

Primljen / Received: 29.10.2015.

Ispravljen / Corrected: 20.9.2017.

Prihvaćen / Accepted: 2.7.2018.

Dostupno online / Available online: 25.10.2018.

# Primjena geološkog indeksa čvrstoće za opis rastrošbom izazvanih slomova

## Autori:



Dr.sc. **Zoran Berisavljević**, dipl.ing.geol.  
Koridori Srbije d.o.o.  
[z.berisavljevic@koridorisrbije.rs](mailto:z.berisavljevic@koridorisrbije.rs)



**Dušan Berisavljević**, dipl.ing.geol.  
Institut za ispitivanje materijala  
[dusan.berisavljevic@institutims.rs](mailto:dusan.berisavljevic@institutims.rs)



Prof.dr.sc. **Dragoslav Rakić**, dipl.ing.geol.  
Sveučilište u Beogradu  
Rudarsko-geološki fakultet  
[dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs](mailto:dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs)



Doc.dr.sc. **Zoran Radić**, dipl.ing.geol.  
Sveučilište u Beogradu  
Građevinski fakultet  
[zoradic@grf.bg.ac.rs](mailto:zoradic@grf.bg.ac.rs)

Stručni rad

**Zoran Berisavljević, Dušan Berisavljević, Dragoslav Rakić, Zoran Radić**

## Primjena geološkog indeksa čvrstoće za opis rastrošbom izazvanih slomova

U radu se istražuje rastrošbom izazvani slom heterogene lisnate stijenske mase koja se sastoji od pješčenjaka i šejla. Prikupljeni su podaci o diskontinuitetima, a vrijednost geološkog indeksa čvrstoće (GSI) utvrđena je odmah nakon iskopa na temelju kvantificiranog GSI dijagrama. Ispitivanja trajnosti izvedena su do petog ciklusa. Uzorci su bili izloženi prirodnim klimatskim uvjetima tijekom 12-mjesečnog razdoblja kako bi se kvantificirao proces kalanja pomoću indeksa trajnosti. Posljedica izloženosti uzoraka je bila dezintegracija u manje fragmente. Na ovim osnovama predložen je model za rješavanje zakašnjelog sloma usjeka.

### Ključne riječi:

kalanje, heterogenost, lisnatost, indeks trajnosti, smanjenje GSI

Professional paper

**Zoran Berisavljević, Dušan Berisavljević, Dragoslav Rakić, Zoran Radić**

## Application of geological strength index for characterization of weathering-induced failures

This study investigates weathering induced failures of the heterogeneous fissile rock mass consisting of sandstone and shale. Discontinuity data was collected and the geological strength index (GSI) value was determined immediately after excavation based on the quantified GSI chart. Slake durability tests were performed up to the fifth cycle. Samples were exposed to natural climatic conditions during a twelve-month period, in order to quantify slaking process by means of disintegration ratio. As a consequence of exposure, samples disintegrated into smaller fragments. On these bases, the model aimed at addressing delayed failure of cuts is proposed in the paper.

### Key words:

slaking, heterogeneity, fissility, disintegration ratio, GSI reduction

Fachbericht

**Zoran Berisavljević, Dušan Berisavljević, Dragoslav Rakić, Zoran Radić**

## Anwendung des geologischen Festigkeitsindex für die Beschreibung von durch Verwitterung hervorgerufene Brüche

In der Abhandlung untersucht man durch Verwitterung hervorgerufene Brüche bei heterogenen blättrigen Felsenmassen, die aus Sandstein und Tonschiefer bestehen. Zusammengetragen wurden Daten über die Diskontinuität, und die Werte des geologischen Festigkeitsindex (GSI) wurden sofort nach dem Aushub aufgrund des quantifizierten GSI-Diagramms festgestellt. Die Untersuchungen der Beständigkeit wurden bis zum fünften Zyklus durchgeführt. Außerdem waren die Proben während eines 12-monatigen Zeitraums den natürlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt, um den Spaltungsprozess mithilfe des Beständigkeitsindex zu quantifizieren. Die Folge der Exposition der Proben war die Desintegration in kleinere Fragmente. Auf diesen Grundlagen wurde ein Modell für die Lösung des verspäteten Bruchs des Einschnitts vorgeschlagen.

### Schlüsselwörter:

Spaltung, Heterogenität, Blätterung, Beständigkeitsindex, Verringerung des GSI

## 1. Uvod

Kada se radi o usjecima izgrađenim u stijeni koja sadrži glinu, postoji rizik od zakašnjelog sloma uslijed moguće degradacije tijekom vremena. Ti slomovi, iako obično plitki u prirodi, imaju negativne posljedice zbog produženja vremena za dovršetak projekta, povećanja troškova za popravke, održavanja i izvođačevih zahtjeva kao i na stabilnost objekata u podnožju i na vrhu pokosa. Uzrok tih nestabilnosti pripisuje se procesima rastrošbe koji se javljaju neposredno nakon iskopa. Prirodni klimatski uvjeti uzrokuju promjene udjela vlage, temperature i fizičkog stanja slobodne vode u stijenskoj masi. To dovodi do mehaničke i kemijske rastrošbe materijala. Rastrošba stijenske mase smanjuje njenu posmičnu čvrstoću i povećava deformabilnost. Posebna vrsta rastrošbe pri ciklusima vlaženja i sušenja naziva se kalanje. Kalanje je karakteristično za sitnozrnate stijenske mase (muljnjak, glineni šejl, lapor, prahovnjak, glinjak). Omekšavanje kalanjem usko je povezano s deformacijskim omekšavanjem, tj. progresivnim slomom.

