela | | Pružanje paralelno s 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° | Nagib 0-20° bez obzira na pružanje | |
| Dobro | Nepovoljno | Dobro | |

Ovom klasifikacijom stijenska masa se raspoređuje u nekoliko različitih strukturnih regija sličnih značajki, i svako područje se klasificira odvojeno. Granice između područja su rasjedi, zone drobljenja ili promjene vrste stijenske mase. Nakon klasifikacije određenih područja, sumiraju se vrijednosti parametara i dobiva se ukupna suma koja daje vrijednost RMR. Na osnovi rezultata sumiranja, stijensku masu dijelimo u pet kategorija: vrlo dobra, dobra, povoljna, slaba i vrlo slaba stijenska masa.

Slaba stijenska masa spada u IV. kategoriju i broj bodova kreće se u rasponu od 21 do 40. Kut unutarnjeg trenja materijala varira od 15-25°, a kohezija od 0.1 do 0.2 MPa. Nosivost slabe stijenske mase je od 45 do 135 T/m². Stabilan nagib pokosa je do 45°, a prosječno vrijeme postojanosti nepodgrađenog pokosa je 10 sati na 2.5 metara raspona. Vrlo slaba stijenska masa nalazi se u V. kategoriji i njen broj RMR bodova ne premašuje 21. Kut unutarnjeg trenja vrlo slabe stijenske mase ne prelazi 15°, a vrijednost kohezije je ispod 0.1 MPa. Nosivost karakteristična za vrlo slabu stijensku masu je od 30 do 45 T/m². Stabilan nagib pokosa je do 40°, a vrijeme postojanosti nepodgrađenog pokosa raspona 1 metar je 30 minuta (tablica 3.-4.).

Tablica 4: Karakteristike stijenske mase [25]

| Parametar /karakteristika stijenske mase | RMR vrijednost (razred stijenske mase) | | | | |
|--|--|---------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| | 100-81 (1) | 80-61 (2) | 60-41 (3) | 40-21 (4) | <20 (5) |
| Klasifikacija stijenske mase | Vrlo dobra | Dobra | Povoljna | Slaba | Vrlo slaba |
| Prosječno vrijeme postojanosti | 20 god/raspon 15m | 1 god/raspon 10m | 1 tjedan/raspon 5m | 10 sati/raspon 2.5m | 30 min/raspon 1m |
| Kohezija stijenske mase (MPa) | >0.4 | 0.3-0.4 | 0.2-0.3 | 0.1-0.2 | <0.1 |
| Kut unutarnjeg trenja (°) | >45° | 35°-45° | 25°-35° | 15°-25° | <15° |
| Dopuštena nosivost (T/m ²) | 600-440 | 440-280 | 280-135 | 135-45 | 45-30 |
| Stabilan nagib pokosa (°)* | >70 | 65 | 55 | 45 | <40 |

Dobra strana RMR klasifikacije je ta da je ona praktična za korištenje, ali ono loše je što je klasifikacija osjetljiva u tolikoj mjeri da već male promjene u kakvoći stijenske mase utječu na promjenu vrijednosti što može dovesti do odabira pogrešnog podgradnog sustava. Pozitivna karakteristika klasifikacije je što se može uspostaviti poveznica između RMR klasifikacije i uvjeta čvrstoće i deformabilnosti. Ukoliko pretpostavimo da je stijena Mohr-Coulombov materijal, posmična čvrstoća te stijene ovisit će o koheziji i kutu unutarnjeg trenja, a za provjeru faktora čvrstoće može se koristiti RMR metoda. [3]

Rock Mass Quality System ili Q klasifikacija temelji se na velikom broju analiza, izvedenih tunela i iskopa. Predložili su je Barton, Lien i Lunde u Norveškoj. [26]

Korištena je za određivanje osobina stijenske mase i podgrade iskopa tunela, a temelji se na procjeni kvalitete stijenske mase koja se određuje preko šest čimbenika: RQD indeks, broj skupova pukotina – J_n , faktor hrapavosti pukotina – J_r , čimbenik promjene pukotina – J_a , čimbenik pukotinske vode – J_w te čimbenik ograničenja naprezanja – SRF (in-situ naprezanja uzeta u obzir). Vrijednost Q je između 0.00001 i 1000 (u logaritamskom mjerilu), a definirana je izrazom (1):

$$Q = (RQD/J_n)(J_r/J_a)(J_w/SRF) \quad (1)$$

(RQD/J_n) predstavlja izgrađenost stijenske mase te dimenzije bloka, gdje je udio čestica gline isključen. (J_r/J_a) je veličina posmične čvrstoće između blokova u funkciji hrapavosti i promjene pukotina. Vrijednost posmične čvrstoće pukotina je jednaka $\tan^{-1}(J_r/J_a)$. Kroz odnos (J_w/SRF) izražen je aktivni potisak kroz odnos tlaka vode u pukotinama i koeficijenta SRF. SRF je opterećenje rastresene zone na lokaciji rasjednih zona ili područja stijenske mase s glinenim česticama, naprezanje kod zdravih stijenskih masa ili naprezanje nastalo gnječenjem ili bubrenjem plastičnih stijenskih masa.

Tablica 5: Q klasifikacija [26]

| Opis | | Vrijednost | Napomene | |
|---|--|------------|---|--|
| 1. Indeks kvalitete jezgre | | RQD | 1. Kada se izmjeri RQD<10 (uključujući i 0) | |
| A | vrlo slaba | 0-25 | kod izračunavanja vrijednosti Q, uzima se | |
| B | slaba | 25-50 | RQD=10 | |
| C | povoljna | 50-75 | 2. Dovoljnu točnost predstavlja iskazivanje | |
| D | dobra | 75-90 | RQD u intervalima po 5 (100, 95, 90 i.t.d.) | |
| E | odlična | 90-100 | | |
| 2. Broj skupova pukotina | | Jn | | |
| A | masivna stijena bez ili s nekoliko pukotina | 0,5-0,1 | | |
| B | jedan skup pukotina | 2 | | |
| C | jedan skup pukotina i slučajne pukotine | 3 | 1. Na križanjima tunela koristiti (3.0*Jn) | |
| D | dva skupa pukotina | 4 | | |
| E | dva skupa pukotina i slučajne pukotine | 6 | 2. Na portalima koristiti (2.0*Jn) | |
| F | tri skupa pukotina | 9 | | |
| G | tri skupa pukotina i slučajne pukotine | 12 | | |
| H | četiri ili više skupova pukotina, slučajne pukotine, jako ispućala stijenska masa | 15 | | |
| J | razdrobljena stijena slična tlu | 20 | | |
| 3. Indeks hrpavosti pukotina | | Jr | | |
| a) Kontakt zidova pukotina | | | | |
| b) Kontakt zidova pukotina prije posmika od 10 cm | | | | |
| A | diskontinualne pukotina | 4 | 1. Dodati 1,0 ako je srednji razmak kod mjerodavnog skupa pukotina veći od 3 m. | |
| B | hrpave ili nepravilne, valovite | 3 | | |
| C | glatke, valovite | 2 | | |
| D | skliske, valovite | 1,5 | | |
| E | hrpave ili nepravilne, ravne | 1,5 | | |
| F | glatke, ravne | 1,0 | | |
| G | skliske, ravne | 0,5 | | |
| c) Nema kontakta zidova pri posmiku | | | | |
| H | glinovita ispuna dovoljne debljine da spriječi kontakt stijenci pukotina | 1,0 | | |
| J | pjeskovita, šljunčana ili zdrobljena ispuna dovoljne debljine da spriječi kontakt stijenci pukotine | 1,0 | | |
| 4. Indeks alteracije pukotine | | Ja | Približni rezidualni kut | Rezidualni kut trenja odnosi se na produkte alteracije ako postoje |
| a) Kontakt zidova pukotine | | | trenja | |
| A | zbijena, zacijeljena, čvrsta pukotina, nerazmekšavajuća, nepropusna ispuna | 0,75 | | |
| B | nepromijenjen zid pukotine, površina samo s mrljama | 1,0 | 25-35 | |
| C | neznatno promijenjeni zid pukotine, nerazmekšavajuća mineralna prevlaka, pjeskovite čestice, dezintegrirana stijenska masa bez gline i dr. | 2,00 | 25-30 | |
| D | prašinasta ili pjeskovito-glinovita prevlaka, mali dio glinene frakcije (nerazmekšavajuća) | 3,00 | 20-25 | |
| E | prevlaka od glinenih materijala, meka ili s niskim kutem trenja (diskontinuirana prevlaka, 1-2 mm ili manje debljine) | 4,00 | 8-16 | |

| b) Kontakt zidova prije posmika od 10 cm | | | |
|---|---|---------------|-------|
| F | pjeskovite čestice, dezintegrirana stijena bez gline i dr. | 4,0 | 25-30 |
| G | jako prekonsolidirana nerazmekšavajuća glinovita ispunna (neprekinuta, <5 mm debljine) | 6,00 | 16-24 |
| H | srednje ili malo prekonsolidirana, razmekšavajuća glinovita ispunna (neprekinuta <5 mm debljine) | 8,00 | 12-16 |
| J | bujajuća glinovita ispunna, montmorilonit, (neprekinuta <5mm debljine), vrijednosti Ja ovise o postotku bujanjućih čestica, pristupu vode i dr. | 8.0 -12.0 | 6-12 |
| c) Nema kontakta zidova pukotina pripismiku | | | |
| K,L,M | zone ili pojasevi dezintegrirane ili zdrobljene stijene i gline (vidi G, H, i J za opis uvjeta u pogledu gline) | 6, 8 ili 8-12 | 6-24 |
| N | zone ili pojasevi prašnaste ili pjeskovite gline, mali udio glinene frakcije, nerazmekšavajuća | 5,00 | |
| O,P,R | debeli neprekinuta zona ili pojas gline (vidi G, H, i J za opis uvjeta u pogledu gline) | 6, 8 ili 8-13 | 6-24 |

| 5. Faktor pukotinske vode | | Jw | Prilžni tlak vode (bar) | 1. Faktori C i D su grubo procijenjeni, povećati Jw ako je ugrađena drenaža 2. Nije razmatrano smrzavanje |
|---------------------------|---|----------|-------------------------|--|
| A | iskop u suhom ili manji dotok vode (< 5 l/min, lokalno) | 1 | <1 | |
| B | srednji dotok ili tlak, mjestimično isprana pukotinska ispunna | 0,66 | 1,0-2,5 | |
| C | veliki dotok ili visoki tlak vode u zdravoj stijeni s pukotinama bez ispune | 0,50 | 2,5-10,0 | |
| D | veliki dotok ili visoki tlak vode, značajno ispiranje pukotinske ispune | 0,34 | 2,5-10,0 | |
| E | iznimno velik dotok ili tlak vode kod miriranja, opada s vremenom | 0,2-0,1 | >10 | |
| F | izuzetno veliki dotok ili tlak vode bez zamjetnog opadanja s vremenom | 0,1-0,05 | >10 | |

| 6. Faktor redukcije naprezanja | | SRF | | 1. Reducirati vrijednosti SRF za 25 - 50% ako njerodavne posmjerne zone ne presjecaju iskop 2. Za izmjereno jako anizotropno polje naprezanja: kada je $5 < \phi / \phi_t < 10$ reducirati ϕ i ϕ_t na $0,8\phi$ i $0,8\phi_t$ kada je $\phi / \phi_t \geq 10$ reducirati ϕ i ϕ_t na $0,6\phi$ i $0,6\phi_t$ 3. U slučajevima kad je debljina radsljaja manja od širine raspona tunela SRF treba povećati s 2,5 na 5 (vidi H) |
|---|--|-------|--|--|
| a) Oslabljene zone sijaku iskopa, što može uzrokovati rastresanje stijenske mase pri izvođenju iskopa | | SRF | | |
| A | učestala pojava rasjednih zona s glinom ili raspadnutom stijenskom masom, rastresena okolna stijena (sve dubine) | 10,00 | | |
| B | jedna rasjedna zona s glinom ili raspadnutom stijenskom masom (dubina iskopa <50 m) | 5,00 | | |
| C | jedna rasjedna zona s glinom ili raspadnutom stijenskom masom (dubina iskopa >50 m) | 2,50 | | |
| D | učestale rasjedne zone u zdravoj stijeni bez gline, rastresena okolna stijenska masa (sve dubine) | 7,50 | | |
| E | jedna rasjedna zona u zdravoj stijeni bez gline (dubina iskopa < 50 m) | 5,00 | | |
| F | jedna rasjedna zona u zdravoj stijeni bez gline (dubina iskopa > 50 m) | 2,50 | | |
| G | rastresene otvorene pukotine, jako ispucana stijenska masa (sve dubine) | 5,00 | | |

| b) Zdrava stijena, problemi naprezanja | | η_c / η_1 | η / η_1 | SRF |
|--|---|-------------------|-----------------|-----------|
| H | niska naprezanja, blizu površine | >200 | >13 | 2,5 |
| J | srednja naprezanja | 200-10 | 13-0,66 | 1,0 |
| K | visoka naprezanja, vrlo zbijena struktura, (povdjna za stabilnost, nepovoljna za stabilnost zidova) | 10-5 | 10-6 | 10-7 |
| L | gorski udari slabog intenziteta (masivna stijena) | 5-2,5 | 0,33-0,16 | 5,0-10,0 |
| M | gorski udari jakog intenziteta (masivna stijena) | <2,5 | <0,16 | 10,0-20,0 |
| c) Zgnječena stijenska masa, plastični tok stijenske mase pod utjecajem visokog naprezanja | | SRF | | |
| N | slabi tlak zgnječene stijenske mase | 5,0-10,0 | | |
| O | jaki tlak zgnječene stijenske mase | 10,0-20,0 | | |
| d) Stijenska masa podložna bujanju, intenzitet bujanja ovisan o vodi | | | | |
| P | slabi tlak stijenske mase prilikom bubrenja | 5,0-10,0 | | |
| R | jaki tlak stijenske mase prilikom bubrenja | 10,0-15,0 | | |

Kod procjene J_n faktora inženjeri se često susreću s listanjem, škrljavošću, plohama cijepanja i slojevitosti te se on usvaja kao sustav pukotina. Ukoliko se vidi svega nekoliko diskontinuiteta ili ako zbog istih dolazi do pojave kao što je pucanje jezgre, iste se usvajaju kao puke pukotine. Faktori J_r i J_a predstavljaju posmičnu čvrstoću pukotina i relevantni su za najslabiji sustav pukotina ili diskontinuitet s glinom za određeno promatrano područje. Ukoliko je taj sustav pukotina ili diskontinuitet s glinenim česticama pozitivno orijentiran, usvaja se vrijednost drugog sustava pukotina ili diskontinuiteta s glinom, koji može značajnije utjecati na sigurnost, iako isti ima veću vrijednost J_r/J_a .

Ukoliko stijenska masa sadrži glinene čestice, koeficijent SRF se usvaja prema manjem opterećenju i tada je od manjeg utjecaja čvrstoća intaktne stijene. Ako su pukotine male i gotovo nema gline u stijenskoj masi, čvrstoća intaktne stijene postaje relevantna, a stabilnost ovisi o poveznici čvrstoće stijenske mase i naprezanja u njoj. Tlačna i vlačna čvrstoća intaktne stijene ispituje se u smjeru relevantnom za stabilnost stijenske mase, što je izrazito bitno kod anizotropnosti stijenske mase. Klasična procjena čvrstoće važna je kod stijenske mase koja pri vlažnim uvjetima ili uvjetima saturacije gubi značajke čvrstoće.

Na osnovi Q indeksa, stijenska masa se može rasporediti u devet kategorija, a to su: izuzetno slaba, izrazito slaba, vrlo slaba, slaba, povoljna, dobra, vrlo dobra, izrazito dobra i izuzetno dobra.

Grimstad i Barton [27] su predložili podgradne sustave za određene Q indekse i dimenzije iskopa, i podijelili ih u nekoliko kategorija: nepodgrađeni prostor između geotehničkih sidara, mjestimično sidrenje geotehničkim sidrima, sustavno sidrenje geotehničkim sidrima bez i sa mlaznim betonom, mikroarmirani mlazni beton različitih debljina bez ili s armiranim lukovima od mlaznog betona sa sidrenjem te lijevani armirani beton.

Na temelju Q – indeksa ustanovljena je poveznica s RMR klasifikacijom, pritiskom na podgradni sustav, deformacijom stijenske mase te s brzinom valova posmika u stijenskoj masi. [27]

Geological Strength Index ili GSI klasifikacija se temelji na hipotezi da se stijenska masa sastoji od velikog broja slučajno orijentiranih diskontinuiteta, toliko da se može smatrati izotropnom

stijenskom masom, odnosno takvu klasifikaciju nećemo koristiti za stijenske mase s razumljivo definiranim dominantnim strukturalnim orijentacijama.

RMS i Q klasifikacija ovise od RQD indeksu koji je kod većine slabih stijena jednak nuli pa je bilo neophodno uvesti alternativan način klasifikacije stijenske mase. Kako nova klasifikacija ne bi koristila RQD, potrebno se bazirati na geološka opažanja karakteristika stijenske mase. GSI klasifikaciju utemeljili su Hoek, Marinos i Benisi, a u njoj su uspostavili vezu s RMR klasifikacijom. [28]

Za $RMR_{76} > 18$ vrijedi da je $GSI = RMR_{76}$. (2)

Za $RMR_{89} > 23$ vrijedi da je $GSI = RMR_{89} - 5$ (3)

Za oba izraza (2,3) usvojeno je da se orijentacija pukotina ne uzima u obzir, a da je stanje podzemne vode suho. Kada su vrijednosti $RMR_{76} < 18$ i $RMR_{89} < 23$, nije moguće koristiti vezu s RMR klasifikacijom, već se koristi Q klasifikacija. Pri korištenju Q klasifikacije moraju se uzeti faktori redukcije pukotinske vode (J_w) i naprezanja (SRF) s 1 i tako korigirana Q klasifikacija (Q') se povezuje s GSI i glasi (4):

$GSI = 9 \ln Q' + 44$ (4)







Na temelju litologije, konstrukcije i uvjeta površine diskontinuiteta u stijenskoj masi, vizualnim ispitivanjem zasjeka stijenske mase te površinskim iskopima određuje se GSI indeks, koji daje kvalitetan opis stijenske mase. GSI indeks je lako odrediti na terenu preko blokovitosti stijenske mase i uvjetima diskontinuiteta.

Izdanci su dobar izvor podataka, ali nedostatak zbog površinske relaksacije, trošenja i/ili alteracije nadomješta GSI, uzimajući u obzir utjecaj trošenja u odnosu na dubinu iskopa. Za određivanje GSI, iskopi lica tunela i pokosa su najpouzdaniji izvor informacija jer se nalaze blizu ili u istoj stijeni kao i konstrukcija koju se ispituje. Poanta određivanja GSI je određivanja svojstava neporemećene stijenske mase u kojima će se izvršiti određen iskop, ali uzimajući u obzir efekt miniranja doći će do prekonzervativnih rješenja. Ukoliko nema neporemećenih podataka iz bušotina, geolog mora pokušati otkriti GSI vrijednost iz struktura u stijenskoj masi.

Taj problem je nešto manji u slaboj, oštećenoj stijenskoj masi jer veličinu površinske oštećenosti nastalu iskopom uspoređujemo s onom koja već postoji u stijenskoj masi. [3]

GSI indeks slabe stijenske mase je između 10 i 35 (tablica 6.). Karakterizira ju blokovita/poremećena struktura odnosno djelomično razlomljena struktura s mnogo setova diskontinuiteta (GSI=35) do listićave, tektonski razlomljene slabe stijenske mase s potpunim nedostatkom blokovitosti (GSI=10). Opadanjem GSI indeksa smanjuje se povezanost stijenskih fragmenata i pada kvaliteta stijenski diskontinuiteta.