Bjerrum [1] definira dvije faze tijekom rastrošbe prekonsolidiranih plastičnih glina i glinenog šejla. U prvoj fazi struktura gline je poremećena pucanjem veza između glinenih čestica, a u drugoj fazi kemijski procesi uzrokuju raspadanje minerala. Prva faza raspadanja započinje i završava relativno brzo nakon izloženosti vremenskim utjecajima i ima velik utjecaj na mehanička svojstva stijenske mase. Deformacija je glavni čimbenik u uništavanju dijagenetskih veza. Mnogi fizikalni procesi mogu proizvesti deformacije, a njihov utjecaj smanjuje se s dubinom.

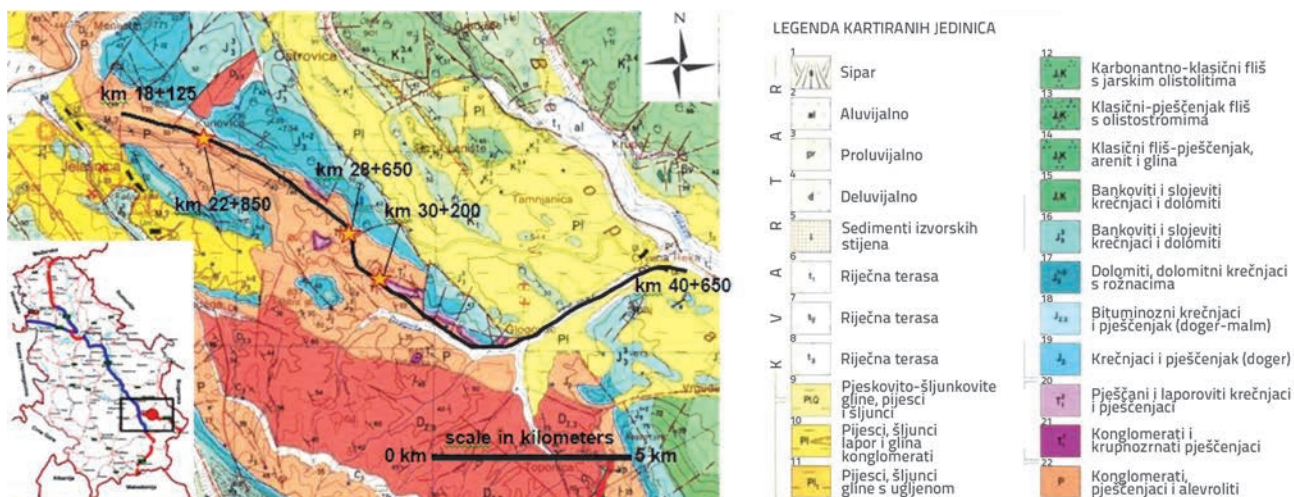
Botts [2] navodi smanjenje čvrstoće glinenih šejlova između 40 i 80 % s kutom trenja smanjenim od početnih 20° - 30° do 6° - 8° nakon dezintegracije. Ispitivanjem glinenih šejlova u troosnom uređaju dobiva se 80-postotno smanjenje čvrstoće nakon jednog ciklusa vlaženja i sušenja. Nakon ispitivanja na argilitima dobiveno je smanjenje posmične čvrstoće od 90 %, [3]. Mišćević i Vlastelica [4] naglašavaju da, ako izveden pokos u flišnoj stijenskoj masi ostane nepodgrađen, slomovi bi se mogli razviti mjesecima nakon iskopa. Analiziran je i utjecaj laboratorijski simulirane rastrošbe na posmičnu čvrstoću lapora [5]. Na

raspad utječu litološki čimbenici kao što su stupanj cementacije, postojanje mikropukotina, veličina zrna i heterogenost te mineraloški sastav (vrsta minerala gline). Materijali s većom granicom plastičnosti, poroznosti i vlage osjetljiviji su na kalanje. Postoje različita mišljenja o uzrocima kalanja stijena koje sadrže glinu. Pojedini autori [6, 7] zagovaraju hipotezu o postojanju složenih fizikalnih i kemijskih reakcija između molekula vode koje postoje u porama stijenske mase. Infiltracija atmosfere vode drukčijih kemijskih sastojaka od onog unutar stijenske mase može oslabiti intermolekularne veze između čestica, što dovodi do dezintegracije stijenske mase. Pojedini autori [8, 9] pretpostavljaju da je proces dezintegracije usko povezan s usisnim učincima. Nakon sušenja, zrak ispunjava pore i počinju visoki usisni tlakovi. U slučaju naknadne infiltracije vode, tlak se oko zarobljenih mjehurića zraka povećava, što uzrokuje dodatni tlak na mineralna zrna unutar stijenske mase. Nakon nekoliko ciklusa vlaženja i sušenja, visoki tlakovi mogu dovesti do fragmentacije stijenske mase. U slučaju aktivnih glina sklonih bubrenju, uništenje dijagenetskih veza započinje kad tlak bubrenja prelazi vlažnu čvrstoću stijenske mase. U slučaju lisnate stijenske mase može biti izraženiji nego u masivnim ekvivalentima. Botts [2] navodi da pukotine kontroliraju ponašanje stijenske mase trojako i predstavlja model za dezintegraciju glinenih šejlova.