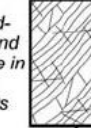
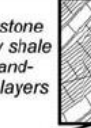
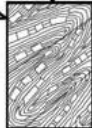
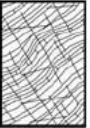

Tablica 6: Tablica za procjenu GSI stijenske mase [29]

| Geološki indeks čvrstoće | | STANJE POVRŠINE | |
|--|---|---|---|
| <p>Iz opisa strukture i stanja stijenski diskontinuiteta neke stijenske mase, odaberite odgovarajuću kućicu u dijagramu. Procijenite GSI indeks, pri čemu se isti ne određuje jako precizno (npr. 38), već se daje raspon vrijednosti (npr. 36-42). Također je vrlo važno da se Hoek-Brownov kriterij upotrebljava za stijenske mase u kojima je veličina pojedinih blokova mala u odnosu na veličinu iskopa u dotičnoj stijenskoj masi (veličina blokova bi trebala biti otprilike 1/4 veličine iskopa). Ako su blokovi veći od toga slomom će upravljati struktura, a Hoek-Brownov kriterij nije primjenjiv.</p> | | <p>VRLO DOBRO Vrlo hrpaava, svježa površina</p> | <p>DOBRO Gruba, malo trnina površina s žljezovitom prevlakom</p> |
| | | <p>POVOLJNO Gruba, omeđeno trnina ili atakarna površina</p> | <p>LOŠE Zagađena, jako trnina površina s kompaktnom prevlakom ili ispunom u obliku oštrobriđnih fragmenata</p> |
| | | <p>VRLO LOŠE Zagađena, jako trnina površina s malom glinom prevlakom ili ispunom</p> | |
| STRUKTURA | OPADANJE KVALITETE STIJENKI DISKONTINUITETA | | |
|  <p>INTAKTNA ILI MASIVNA - Intaktna stijenska masa ili masivna stijena s vrlo malo međusobno jako razmaknutih diskontinuiteta</p> | 90 | <p>NEPRIMJENJIVO PODRUČJE</p> | |
|  <p>BLOKOVITA - Vrlo dobro vezana neporemećena stijenska masa koja se sastoji od kockastih blokova koji su omeđeni s tri ortogonalna seta diskontinuiteta</p> | 80 | | |
|  <p>VRLO BLOKOVITA - povezana, djelomice razlomljena stijenska masa s oštrobriđnim blokovima koji su omeđeni s četiri i više setova diskontinuiteta</p> | 70 | | |
|  <p>BLOKOVITO/POREMEĆENA - Borana i/ili rasjedana stijenska masa s oštrobriđnim blokovima koji su omeđeni s mnogo setova diskontinuiteta</p> | 60 | | |
|  <p>RASPADNUTA - Slabo vezana, jako razlomljena stijenska masa s mješavinom oštrobriđnih i zaobljenih stijenskih fragmenata</p> | 50 | | |
|  <p>LISTIČAVA/LAMINIRANA/TEKTONIZIRANA - Tanko laminirana ili listićava i tektonski razlomljena slaba stijena. Malo razmaknuta škriljavost prevladava nad drugim setovima diskontinuiteta, što rezultira potpunim nedostatkom blokovitosti.</p> | 40 | | |
| | 30 | 20 | 10 |
| | NEPRIMJENJIVO PODRUČJE | | |

Najbolji izvori podataka u dubini su jezgre iz bušotine, a podatke je potrebno ekstrapolirati iz jednodimenzionalnih iz jezgre u trodimenzionalne podatke za stijensku masu in situ. Bitno je da se podaci iz iskopa pokosa, lica tunela i jezgre bušotine ekstrapoliraju na stijensku masu iza kosine ili čela tunela. [3]

U tablici 7 prikazana je GSI klasifikacija za fliš koji je ranije spomenut kao slaba stijenska masa podložna trošenju.

Tablica 7: Rasponi GSI vrijednosti različitih komponenta fliša procijenjeni na usjecima i jezgrama bušotina [30]

| GSI FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH (Marinos.P and Hoek. E, 2000) | | SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes) | | | | |
|---|--|--|---|--|---|---|
| From a description of the lithology, structure and surface conditions (particularly of the bedding planes), choose a box in the chart. Locate the position in the box that corresponds to the condition of the discontinuities and estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than giving GSI = 35. Note that the Hoek-Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for fair, poor and very poor conditions. Water pressure does not change the value of GSI and it is dealt with by using effective stress analysis. | | VERY GOOD - Very rough, fresh unweathered surfaces | GOOD - Rough, slightly weathered surfaces | FAIR - Smooth, moderately weathered and altered surfaces | POOR - Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments | VERY POOR - Very smooth slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings |
| COMPOSITION AND STRUCTURE | | | | | | |
|  | A. Thick bedded, very blocky sandstone The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability. | 70 60 | A | | | |
|  | B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone | | B | | | |
|  | C. Sandstone and siltstone in similar amounts | | C | | | |
|  | D. Siltstone or silty shale with sandstone layers | | D | | | |
|  | E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers | | E | | | |
| C, D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H. | | | | | | |
|  | F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure | | | 30 20 | F | |
|  | G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers | | | | G | |
|  | H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces. | | | | H | 10 |

4. ČVRSTOĆA STIJENSKE MASE

Određivanje parametara čvrstoće stijenske mase i njezine deformabilnosti je glavni izazov inženjera, a određivanje parametara čvrstoće u slaboj stijenskoj masi, koja je podložna trošenju i degradaciji parametara čvrstoće u vrlo kratkom vremenu je još veći izazov. Svaka stijenska masa je specifična zbog čega je za određivanje parametara čvrstoće potrebno u obzir uzeti različite faktore i promatrati različite elemente stijenske mase. Promatraju se dijelovi stijenske mase i parametri koji djeluju na njihovu posmičnu čvrstoću. Oblik, hrapavost površine, stanje trošenja stijene na površini i ispuna su parametri koji utječu na čvrstoću diskontinuiteta. Kod stijenske mase je to tlačna čvrstoća, kut trenja intaktne stijene te udaljenost i ponašanje diskontinuiteta, a kod intaktne stijene uzima se u obzir faktor trošenja čvrstoće intaktne stijene kroz vremensko trajanje konstrukcije u određenoj stijenskoj masi. [3]

4.1. Čvrstoća slabe stijenske mase

Parametar čvrstoće, kao jedini intrinzični parametar matrice stijena priznat u svim klasifikacijama, nije lako dobiti za neke slabe stijene. Na primjer, vulkanske stijene se potpuno raspadaju uronjene u vodu, dok se neke vrste muljnjaka mogu slomiti kad im padne sadržaj vlage. [31,32]

Vremenske prilike, otvori, hrapavost i ispunjenja u stijenskoj masi smatraju se parametrima za procjenu posmične čvrstoće slabe stijenske mase. Tlačna čvrstoća slabih stijena ne prelazi 50 MPa. Stijene poput pješčenjaka, mekog vapnenca, škriljevca povećanjem vlage postaju mekše, ubrzava se vrijeme raspada te dolazi do velikih volumnih promjena. [33]

Slabe stijene poznate su kao stijene manje povoljnih mehaničkih svojstava od tvrdih stijena zbog niskog stupnja litifikacije ili zbog propadanja strukturnih veza. Njihova svojstva pogoršavala su se vanjskim utjecajima. [34]

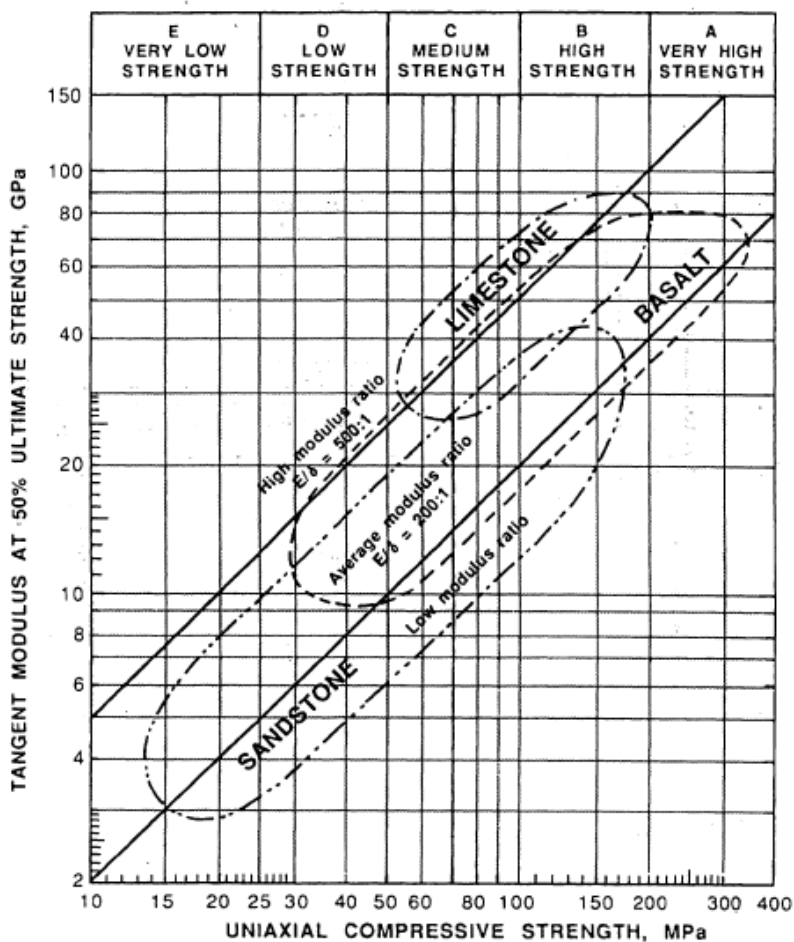
Jednostavnim pokusima na terenu određuje se jednoosna tlačna čvrstoća koja se kreće u rasponu od 0.25–1 MPa za ekstremno slabu stijenu do 5–25 MPa za slabu stijenu. Ekstremno slaba stijenska masa prepoznatljiva je po lakoći urezivanja nokta u nju, dok kod slabe stijenske mase

postoje teškoće prilikom guljenja džepnim nožićem, a moguće je napraviti i plitka urezivanja jakim udaranjem geološkim čekićem (tablica 8.).