Slom mekog stijenskog materijala može se pojaviti u bilo kojoj fazi propadanja i zahtijeva samo da se posmična čvrstoća smanji na razinu tako da se više ne može oduprijeti posmičnim naprezanjima koja djeluju na potencijalnu kliznu površinu. Trebalo bi istražiti određena svojstva kako bi se utvrdilo je li stijenska masa sklona kalanju, a to su adsorpcija, granica tečenja, granica plastičnosti, prisutnost glinenih minerala, potencijal bubrenja itd.

Ova svojstva su poželjna za određivanje tijekom procesa projektiranja kako bi se pouzdano odredilo ponašanje stijenske mase nakon iskopa. Nekoliko autora [10-12] predložilo je klasifikacije za procjenu trajnosti stijena koje sadrže glinu.

Utjecaj rastrošbe i kalanja proučavani su tijekom izvedbe pokosa u projektu autoceste E80 u Srbiji.



Slika 1. Geološka karta Srbije [15]; puna crna linija predstavlja prvu dionicu autoceste E80 koja prelazi granice permskih naslaga

## 2. Geološki uvjeti

Nestabilnosti prouzročene rastrošbom mogu se promatrati na pokosima iskopenim tijekom realizacije projekta autoceste E80 u Srbiji od stacionaže 22 + 000 do stacionaže 34 + 000. Nakon iskopa većine usjeka, visine od 10 do iznad 35 m, došlo je do više od deset nestabilnosti tijekom jedne godine. Svi su usjeci izvedeni s nagibom  $v : h = 1 : 1$  (lokalno  $1 : 1,5$ ), bez površinskog vegetacijskog pokrivača ili pokrivača od mlaznog betona. Geologiju ovog dijela trase karakteriziraju uglavnom heterogene permske stijene koje zastupa pješčenjak, prahovnjak i muljnjak koji se izmjenjuju u različitim omjerima (slika 1.). Permske naslage su široko rasprostranjene u južnim i središnjim dijelovima Srbije, a karakteriziraju ih prepletene riječne naslage [13], tj. naslage nastale u fluvijalnom taložnom okolišu. Više detalja o mineraloškim i geološkim značajkama prikazao je Berisavljević [14]. Prema klasifikaciji Pottera i sur. [16], stijene su opisane kao muljeviti i prašnasti šejl.

## 3. Rastrošbom izazvani slomovi

Tipični slomovi uzrokovani rastrošbom prikazani su na slici 2. Usjeci su ostali stabilni tijekom prvih nekoliko mjeseci nakon izloženosti. Prvi znakovi nestabilnosti dogodili su kad su se razvile pukotine paralelne s pokosom na različitoj visini uzduž pokosa, obično u podnožju ili na srednjoj visini pokosa. Razvoj pukotina i rastrošba stijenske mase praćema je do sloma na tri lokacije u km 22 + 850, km 28 + 650 i km

30 + 200. Ovi usjeci se smatraju najreprezentativnijim za proučavanje procesa rastrošbe. Tablica 1 prikazuje podatke prikupljene tijekom terenskih istražnih radova u svrhu izvedbe i sanacije usjeka. Inklinometri su pokazali pomake reda veličine od samo nekoliko milimetara prije sloma i bez znakova ubrzanja pomaka pa bili samo ograničeno upotrebljivi za predviđanje sloma. Međutim, oni se mogu koristiti za određivanje točnog položaja klizne plohe. U svim izmjerenim otvorenim piezometarima ostala je razina podzemne vode znatno ispod površine tla tijekom jednogodišnjeg praćenja. Maksimalna promjena razine podzemne vode nakon obilnih kiša je 2 m. Klizne plohe su plitke, maksimalne debljine od 4 m. One se formiraju iznad zone utjecaja slobodnog vodnog lica.

### 3.1. Slom na km 30+200

Iskop usjeka između stacionaža 30 + 000 i 30 + 350 započeo je u travnju 2013., a konačna geometrija postignuta je u listopadu 2013. Prve pukotine pojavile su se na licu pokosa krajem studenog i početkom prosinca 2013., slika 3a. Početkom veljače 2014. nestabilnost se protezala na donjem dijelu pokosa, slika 3.b. Krajem rujna 2014. razvile su se prve pukotine na vrhu pokosa, a do listopada 2014. formirana je klizna ploha, slika 3c. Daljnje lateralno napredovanje klizišta prikazano je na slici 2. Ukupno pomicanje nije veliko i "raspuknuti" materijal služi kao zaštitni pokrov koji usporava raspad dubljih slojeva.



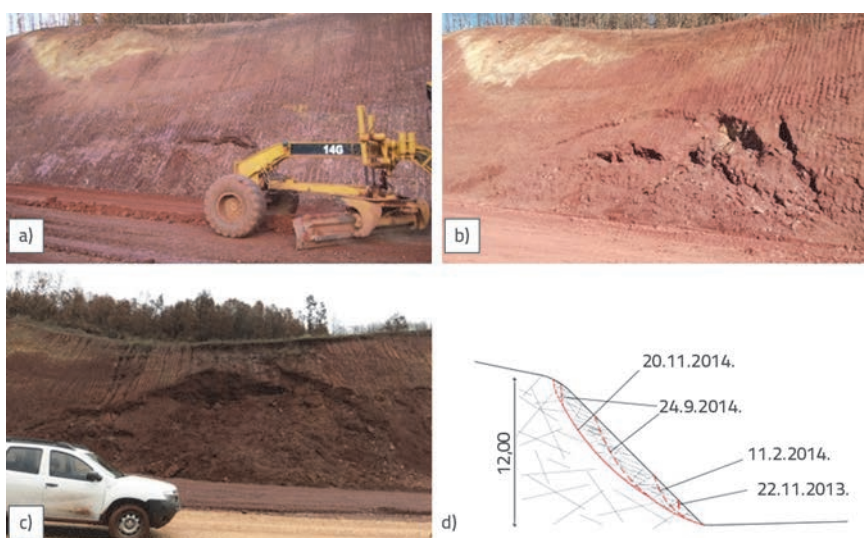
Slika 2. Tipični lomovi u permskom šejlu i mulnjaku

Tablica 1. Dostupni podaci o istraživanju i praćenju

Približna stacionaža usjeka	Geometrija pokosa (v:h) i visina	Dostupni geotehnički podaci	Vrijeme do sloma nakon iskopa i procijenjena ili izmjerena debljina kliznih ploha	Maks, pomak na inklinometru - mm i razine podzemne vode iz piezometara - rpv
km 22+050	1:1,5 h = 10 m	/	12 mjeseci 2,5 m	izvor-stalni dotok vode
km 22+850	1:1 h = 23 m	1 piezometar, 1 bušotina, 2 PLT	3 mjeseca 3,5 m	rpv 5 m
km 28+650	1:1 (gornji dio 1:2) h = 35 m	1 inklinometar, 3 piezometra 1 UCS pokus <sup>a</sup> , 7 PLT	6 mjeseci 4 m	nema pomaka rpv 12 m
km 29+400 Cijeli pokos (mlazni beton) lokalna berma nezaštićen	(2:1 u podnožju) 1:1 h = 35 m 1:1 h = 12 m	4 inklinometra, 1 piezometar, 20 UCS pokusi <sup>a</sup> , 17 PLT	36 mjeseci 7 m 12 mjeseci 3 m	pomak 15 mm (tri cijevi slomljene) nema rpv-a
km 29+900	1:1 h = 12 m	/	13 mjeseci 3 m	/
km 30+050	1:1 h = 12 m	/	15 mjeseci 3 m	rpv 11 m
km 30+200	1:1 h = 12 m	1 inklinometar, 1 bušotina 4 UCS pokusi, 4 PLT	12 mjeseci 2,5 m	pomak 3-4 mm rpv 11 m
km 30+400	1:1 h = 11 m	2 piezometri, 2 UCS pokusi, 10 PLT	13 mjeseci 3 m	/
km 31+000	1:1,5 h = 15 m	1 inklinometar, 4 UCS pokusi, 2 PLT	15 mjeseci 3 m	Nema pomaka,
km 31+300	1:1 h = 15 m	/	poslije 18 mjeseci samo lokalni slomovi na licu pokosa	/

Napomena:

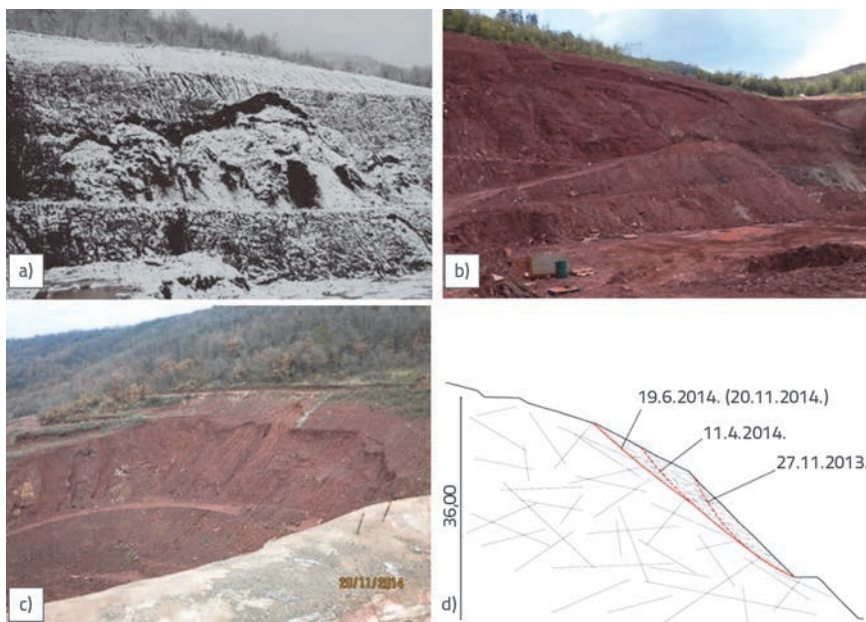
Dubina razine podzemnih voda predstavlja prosječnu dubinu sa svih piezometara na jednom mjestu tijekom jednogodišnjih mjerenja, neki inklinometri ne pokazuju pomake jer su iza klizne plohe, UCS – pokus jednoosnog tlaka, PLT – pokus točkaste čvrstoće, <sup>a</sup> Rezultati ispitivanja također uključuju uzorke iz susjednih usjeka (ili za izgradnju tunela) koji nisu imali nestabilnosti, Nakon prvih slomova, usjek na km 29+400 (izlazni portal tunela), v = 35 m, preoblikovan je i ojačan s 10 cm debelim mlaznim betonom i pasivnim sidrima dužine 5-10 m, Uzroci sloma nisu samo zbog rastrošbe (prikazani samo kao podatak),