Tablica 8: Procjena jednoosne čvrstoće jednostavnim pokusima na terenu [4]

| Grupa | Opis | Terenska identifikacija | Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa) | |
|---------|------|--------------------------|--|------------|
| tlo | S1 | vrlo meka glina | lako prodiranje od nekoliko inča rukom | <0,025 |
| | S2 | meka glina | lako prodiranje od nekoliko inča palcem | 0,025-0,05 |
| | S3 | čvrsta glina | može se prodrijeti nekoliko inča palcem sa srednjim naporom | 0,05-0,10 |
| | S4 | kruta glina | lako urezivanje palcem, ali prodiranje samo uz veliki napor | 0,10-0,25 |
| | S5 | vrlo kruta glina | lako urezivanje noktom | 0,25-0,50 |
| | S6 | tvrdna glina | poteškoće prilikom urezivanja noktom | >0,50 |
| stijena | R0 | ekstremno slaba stijena | urezivanje noktom | 0,25-1,0 |
| | R1 | vrlo slaba stijena | drobljenje uslijed jakog udarca geološkim čekićem, može se guliti džepnim nožićem | 1,0-5,0 |
| | R2 | slaba stijena | poteškoće prilikom guljenja džepnim nožićem, plitka urezivanja ačinjena jakim udarcima geološkim čekićem | 5,0-25 |
| | R3 | srednje čvrsta | stijena ne može se zagrebati ili guliti džepnim nožićem, uzorak se raspucava uslijed jednog jakog udarca geološkim čekićem | 25-50 |
| | R4 | čvrsta stijena | potreban više nego jedan udarac geološkog čekića da bi se uzorak raspuknuo | 50-100 |
| | R5 | vrlo čvrsta stijena | potrebni mnogi udarci geološkog čekića da bi se uzorak raspuknuo | 100-250 |
| | R6 | ekstremno čvrsta stijena | uzorak je moguće otkinuti jedino pomoću geološkog čekića | >250 |

Na slici 16 prikazana je razlika vapnenca i pješčenjaka te odnos njihovih jednoosnih tlačnih čvrstoća i modula elastičnosti odnosno krutosti stijenske mase. Vapnenac ima visok modul elastičnosti, a jednoosna čvrstoća varira od srednje čvrste (50 MPa) do vrlo čvrste stijene (200 MPa). Pješčenjak karakterizira niski do srednji modul elastičnosti, a njegova čvrstoća je izrazito niska, od 15 MPa do vrlo visoke od 170 MPa.



Slika 16: Prikaz naprezanje – deformacija za tri vrste stijena [35]

Po ISO klasifikaciji (tablica 9.) čvrstoće stijenskih masa kao što su vapnenac i silit variraju od ekstremno slabih (<1 MPa) do srednjih (25–50 MPa), a čvrstoća pješčenjaka varira od ekstremno slabe (<1 MPa) do slabe (5–25 MPa).

Tablica 9: Klasifikacija stijenske mase na osnovi jednoosne tlačne čvrstoće [15]

| Term for uniaxial compressive strength | Symbol | Strength (MPa) | Ranges for common rock materials | | | | |
|--|--------|----------------|---|--------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------|
| | | | <i>Granite, basalt, gneiss, quartzite, marble</i> | <i>Schist, sandstone</i> | <i>Limestone, siltstone</i> | <i>Slate</i> | <i>Concrete</i> |
| Extremely weak* | EW | <1 | | ** | ** | | |
| Very weak | VW | 1–5 | | ** | ** | ** | ** |
| Weak | W | 5–25 | | ** | ** | ** | ** |
| Medium strong | MS | 25–50 | ** | | ** | ** | |
| Strong | S | 50–100 | ** | | | | |
| Very strong | VS | 100–250 | ** | | | | |
| Extremely Strong | ES | >250 | ** | | | | |

*Some extremely weak rocks behave as soils and should be described as soils.

**Indicates the range of strength of rock material.

Po Walthamu (tablica 10.) srednja jednoosna tlačna čvrstoća slabije stijene pješčenjaka varira od 20 do 70 MPa za različite vrste pješčenjaka. Srednja čvrstoća vapnenca je u intervalu od 25 do 100 MPa, a srednja jednoosna čvrstoća krede je 15 MPa. Jednoosna tlačna čvrstoća muljnjaka varira od 10 do 50 MPa, a ugljena od 2 do 100 MPa. U tablici 10 se može vidjeti jednoosna tlačna čvrstoća soli, gipsa i drugih ranije spomenutih slabih stijena.

Tablica 10: Čvrstoća stijenske mase [36]

| rock type | density dry t/m ³ | porosity % | dry UCS range MPa | dry UCS mean MPa | UCS saturated MPa | modulus of elasticity GPa | tensile strength MPa | shear strength MPa | friction angle ϕ° |
|---------------------------|------------------------------|------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|
| Granite | 2.7 | 1 | 50–350 | 200 | | 75 | 15 | 35 | 55 |
| Basalt | 2.9 | 2 | 100–350 | 250 | | 90 | 15 | 40 | 50 |
| Greywacke | 2.6 | 3 | 100–200 | 180 | 160 | 60 | 15 | 30 | 45 |
| Sandstone – Carboniferous | 2.2 | 12 | 30–100 | 70 | 50 | 30 | 5 | 15 | 45 |
| Sandstone – Triassic | 1.9 | 25 | 5–40 | 20 | 10 | 4 | 1 | 4 | 40 |
| Limestone – Carboniferous | 2.6 | 3 | 50–150 | 100 | 90 | 60 | 10 | 30 | 35 |
| Limestone – Jurassic | 2.3 | 15 | 15–70 | 25 | 15 | 15 | 2 | 5 | 35 |
| Chalk | 1.8 | 30 | 5–30 | 15 | 5 | 6 | 0.3 | 3 | 25 |
| Mudstone – Carboniferous | 2.3 | 10 | 10–50 | 40 | 20 | 10 | 1 | | 30 |
| Shale – Carboniferous | 2.3 | 15 | 5–30 | 20 | 5 | 2 | 0.5 | | 25 |
| Clay – Cretaceous | 1.8 | 30 | 1–4 | 2 | | 0.2 | 0.2 | 0.7 | 20 |
| Coal | 1.4 | 10 | 2–100 | 30 | | 10 | 2 | | |
| Gypsum | 2.2 | 5 | 20–30 | 25 | | 20 | 1 | | 30 |
| Salt | 2.1 | 5 | 5–20 | 12 | | 5 | | | |
| Hornfels | 2.7 | 1 | 200–350 | 250 | | 80 | | | 40 |
| Marble | 2.6 | 1 | 60–200 | 100 | | 60 | 10 | 32 | 35 |
| Gneiss | 2.7 | 1 | 50–200 | 150 | | 45 | 10 | 30 | 30 |
| Schist | 2.7 | 3 | 20–100 | 60 | | 20 | 2 | | 25 |
| Slate | 2.7 | 1 | 20–250 | 90 | | 30 | 10 | | 25 |

5. DEGRADACIJA PARAMETARA ČVRSTOĆE

5.1. Trošenje

Destrukcija je proces u kojem se stijenska masa prirodno raspada pod utjecajem atmosferilija. Trošenje je proces promjene i usitnjenja stijene ili tla na ili blizu Zemljine površine fizičkim, kemijskim ili biološkim procesima djelujući na boju, teksturu, sastav, čvrstoću i oblik. Trošenje je in situ proces prilikom kojega se ne odvija nikakav transport [37]. Proces raspadanja dovodi do stvaranja rezidualnog materijala koji se sastoji od minerala i dijelova stijene nepromijenjenih u odnosu na originalnu stijenu [38]. Kao što je i ranije spomenuto, slaba stijenska masa podložna je trošenju u vrlo kratkom vremenskom periodu.

Dubina trošenja ovisi o vremenu trajanja trošenja, klimi i tipu stijene. Stijene kao što je šejl, porozni pješčenjak i slabi vapnenac troše se do većih dubina od granitnih i metamorfnih stijena. U klimatskim ekstremnim uvjetima, kao što su tropske šume ekvatora i periglacialna područja, događaju se najdublja trošenja stijenskih masa. U područjima na većim nadmorskim visinama i onim s hladnijom klimom vrlo je važno raspadanje pod utjecajem leda. Kemijski procesi koji djeluju na stijensku masu ubrzavaju se u toplijim i vlažnijim klimama, a tom ubrzavanju pomažu i organske kiseline koje se nalaze u biljnim pokrovima. [39]

Mehaničko (fizičko) trošenje stijena podrazumijeva njihovo razaranje u manje komadiće pri čemu ne dolazi do promjene kemijskog i mineralnog sastava. Pukotine stvorene pod vlačnim naprezanjem uslijed erozije, raspadanje stijenske mase zbog dnevnih promjena temperature te raspadanje zbog vode u pukotinama odnosno smrzavanja i širenja leda su procesi koje uvelike pridonose fizičkom trošenju stijenske mase. Uz to, bitnu ulogu u fizičkom trošenju ima i gubitak i povećanje vode u glinama, širenje korijena biljaka u pukotinama i njihovo prodiranje u pore te rast kristala soli na mjestima isparavanja podzemne vode. [40]

Uzroci kemijskog trošenja su otapanje gipsa i kalcita u vapnencima i pješčenjacima, fragmentarno odnošenje otopljenih komponentni, hrđanje i razgradnja minerala željeza te stvaranje minerala gline reagiranjem silikata s vodom.

U tablici 11 prikazani su stupnjevi trošenja stijenske mase od svježje stijene (I) do rezidualnog tla (VI). Slabo trošna stijena (II) (engl. slightly weathered) se na terenu prepoznaje po promijenjenoj boji koju uzrokuje trošenje, a diskontinuiteti mogu biti izvana oslabljeni u odnosu na svježju stijensku masu (I) (engl. fresh), koja nema vidljivih znakova trošenja, osim promijenjene boje na površinama glavnih diskontinuiteta. Kod umjereno trošne stijene (III) (engl. moderately weathered) manje od pola materijala stijenske mase je raspadnuto u tlo, a kontinuiranu jezgru čini svježja stijenska masa ili ona promijenjene boje. Kod jako rastrošene stijenske mase (IV) (engl. highly weathered) više od pola materijala stijenske mase je raspadnuto u tlo, a diskontinuiranu jezgru čini svježja stijenska masa ili ona promijenjene boje. Potpuno raspadnuta stijenska masa (V) (engl. completely weathered) prepoznatljiva je po raspadnutosti cijelog materijala stijenske mase u tlo, ali je originalna struktura još uvijek uglavnom intaktna. Kod rezidualnog tla (VI) (engl. residual soil) kompletna stijenska masa je pretvorena u tlo, a struktura i građa materijala su uništene.

Čvrstoća slabe stijenske mase kreće se od srednje slabe (5–12.5 MPa), koju nije moguće slomiti rukom na terenu do vrlo slabe (0.6–1.5 MPa), koju je moguće slomiti rukom na terenu (tablica 12.).