Slika 3. Slom na km 30+200: a) 22. studenoga 2013.; b) 11. veljače 2014.; c) 20. studenoga 2014.; d) Model razvoja sloma

### 3.2. Slom na km 28+650

Izgradnja lijeve strane pokosa zapadnog predusjeka tunela "Bancarevo" završila je u listopadu 2013. godine. Planirano je zatrpati 100 m dug pokos do određene visine nakon postavljanja tunelskih cijevi metodom usjecanja i zatrpavanja. Prethodni slomovi na pokosu istočnog portala utjecali su na oblik konačne geometrije pokosa. Donji dio usjeka sastoji se od 4 m široke berme s nagibom 1 : 1, a gornji je dio nagnut v : h = 1 : 2. Prvi slom pokrenuo se krajem studenog 2013. na donjem dijelu pokosa neposredno iznad berma, slika 4.a. Napredovanje sloma prikazano je na slici 4.b i 4.c. Tijekom terenskog pregleda u lipnju 2015. nije zabilježeno daljnje širenje

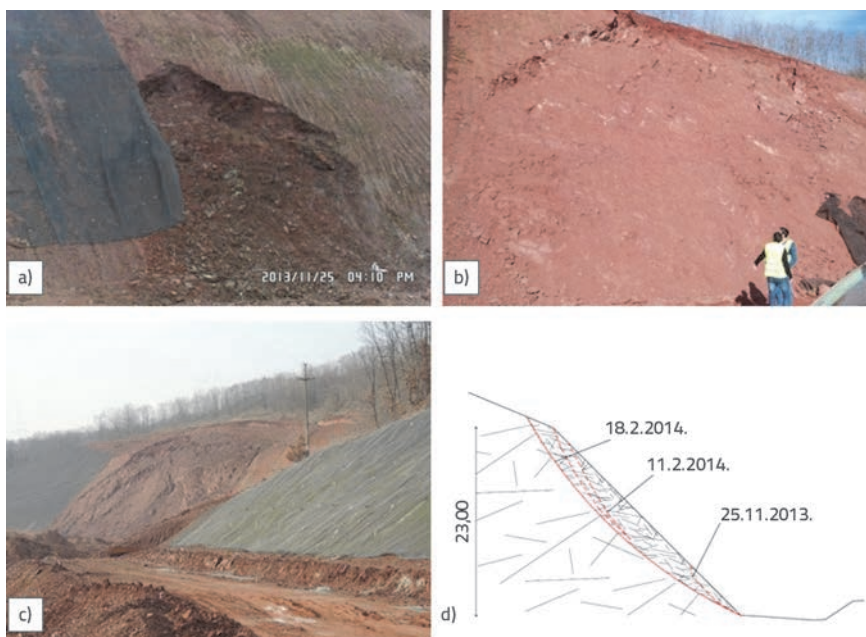


Slika 4. Slom na km 28+650: a) 27. studenoga 2013.; b) 11. travnja 2014.; c) 20. studenoga 2014.; d) Model razvoja sloma

sloma. Vjerojatno je to zbog zatrpavanja u podnožju pokosa što je spriječilo daljnje raspadanje stijenske mase.

### 3.3. Slom na km 22+850

Usjek je izgrađen s predviđenim nagibom od 1 : 1 u listopadu 2013. Najveća visina nagiba bila je 25 m. Prvi znakovi nestabilnosti pojavili su se tijekom studenog 2013. (slika 5.a). Početkom siječnja 2014. nastala je pukotina u gornjem dijelu pokosa s



Slika 5. Slom na km 22+850: a) 25. studenoga 2013.; b) 11. veljače 2014.; c) 18. veljače 2014.; d) Model razvoja sloma

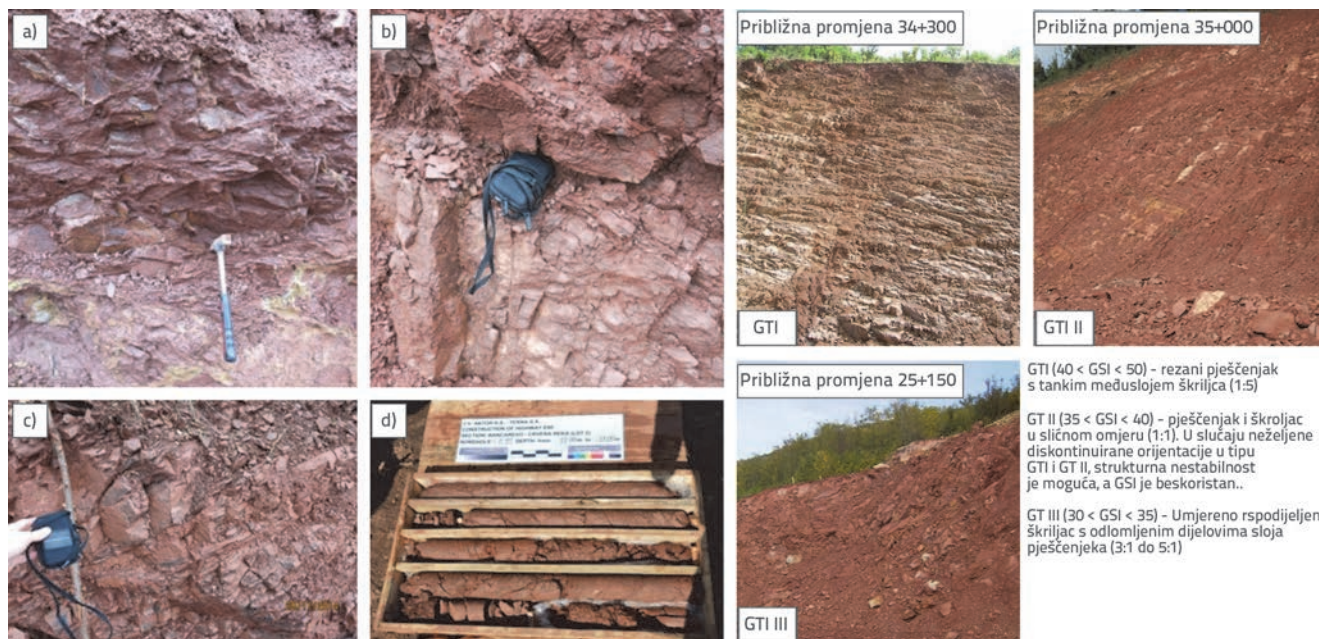
tragovima koji su se mogli pratiti do sredine visine pokosa, slika 5.b. Sredinom siječnja formirana je klizna ploha, slika 5.c. Do početka radova na sanaciji u kolovozu 2014. nisu zabilježeni znakovi daljnjeg raspadanja stijenske mase.