Tablica 11: Stupnjevi trošenja stijenske mase [41]

| Pojam | Simbol | Opis | Stupanj |
|---|--------|---|---------|
| Svježja (engl. fresh) | F | Nema vidljivih znakova trošenja materijala stijenske mase, možda blaga promjena boje na površinama glavnih diskontinuiteta. | I |
| Slabo trošna (engl. slightly weathered) | SW | Promjena boje ukazuje na trošenje materijala stijene a diskontinuiteti mogu ponegdje biti izvana oslabljeni u odnosu na stijensku masu u svježem staniu. | II |
| Umjereno trošna (engl. moderately weathered) | MW | Manje od pola materijala stijenske mase je dekompozirano i/ili raspadnuto u tlo. Svježja stijenska masa ili ona promijenjene boje je prisutna kao kontinuirana okosnica ili jezgra. | III |
| Jako rastrošena (engl. highly weathered) | HW | Više od pola materijala stijenske mase je dekompozirano i/ili raspadnuto u tlo. Svježja stijenska masa ili ona promijenjene boje je prisutna kao diskontinuirana okosnica ili jezgra. | IV |
| Potpuno raspadnuta (engl. completely weathered) | CW | Cijeli materijal stijenske mase je dekompoziran i/ili raspadnut u tlo. Originalna struktura stijenske mase je još uvijek uglavnom intaktna. | V |
| Rezidualno tlo (engl. residual soil) | RS | Kompletna stijenska masa je pretvorena u tlo. Struktura i građa materijala stijenske mase su uništene. Postoji velika promjena u volumenu, ali tlo nije značajnije transportirano. | VI |

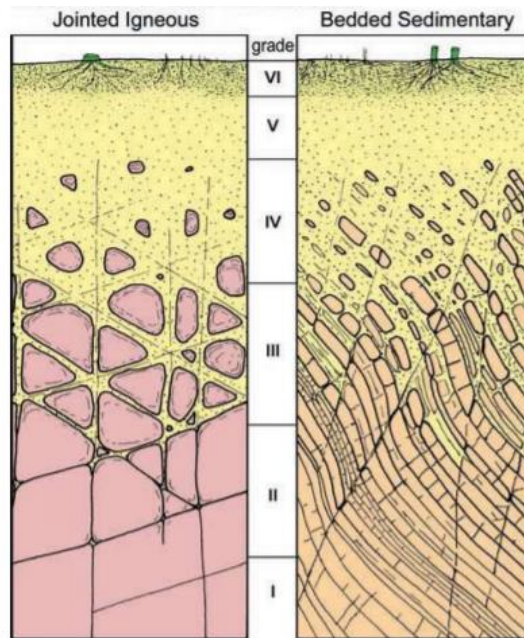
Tablica 12: Terensko određivanje čvrstoće stijenske mase [36]

| Opis stijene/tla | UCS (MPa) | In situ svojstva |
|------------------------|-----------|--|
| Vrlo čvrsta stijena | >100 | slama se pod jakim udarcima čekića |
| Čvrsta stijena | 50-100 | može se slomiti srednje jakim udarcem čekića |
| Srednje čvrsta stijena | 12,5-50 | može se zarezati šiljkom čekića |
| Srednje slaba stijena | 5-12,5 | ne može se slomiti rukom |
| Slaba stijena | 1,5-5 | mrvi se pod udarcima čekića |
| Vrlo slaba stijena | 0,6-1,5 | slama se pod rukom |
| Vrlo kruto tlo | 0,3-0,6 | urezuje se noktom |
| Kruto tlo | 0,15-0,3 | ne može se mijesiti prstima |
| Čvrsto tlo | 0,08-0,15 | mijesi se prstima |
| Meko tlo | 0,04-0,08 | lagano se mijesi prstima |
| Vrlo meko tlo | <0,04 | curi između prstiju |

U tablici 13 vidljiva je čvrstoća stijenske mase s obzirom na stupanj njene trošnosti te profil trošnosti za magmatske stijene (Slika 17 lijevo) i sedimentne stijene (Slika 17 desno) kakav je moguće pronaći na terenu. Sve stijenske mase mijenjaju karakteristike s dubinom (prema tipičnim profilima trošnosti). Na površini, gdje su izloženije trošenju i stupanj trošnosti je viši (stupanj VI), a jednoosna tlačna čvrstoća povećava se s dubinom i najveća je na stupnju I.

Tablica 13: Stupanj trošnosti i svojstva određenih tipova stijenske mase [36]

| Grade of weathering | | I | II | III | IV | V |
|---|---------|-------|------|-------|-------|-----|
| Granite: unconfined compressive strength | MPa | 250 | 150 | 5-100 | 2-15 | <1 |
| Triassic sandstone: unconfined compressive strength | MPa | 30 | 15 | 5 | 2 | 0 |
| Carboniferous sandstone: rock quality designation | % | 80 | 70 | 50 | 20 | <15 |
| Chalk: standard penetration test | N value | >35 | 30 | 22 | 17 | 75 |
| Chalk: safe bearing pressure | kPa | 1000 | 750 | 400 | 200 | |
| Triassic mudstone: safe bearing pressure | kPa | 400 | 250 | 150 | 50 | |
| Triassic mudstone: clay particle fraction | % | 10-35 | | 10-35 | 30-50 | |
| Typical depth in Britain | metres | | 5-30 | 1-5 | 1-2 | |



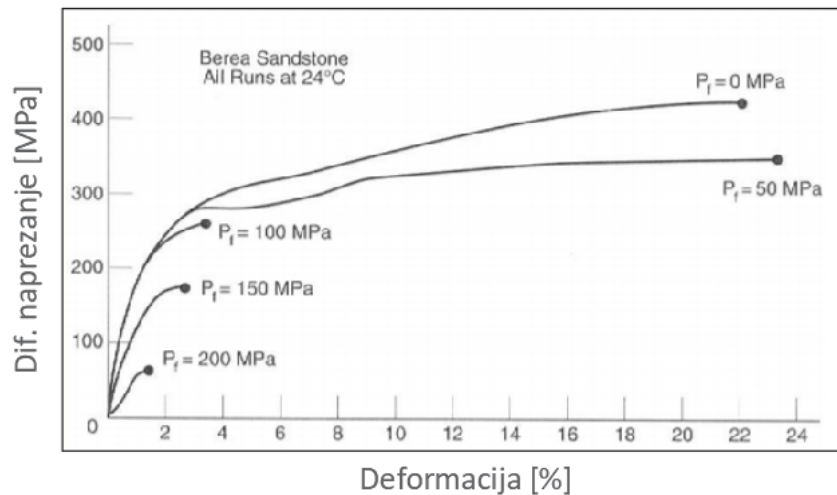
Slika 17: Profil trošnosti u stijeni [36]

5.2. Utjecaj vode na stijensku masu

Prisutnost vode ili bilo kakvo povećanje porednog pritiska reducira čvrstoću stijenske mase. Voda prekida vezu između minerala i uzrokuje slamanje glinenog cementa u određenim stijenama.

Porni pritisak vode djeluje u suprotnom smjeru od limitiranog naprezanja, čime smanjuje efektivni normalni napon u troosnom stanju naprezanja, što dovodi do reduciranja ograničavajuće posmične čvrstoće. Saturacija reducira faktor unutarnjeg trenja i prividnu koheziju.

Voda značajno smanjuje čvrstoću slabih i poroznih sedimentnih stijena, ali minimalno utječe na jake stijene malog poroziteta.[39]



Slika 18: Dijagram naprezanje-deformacija za Berea pješčenjak pri različitim vrijednostima pornog pritiska i temperaturi od 24°C [5]

Glavni izvor slatke vode je oborina koja se rasprši evapotranspiracijom, otjecanjem i infiltracijom. Podzemna voda je ona voda koja se nalazi u podzemlju, nastala infiltracijom, a izlazi kroz izvore na površinu ili procjeđivanjem na dnu. Stijenska masa je propusna te kroz šupljine propušta vodu.

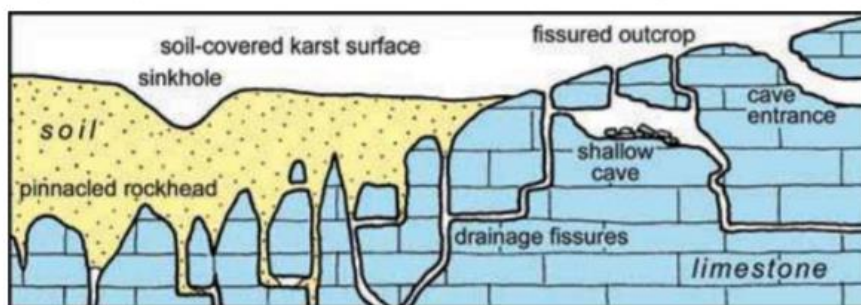
Zbog prisustva i odsustva vode u porama razlikuju se ukupna i efektivna naprezanja. U nesaturiranom tlu, naprezanjima se opiru čestice, a u zasićenom se silama pritiska opiru čestice i voda u porama. Odnosno, u nesaturiranom tlu efektivno naprezanje predstavlja međuzrnski pritisak koji se opire tlačenju, a u saturiranom je ukupno naprezanje zbroj efektivnih napona i pornog pritiska.

Porni tlak i efektivno naprezanje su bitni jer opterećenje uglavnom ima tlačnu i posmičnu komponentu, a voda nema posmičnu čvrstoću već se može oduprijeti samo tlačnoj komponenti.

Povećanjem razine podzemne vode povećava porni pritisak, čime se smanjuju efektivna naprezanja i otpornost tla na smicanje. [39]

Slabe stijene, kao što su vapnenci, specifični su jer ih je moguće potpuno otopiti. Padaline i slana voda troše površinu vapnenca, ali i otapaju stijenu po njezinim pukotinama i plohama slojevitosti, koje istovremeno proširuju i stvaraju špilje (slika 19.).

Nastaju krajolici, kao što je krš, kojeg karakteriziraju podzemne drenaže, špilje, vrtače te suhe doline. [39]



Slika 19: Prikaz trošenja vapnenačke stijenske mase [36]

Podzemna voda može uzrokovati probleme pri građenju, može ugrožavati građevine kao agens erozije te može negativno djelovati na funkcioniranje građevina.