Zanimljivo je napomenuti da su se prvi znakovi nestabilnosti na promatranim usjecima dogodili tijekom prvog mjeseca nakon izgradnje. Nakon detaljnog ispitivanja svih nestabilnosti (kao što je prikazano u tablici 1.) zabilježeno je da je početak sloma mogao započeti u podnožju gdje je koncentracija naprezanja najveća, ali se pukotine mogu pojaviti i na sredini visine pokosa. Zbog toga nije bilo moguće utvrditi jedinstveni model razvoja sloma koji je vjerojatno usko povezan s lokalnom heterogenosti materijala na licu pokosa. Globalne plohe sloma u prvom, drugom i trećem slučaju nastale su nakon dvanaest, šest

i tri mjeseca. Vrijeme do sloma usko je povezano s početnom kvalitetom stijenske mase i geometrije usijecanja (visina i nagib). Slomovi na km 22 + 850 i 30 + 200 imaju kružne klizne plohe, a slom na km 28 + 650 nije točno kružni, što je vjerojatno vezano uz naknadno zatrpavanje podnožja usjeka. Debljina "slomljenog" materijala iznosi oko 3,5 do 4 m.

### 4. Svojstva početne posmične čvrstoće heterogenih permjskih sedimenata

Određivanje svojstava posmične čvrstoće heterogenih stijenskih masa povezano je s mnogim praktičnim poteškoćama. Ta složenost proizlazi iz činjenice da heterogene stijenske mase, kao što su prepletene riječne naslage, predstavljaju mekani (pelitni) i tvrdi (obično pješčenjak) slojevi koji se izmjenjuju u različitim omjerima. GSI klasifikacija [17, 18] je vrlo koristan alat za opisivanje stijenske mase poznat kao Hoek-Brownov materijal. GSI klasifikacijska shema, u svom postojećem obliku, dovodi do grube procjene GSI vrijednosti, pa je nekoliko autora [19-22] predložilo kvantificirane grafikone uvođenjem lako izmjerljivih parametara za blokovitost i stanje površine diskontinuiteta. U ovom radu primjenjuje se kombinacija prijedloga prema Sonmezu i Ulusayu [19] i Caiu i sur. [20]. Ukupna ocjena stanja površine dobiva se pomoću parametra SCR koji



Slika 6. Stijenska masa, neizložena vremenskom utjecaju, u glavnom ožiljku klizišta: a) km 30+200, b) 28+650, c) 26+300, d) jezgra izvađena iz bušotine na km 30+200 i tipični permski predstavnici (desno)

Tablica 2. Raspon vrijednosti za jednoosnu tlačnu čvrstoću i površinske uvjete

Stanje površine diskontinuiteta i intaktne stijene					
Litološki tip	$\sigma_c$ [MPa]	Zapreminska težina [kN/m <sup>3</sup> ]	Hrapavost	Rastrošba	Ispuna
Pješčenjak	20-45 <sup>a</sup>	25,54-26,54	2-4	3-6	4-6
Šejl	1-15	22,59-26,53	1-3	2-5	2-6

<sup>a</sup>Vrijednosti 2,3 i 100,2 MPa su eliminirane zbog velikog odstupanja od ostalih vrijednosti.

se izračunava kao zbroj ocjena za hrapavost, rastrošbu i ispunu diskontinuiteta iz RMR sustava [23]. Parametar SCR je odabran jer su autori više upoznati s RMR sustavom. Vrijednosti ocjena za rastrošbu i hrapavost izračunavaju se prema Bieniawskiu [24], a debljina i vrsta stijenske mase procijenjena izravnim pregledom pukotina. Struktura stijene određuje se procjenom veličine bloka, tj. volumena, koja se određuje iz razmaka pukotina, orijentacije pukotina, broja skupova pukotina i neprekinutosti pukotina [20]. Veličina pojedinačnih blokova izravno je izmjerena na samom mjestu.

Važno je naglasiti da su klasifikacije stijenske mase povezane s vršnim (početnim) svojstvima posmične čvrstoće i njihova uporaba je opravdana odmah nakon iskopa. Klasifikacijski sustavi stijena ne uzimaju u obzir o vremenu ovisne utjecaje poput progresivnog sloma i rastrošbe. Ti utjecaji dovode do omekšavanja stijenske mase, smanjenja posmične čvrstoće a konačno i do sloma. Stoga je važno uzeti u obzir ove utjecaje za procjenu dugoročne stabilnosti pokosa.