Podzemna voda može otežati ili spriječiti građenje jer se iskopi uglavnom izvode ispod razine podzemne vode.

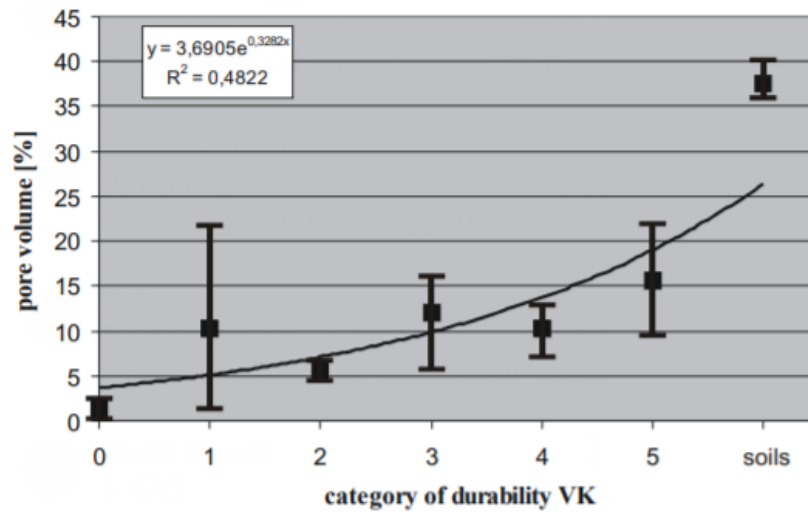
Voda uzrokuje hidraulički slom tla te slom klizanjem, strujnim tlakom i uzgonom. Kao posljedica javljaju se klizišta, gdje materijal ima visoku saturiranu težinu, nisku posmičnu čvrstoću i porne pritiske koji pogoduju gubitku posmične čvrstoće na kliznoj plohi. Dakle, klizišta nastaju zbog povećanog pornog pritiska uslijed porasta nivoa podzemne vode.

Podzemna voda utječe na sve geotehničke objekte ukoliko je prisutna na lokaciji građevine, te je potrebno o njoj voditi računa tijekom gradnje i eksploatacije objekta. Utjecaj podzemne vode izražen je u tunelogradnji gdje može utjecati na nosivost podgradnih sustava, urušavanje tunela, nestabilnost čela uslijed pojava trošenja ili bubrenja, izdizanje podnožnog svoda ukoliko su prisutni minerali glina koji bubre i još mnoge druge probleme. Da bi uspješno funkcionirala građevina, potrebno je konstruirati dobar sustav procjeđivanja. [42]

Mineralni sastav stijenske mase utječe na geotehničke značajke materijala. Minerali glina ispunjavaju diskontinuitete i rasjede u stijenskoj masi, a ovisno o vrsti minerala gline razlikuje se ponašanje iste. Gline koje su izgrađene od montmorilonita, imaju izraženu sposobnost bubrenja i apsorpcije organskih tvari te u kontaktu s vodom mijenjaju svoja svojstva. Bitna svojstva gline u inženjerskoj praksi su svojstva stezanja i bubrenja, jer upijanje vode uzorkuje visoku plastičnost, ljepljivost i koheziju. Bubrenje stijene spada pod teške geotehničke uvjete i u takvim uvjetima može doći do dodatnog opterećenja na podgradu što može dovesti do sloma podgrade ili velikih deformacija.

Minerali gline negativno utječu i kod procesa hidratacije, odnosno procesa sušenja i vlaženja u materijalu. Molekula vode, koja je pozitivno nabijena, privlači se s negativno nabijenom površinom minerala gline i formira se sloj vodenih molekula. Vodene molekule ulaze u minerale gline koje imaju sposobnost primanja vode, ali sušenjem ne izlaze iz njih. Ponovnim vlaženjem istog minerala dolazi do vezanja još molekula vode s čim dolazi i povećanje naprezanja na dotični materijal. Ukoliko u fazi sušenja dođe do porasta poreznog pritiska do njegove najveće vrijednosti, nastupa slom materijala. [43]

Određeni parametri stijenske mase imaju utjecaj na njezinu trajnost, kao što su poroznost, čvrstoća vezanja zrna, stupanj lomljenja i dr. Poroznost s jedne strane utječe na trajnost tako da kontrolira propusnost vode kroz kameni materijal, odnosno veza je između brzine vlaženja i količine prodiranja. Poroznost se može opisati pomoću volumena pora. Slaba stijenska masa kao što je pješčenjak ima veliki volumen pora, ali malu trajnost. Slika 20 prikazuje odnos trajnosti i volumena pora. [1]



Slika 20: Odnos između trajnosti i volumena pora [1]

Čvrstoća vezivanja zrna je parameter koji označava koheziju pojedinačnih zrna u materijalu, a ovisi o mineralima u stijeni, veličini i količini zrna.

U područjima hladnih klima, širenje ledenih kristala uzrokovano tečenjem vode prema ledenim lećama u pukotinama stijenske mase, dovodi do nastanka polja naprezanja, a tek u manjoj mjeri se to događa zbog promjene volumena uslijed kristalizacije vode u led. [43]

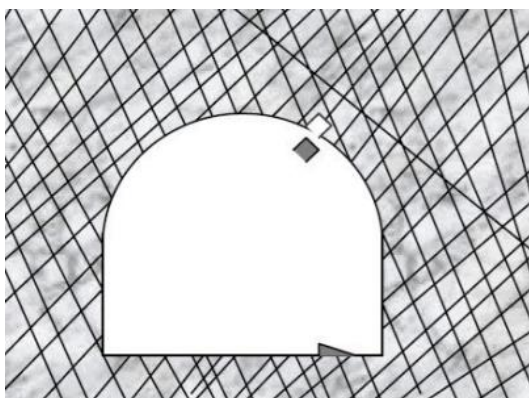
6. INŽENJERSTVO U SLABOJ STIJENSKOJ MASI

6.1. Nestabilnosti karakteristične za slabu stijensku masu

Na stabilnost utječu i teški geotehnički uvjeti kao što su loša mehanička svojstva stijenske mase, visoka naprezanja u odnosu na čvrstoću stijenske mase, što dovodi do gnječenja stijene i plitkih iskopa u slabo nosivoj stijenskoj masi. [44]

Nestabilnost stijenske mase može uzrokovati loša strukturalna geologija, naprezanje koje je veće od čvrstoće stijenske mase, ali i procesi koju su spomenuti ranije u radu, pojačano trošenje ili bubrenje stijenske mase te visoki tlak ili tečenje vode.

Slaba, ispucala stijenska masa će već pod niskim vrijednostima naprezanja pokazati nestabilnost i doći će do gravitacijskog ispadanja ili klizanja blokova. Teže ispucala stijena će pod niskim vrijednostima naprezanja pokazati nestabilnost tako što će ispadati mali ukliješteni blokovi po konturi iskopa (slika 21.). Potrebno je stabilizirati iskop jer se to ispadanje može proširiti dublje u stijensku masu. [44]

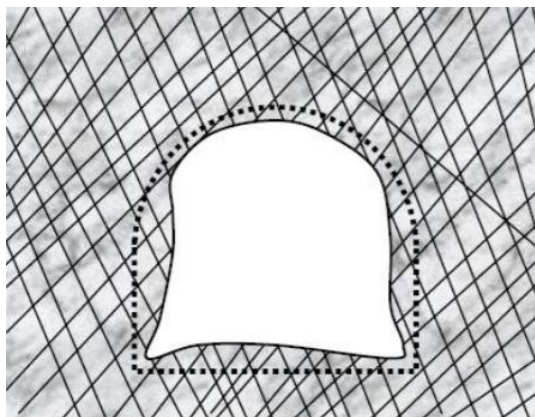


Slika 21: Primjer ispadanja malih blokova po konturi iskopa [44]

Lomovi stijenske mase izazvani naprezanjima mogu biti kada je *in situ* čvrstoća stijenske mase manja od *in situ* napona na stijensku masu. Tu su moguća dva slučaja: sekundarni naponi od iskopa su manji od vršne čvrstoće stijene i da su sekundarni naponi premašili vršnu čvrstoću stijene.

Slom nastupa kada materijal dosegne vršnu čvrstoću, a to se u stijenskoj masi događa kao smicanje po plohi sloma, direktan vlačni slom, slom savijanjem, slom kompresijom i urušavanje.

Kod teško ispucale stijenske mase, pri iskopu tunela, visoka koncentracija naprežanja na konturi iskopa uzrokuje zatvaranje profila u obliku podizanja razine poda i pomicanje blokova (slika 22.). [44]



Slika 22: Primjer zatvaranja profila iskopa u obliku podizanja poda i pomicanja blokova [44]

Ukoliko stijenska masa ima malu čvrstoću, koja je svojstvena za slabu stijenu, može doći do gnječenja intaktne stijene i gnječenja stijenskih diskontinuiteta. Ukoliko stijenska masa nije stabilizirana na vrijeme može doći do preraspodjele naprežanja ili do povećanog, dugotrajnog opterećenja na podgradu ukoliko su deformacije stijene spriječene. Stijene sklone gnječenju su one bogate mineralima gline i koje bubre u kontaktu s vodom te one u rasjednim zonama.

Kod slabih stijenskih masa, kao što je vapnenac može doći do velikog oštećenja stijenske mase jer se u podzemnim kavernama mogu nalaziti velike količine vode koja može uzrokovati naglo prodiranje. Voda može otopiti dijelove stijene ukoliko je ona sastavljena od lako topljivih materijala (kuhinjska sol, gips i dr.) što može ugroziti stabilnost iskopa.

Na slici 23 je prikazan pokos u slaboj stijenskoj masi s gustim diskontinuitetima različite orijentacije. Stabilnost pokosa nije određena jednim setom diskontinuiteta, ali bi se klizna ploha mogla formirati dijelom kroz diskontinuitete, a dijelom kroz intaktnu stijenu. [43]



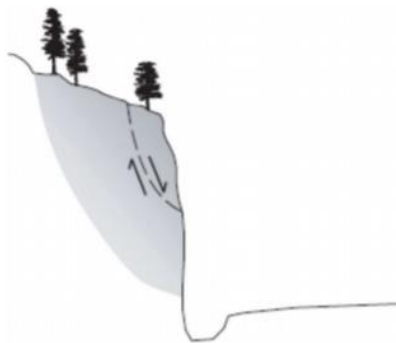
Slika 23: Pokos stijenske mase s izraženim diskontinuitetima [45]

Nestabilnost stijenske mase se događa u trošnijim zonama materijala. Teško je odrediti parameter čvrstoće jer oni ovise o stupnjevima trošnosti, ali je važno da se za svaki stupanj trošnosti po određenim zonama stijenske mase u obzir uzmu različiti parametri koji pripadaju toj zoni. Na slici 24 prikazan je primjer slabe stijenske mase kod koje u dubljim slojevima prevladava trošna stijena, a na površini rezidualno tlo. [43]



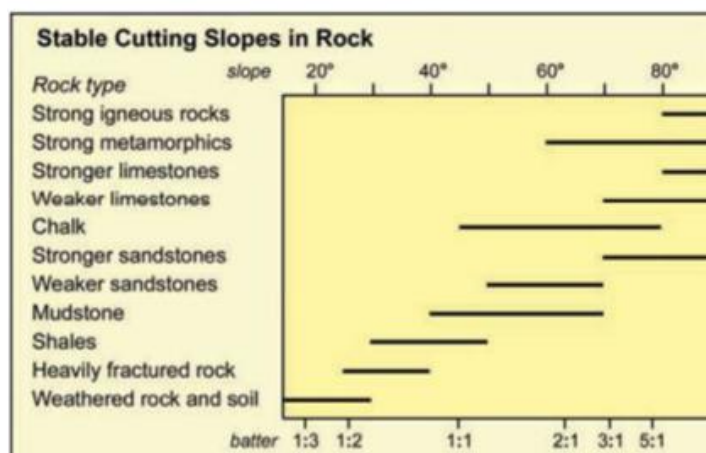
Slika 24: Slom u trošnoj stijenskoj masi [45]

Ako se radi o vrlo slaboj intaktnoj stijeni koja nema izražene diskontinuitete, dolazi do plitkog sloma (slika 25.). [43]



Slika 25: Plitki slom u stijenskoj masi [45]

Stabilnost kosine u slaboj stijenskoj masi razlikuje se ovisno o stijeni. Trošna stijena je stabilna pri nagibima 1:3 do 1:2, značajno raspucala stijena do nagiba 1:1 (45°). Slabi vapnenci su stabilni u puno strmijim nagibima 3:1 do 5:1 (70°-90°) (slika 26.).



Slika 26: Stabilnost kosina u stijeni visine do 20 m [36]

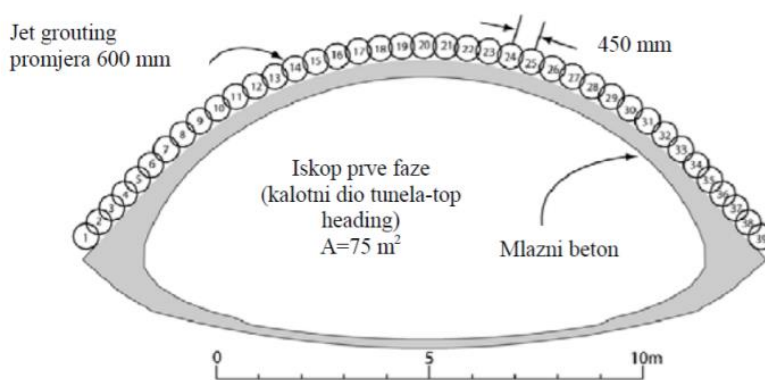
Kako bi se osigurala stabilnost iskopa potrebno je netom nakon iskopa izvršiti podgrađivanje. Ukoliko je čelo iskopa stabilno prilikom armiranja može se koristiti tehnika sidrenja čela tunela, kao dodatna mjera kod višefaznih iskopa i cijevnog kišobrana. [44]

Stijenska masa je ta koja na sebe preuzima najveći dio napona te je ona najvažniji čimbenik podgrade, zbog čega treba nastojati očuvati njene prirodne karakteristike.

Za stabilizaciju stijenske mase mogu se koristiti dvije tehnike podgrade: armiranje stijenske mase i podupiranje. Armiranje stijenske mase se stijenska masa nastoji stabilizirati tako da djeluje kao kontinuum. Podupiranjem se elementi podgrade ugrađuju u iskop kako bi se ograničili pomaci konture iskopa. Najčešće se koristi kombinacija ove dvije tehnike.

Optimalni sustav za stabilizaciju iskopa stijenske mase predstavlja kombinacija štapnih sidra i mreža ili mreža ojačanog mlaznog betona. Funkcija mlaznog betona je da prenese točkasta opterećenja sidara na veće područje stijenske mase, a može služiti i za popunjavanje neravnih dijelova iskopa ili može biti dio nosivog podgradnog sustava.

Kod slabih stijena, kao što je trošni granit te u šljunkovitim i pjeskovitim tlima, Jet Grouting Method je poželjna tehnika stabilizacije iskopa stijenske mase. [44]

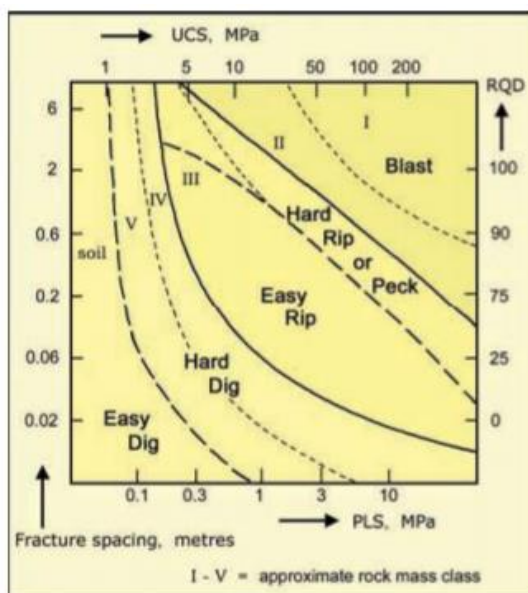


Slika 27: Oblikovanje kišobrana u Jet Grouting Metodi [44]

Ukoliko se iskop tunela radi u slaboj stijenskoj masi, loših mehaničkih svojstava primjenjuje se poboljšanje stijenske mase konsolidacijskim injektiranjem, dreniranjem stijenske mase ili zamrzavanjem stijenske mase [36]. Nije moguće izvoditi stabilizaciju konvencionalnim sustavima, jer je u slaboj stijeni potrebno ugraditi vrlo teška betonska rebra ili debele betonske obloge kako bi se osigurao potrebni potporni tlak, što je nepraktično. U tunelogradnji se metode građenja moraju prilagoditi i potrebno je uzeti u obzir sustave koji mogu primiti velike količine pomaka, kao što je sustav „cijevnog kišobrana”, armiranje čela iskopa te iskop u više faza. [46]

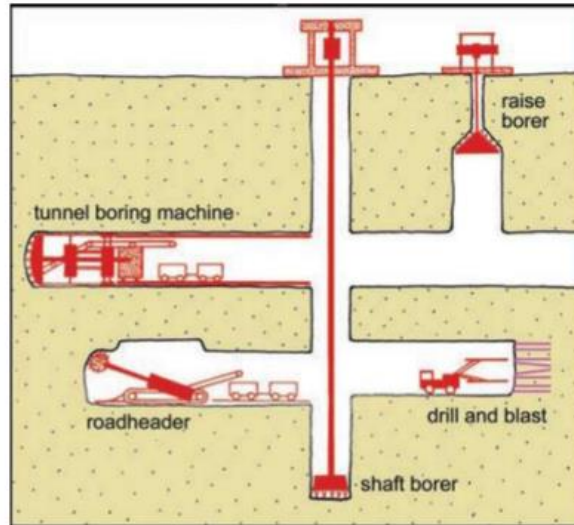
6.2. Iskop u slaboj stijenskoj masi

Načini iskopa u slaboj stijenskoj masi s obzirom na jednoosnu čvrstoću i kategoriju razlomljenosti su direktni iskop, za pretežno razlomljene stijenske mase (kategorija V) te razbijanje, odnosno pikiranje slabe stijenske mase nešto veće čvrstoće (kategorija IV) (slika 28.).



Slika 28 : Vrste iskopa za različite kategorije stijenske mase [36]

Iskop tunela u slaboj stijenskoj masi može se izvoditi svrdlom i eksplozijom, roadheader strojem te Tunnel Boring Machine (TBM) – strojem za probijanje tunela. Sa svrdlom i eksplozivom obavlja se iskop čela tunela, uz obaveznu stabilizaciju čela neposredno nakon iskopa. Prednost TBM-a je da se odmah pri iskopu izvodi i stabilizacija stijenske mase. Kada se iskop radi u slaboj stijenskoj masi, proces iskopa traje kraće nego u čvrstoj stijeni, odnosno u jednom danu moguće je iskopati i stabilizirati 30 m slabe stijenske mase. Slika 29 prikazuje načine iskopa tunela i vertikalnih okana ovisno naravno o kvaliteti stijenske mase (slika 28.). [36]

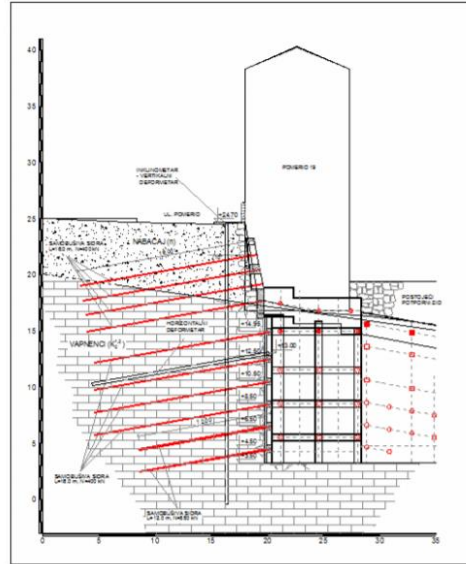
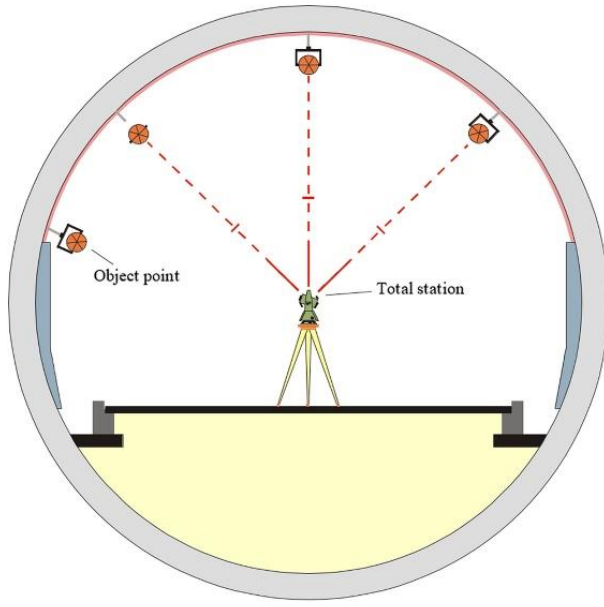