Pješčenjak ima blokovitu strukturu, dok je struktura šejla vrlo blokovita do raspucana, s blokovima koji su formirani s četiri i više grupa diskontinuiteta, slika 6. Blokoviti oblici su prizmatični do romboedarski, a volumen bloka varira od nekoliko desetaka

kubičnih centimetara do nekoliko kubičnih decimetara [25].

Šejlovi su tipičan Hoek-Brownov materijal.

Za određivanje geotehničkih parametara heterogenih stijenskih masa korišteni su prijedlozi za fliš [26, 27]. Ovisno o omjeru pješčenjaka / prahovnjaka i o stanju površine pukotina, utvrđene su tipa vrste stijenske mase (GT I-GT III) i GSI, slika 6.

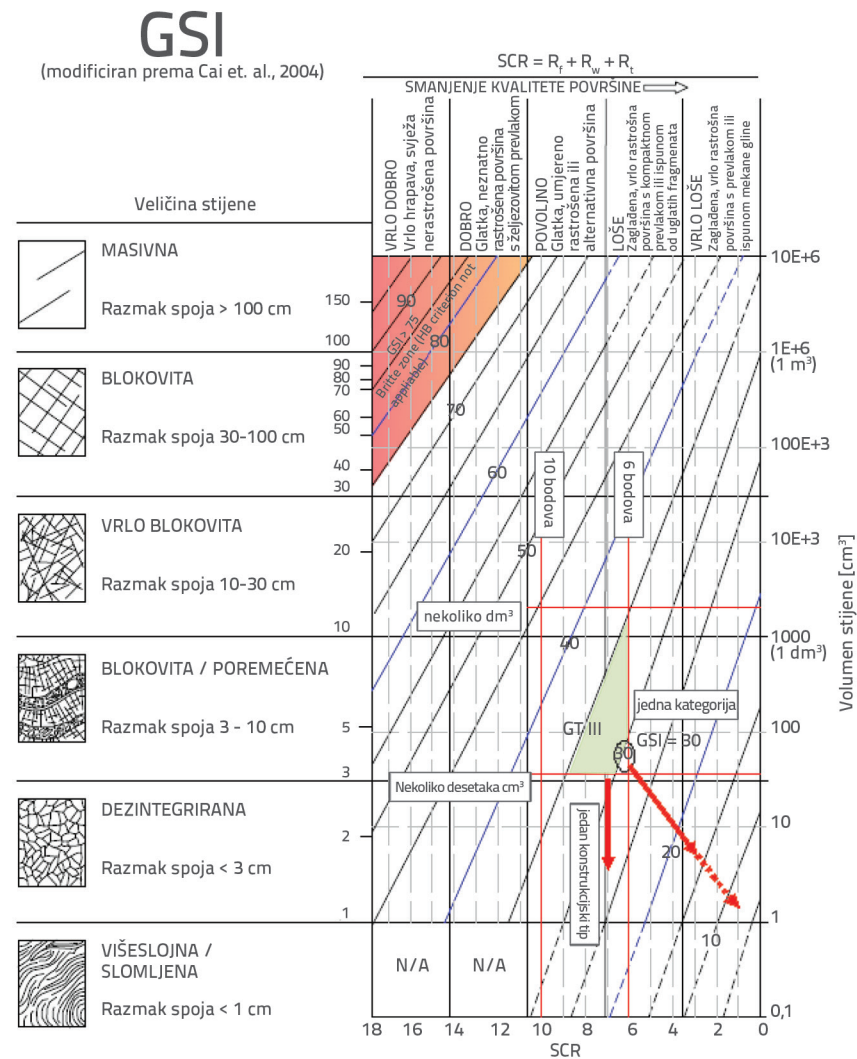
Tablica 2. prikazuje rezultate laboratorijskih pokusa na intaktnim uzorcima i prikupljene podatke za određivanje uvjeta kakvoće površine. Svojstva diskontinuiteta određena su ili na površinama neizloženim rastrošbi neposredno nakon iskopa ili nakon pregleda udubina novoformiranih nestabilnosti. Bilo je vrlo važno prikupiti strukturne podatke na svježim iskopenim površinama kako bi se izbjegao negativan utjecaj rastrošbe.

Intaktna jednoosna tlačna čvrstoća  $\sigma_c$  određena je na 25 u laboratoriju pripremljenih cilindričnih uzoraka (10 pješčenjaka i 15 uzoraka šejla) prema preporukama Međunarodnog društva za mehaniku stijena [28]. Hoek-Brownova konstanta  $m_i$  je određena prema preporukama Marinosa i Hoeka [26]. Vrijednost 17 je usvojena za pješčenjak i vrijednost 7 za šejl.

Tablica 3. prikazuje vrijednosti početnih geotehničkih svojstava permske stijenske mase. Slika 7. prikazuje kvantitativni GSI dijagram koji uzima u obzir kvalitetu površine i veličinu bloka.