Slika 29: Tehnike iskopa tunela u stijenskoj masi [36]

6.3. Opservacijske metode

Osnovna ideja opservacijske metode je aktivno projektiranje koje se nastavlja tijekom izgradnje. Opservacijskom metodom može se nadići probleme nesigurnosti povezane s prirodom materijala, odabirom parametara, teškim geotehničkim uvjetima koji svakako uključuju slabu stijensku masu i umanjiti mogućnost pojave nestabilnosti. Potrebno je osigurati optimalnu stabilizaciju stijenskog iskopa zbog čega se stvarni uvjeti na terenu uspoređuju s uvjetima predviđenim u projektu. Mjerenjima na terenu se provjeravaju ponašanja konstrukcije koja su ranije predviđena u projektu. Izgradnja počinje s pretpostavkama o idealnim uvjetima na terenu, ali je potrebno predvidjeti mjere koje će utvrditi razlike između idealnog i stvarnog ponašanja konstrukcije. [44]

U tunelogradnji se koristi koncept Nove Austrijske Tunelske Metode koji se temelji na metodi opažanja, a glavni princip je da tlo ili stijena oko iskopanog otvora postaju dio nosive konstrukcije u obliku nosivog prstena.



Slika 30: a) Monitoring iskopa tunela [20] b) monitoring građevne jame [47]

7. ZAKLJUČAK

Slabu stijensku masu na terenu je moguće pronaći kao tektonski poremećenu kompetentnu, istrošenu kompetentnu i mladu sedimentnu stijenu. Najznačajnija karakteristika slabe stijene, osim njene niske tlačne čvrstoće, je trošenje pod utjecajem atmosferilija u kratkom vremenu. Fizičko, kemijsko ili biološko trošenje uzrokuje degradaciju parametara čvrstoće stijenske mase, a dubina trošenja ovisi o vremenu trajanja trošenja, klimi te vrsti stijenske mase. Slabe stijenske mase, kao što je vrsta vapnenca niske tlačne čvrstoće, topljive su u vodi, što uzrokuje nastanak podzemnih špilja, vrtača i suhih dolina. Voda, osim što bitno utječe na trošenje stijenske mase, utječe i na njeno bubrenje i stezanje, što može uzrokovati i slom stijenske mase.

Kako bi se ocijenila stabilnost stijenske mase te parametri čvrstoće i deformabilnosti, potrebno je provesti klasifikaciju stijenske mase. Klasifikacija, kao postupak razvrstavanja stijene na temelju međusobnih odnosa karakteristika stijenske mase, razvijena je na osnovi stečenih iskustava u inženjerskoj praksi. Svaka stijenska masa je specifična, zato je za određivanje njezinih karakteristika, ponajprije čvrstoće, potrebno u obzir uzeti raznovrsne parametre i promatrati ih u različitim elementima stijenske mase.

Na stabilnost stijenske mase utječu mehanička svojstva koja stijenska masa posjeduje i visoka naprezanja kojima je izložena u odnosu na čvrstoću, što dovodi do pucanja dijelova stijenske mase i plitkih iskopa u istoj. Kako ne bi došlo do dezintegracije materijala na konturi iskopa ili do dugotrajno povećanog opterećenja, potrebno je čim prije stabilizirati iskop stijenske mase. Stabilizacija se vrši podgrađivanjem, a stijenska masa je ta koja na sebe preuzima najveći dio naprezanja i najvažniji je čimbenik podgrade te je potrebno sačuvati njezinu čvrstoću.

Kod iskopa u slaboj stijenskoj masi, nije moguće izvoditi stabilizaciju klasičnim metodama već je potrebno prilagoditi građenje geotehničkim uvjetima karakterističnim za slabu stijensku masu. Iako je projektiranje i građenje u slaboj stijenskoj masi izazovno za građevinskog inženjera, uz primjenu opservacijskih metoda moguće je lakše prevladati probleme povezane s prirodom materijala i teškim geotehničkim uvjetima.

8. LITERATURA

- [1] Nickmann M., Spaun G., Thuro K. (2006) Engineering geological classification of weak rocks, IAEG, London
- [2] Predavanje iz kolegija Geotehničko inženjerstvo, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/GI_5.predavanje_Klasifikacije_stijenske_mase.pdf
- [3] Dugonjić Jovančević, S., Interna skripta iz kolegija Mehanika tla i stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2019.
- [4] ISRM; Commission on standardization of laboratory and field tests (1978) Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 15, 319-368.
- [5] Tomljenović, B., (2020), Predavanje Strukturna geologija, Rudarsko geološko naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2020.
- [6] E. Hoek, Strength of rock and rock masses, ISRM News Journal 2(2) (1994) 4–16.
- [7] ISRM, ISRM suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 15(6) (1978) 319–368.
- [8] M.A. Kanji, Critical issues in soft rocks, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 6(3) (2014) 186–195.
- [9] Predavanje iz kolegija Petrologija sedimenata, Rudarsko geološko naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2014., https://rudar.rgn.hr/~bruntom/nids_bruntom/PDF%20Sumarstvo/04%20Sedimentne%20stijene%202014.pdf
- [10] The Geological Society: Mudstone, <https://www.geolsoc.org.uk/ks3/gsl/education/resources/rockcycle/page3523.html>
- [11] Benac, Č., (2013.), Rječnik pojmova u primijenjenoj geologiji i geološkom inženjerstvu
- [12] Geotech.hr: Fliš, <https://www.geotech.hr/flis-opis-karakteristike-trosenje/>

- [13] Geology.com: Ugljen, <https://geology.com/rocks/coal.shtml>
- [14] Geology.com: Kreda, <https://geology.com/rocks/chalk.shtml>
- [15] ISO 14689-1 (2003) Geotechnical investigation and testing — Identification and classification of rock — Part 1: Identification and description (pp. 1-16). Geneva: International Organization for Standardization
- [16] Geology.com: Vapnenac, <https://geology.com/rocks/limestone.shtml>
- [17] 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.
- [18] Lauffer, H., (1958) Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau, Geol. Bauwesen 74, pp. 46-51.
- [19] Deere, D.U., Hendron, A.J. Jr., Patton, F.D., Cording, E.J., (1967) Design of Surface and Near Surface Construction in Rock, In: Failure and Breakage of Rock, C. Fairhurst Ed. Society of Mining Engineers of AIME, New York, pp. 237-302.
- [20] Deere, D.U. (1968), Geological Considerations Rock Mechanics in Engineering Practice
- [21] Deere, D.U. 1989. Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
- [22] 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.
- [23] Bieniawski, Z.T., (1973) Engineering Classification of Jointed Rock Masses, Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs, 15, pp. 335-344.
- [24] Bieniawski, Z.T., (1989) Engineering Rock Mass Classification, New York: John Wiley & Sons, 251 p.
- [25] Bieniawski, Z. T. (1993) In J. A. Hudson (Ed.), Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends, comprehensive rock engineering (Vol. 3, pp. 553–574). New York: Pergamon Press.

- [26] 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.
- [27] Grimstad and Barton, (1993) Updating of the Q-System for NMT
- [28] Hoek E., Marinos P., Benissi M. (1998) Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for Very Weak and Sheared Rock Masses. The Case of the Athens Shist Formation. Bull. Engl. Geol. Env., No. 57, pp.151-160.
- [29] Hoek E., Brown E.T., (1997) Practical estimates of rock mass strength
- [30] Marinos, P., Hoek, E., (2000) GSI-A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation, Proc. GeoEng 2000 Conference, Melbourne.
- [31]] M.A. Kanji, Critical issues in soft rocks, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 6(3) (2014) 186–195.
- [32] P. Marinos, E. Hoek, Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, Bulletin of engineering geology and the environment 60(2) (2001) 85–92.
- [33] Durmeková T., Holzer R., Wagner P., Weak rocks in engineering practice
- [34] Hrašna, M., Hyánková, A. & Letko, V. 1987. Engineering geological classification and characteristics of weak rocks (in Slovak). Mineralia Slovaca, 19: 553-559.
- [35] D. U. Deere and R. P. Miller, “Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock,” Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Air Force Weapon Laboratory, New Mexico, 1966.
- [36] Waltham T. (2009) Foundations of Engineering geology, Third edition, Spon Press, Taylor & Francis e-Library, p105.
- [37] Selby MJ (1993) Hillslope Material and Processes, Oxford: Oxford University Press.
- [38] Gulam V. (2012) Erozijska ogolina u flišu središnje Istre, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko- geološko- naftni fakultet, Zagreb.
- [39] Mihalić, S., Interna skripta Osnove inženjerske geologije, Rudarsko-geološko.naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.

- [40] Furlan T., Završni rad Utjecaj trošenja na svojstva stijenske mase, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin, 2019.
- [41] ISRM (1981) ISRM Suggested Methods, Rock characterization testing & monitoring, Brown ET (ed.), Pergamon Press Ltd, Oxford.
- [42] Smiljanović S., Završni rad Podzemna voda u inženjerskoj geologiji, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin, 2018.
- [43] Dugonjić Jovančević, S., Interna skripta iz kolegija Inženjerska mehanika stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2020.
- [44] Dugonjić Jovančević, S., Interna skripta iz kolegija Geotehničko inženjerstvo, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2020.
- [45] Wyllie, C. and Mah, W. (2004) Rock Slope Engineering Civil and Mining
- [46] Hoek, E., (1998), Tunnel support in weak rock
- [47] Arbanas, Ž., (2015) Opservacijske metode pri projektiranju i izvođenju građevnih jama u stijenskoj masi u urbanism sredinama