Tablica 3. Početna geotehnička svojstva permske stijenske mase

Geotehnički tip	Stijenska masa i netaknuta svojstva		
	GSI	$\sigma_{ciavg}$ [MPa]	$m_i$
GT I	40-50	30	17
GT II	35-40	18	11
GT III	30-35	10,5-11,25	7,5-7,8
ŠEJL		9	7



Slika 7. Kvantificiran GSI dijagram (modificiran prema Cai i sur. [20])

## 5. Metodologija za određivanje otpornosti na dezintegraciju

Otpornost pelitne stijenske mase na dezintegraciju obično se određuje laboratorijskim pokusima. Inženjerska praksa prepoznaje nekoliko pokusa među kojima su *Jar slake test* (pokus kalanja) [29], *Slake index test* [30] i *Slake durability test* [31]. *Slake index test* odnosno pokus određivanja trajnosti najčešće se primjenjuje prema normi ASTM [32], a preporučilo

ga je Međunarodno društvo za mehaniku stijena.

Nekoliko autora [33-38] predlaže da se za stijene veće trajnosti mogu provesti više od dva standardizirana ciklusa vlaženja i sušenja, obično između tri i pet ciklusa. Bryson i sur. [39] su uveli LSI (eng. *Loss Slake Indeks*, odnosno modificirani indeks trajnosti) kako bi se uzela u obzir različita trajanja ciklusa rastrošbe na trajnosti šejla poslije samo jednog ciklusa vlaženja i sušenja. Vrlo je teško usporediti rezultate dobivene u laboratorijskim uvjetima s klanjem u terenskim uvjetima, jer na ponašanje kalanja na terenu utječu čimbenici poput smrzavanja i odmrzavanja i varijacije temperature, što se ne može lako simulirati u laboratorijskim uvjetima [40]. Pojedini autori [41, 42] predložili su modifikacije testova trajnosti radi boljeg opisivanja dezintegracije šejla u prirodnim uvjetima. Kako bi se kvantificirao stupanj dezintegracije, Erguler i Shakoore [43] predlažu uvođenje koeficijenta dezintegracije  $D_R$  izračunanog na temelju krivulje granulometrijskog sastava. Gautam i Shakoore [40] koriste koeficijent dezintegracije za kvantifikaciju stupnja dezintegracije nakon izloženosti stijene prirodnim klimatskim uvjetima tijekom određenog razdoblja. Uzorci su pripremljeni prema normi ASTM D 4644 i držani su u posebno obrađenim metalnim posudama s rupom od 2,5 cm na dnu. Rupa je prekrivena žičanom mrežom otvora 1 mm. To omogućava odvodnju atmosfere vode i kako bi frakcije veće od 1 mm ostale u tavi. Posude su postavljene na drvene palete kako bi cijelo vrijeme ostale iznad snježnog pokrova. Ograničenja umjetno stvorenih laboratorijskih uvjeta isključena su ovim postupkom.  $D_R$  je definiran kao omjer površine ispod granulometrijske krivulje određenog uzorka naspram ukupne površine ispod granulometrijskih krivulja svih ispitanih uzoraka. Gautam i Shakoore [44] odredili su rezultate laboratorijskih ispitivanja i terenskih eksperimenata u smislu 1., 2., 3., 4. i 5. ciklusa indeksa trajnosti muljnjaka, granulometrijskog sastava laboratorijskog raspucalog materijala (ovdje nazvanog  $D_{RL}$ ) i koeficijenta dezintegracije ( $D_R$ ). U ovom istraživanju indeksi trajnosti muljnjaka određeni su nakon svakog od pet testnih ciklusa, a koeficijent dezintegracije



Slika 8. Uzorci izloženi prirodnim klimatskim uvjetima

Tablica 4. Indeksi trajnosti i koeficijenti dezintegracije u prirodnim i laboratorijskim uvjetima

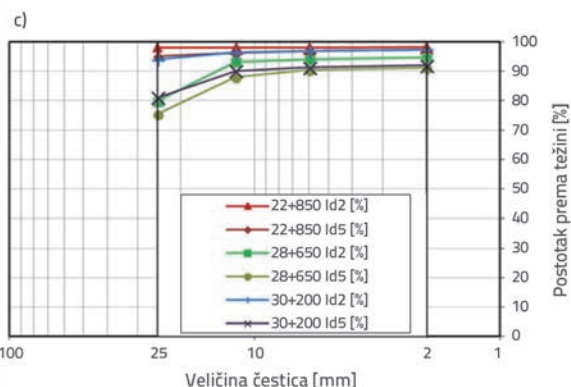
Lokacija	Potter i sur. klasifikacija	Id2 [%]/D <sub>RL2</sub>	Id5 [%]/D <sub>RL5</sub>	D <sub>R</sub> (nakon 2 mjeseca)	D <sub>R</sub> (nakon 5 mjeseci)	D <sub>R</sub> (nakon 12 mjeseci)
km 22+850	Prašinasti šejl	98/0,98	97/0,97	0,98 <sup>a</sup>	0,97 <sup>a</sup>	0,96 <sup>a</sup>
km 28+650	Muljeviti šejl	95/0,92	91/0,88	0,92 <sup>b</sup>	0,91 <sup>b</sup>	0,86 <sup>b</sup>
km 30+200	Muljeviti šejl	97/0,97	92/0,89	0,92 <sup>c</sup>	0,82 <sup>c</sup>	0,70 <sup>c</sup>

D<sub>R</sub> za <sup>a</sup>J-1(7); <sup>b</sup>J-2(12); <sup>c</sup>J-3(2)

određen je u različitim razdobljima tijekom jednogodišnje izloženosti prema gore navedenim postupcima. Ispitivani materijal preuzet je s tri proučene lokacije iskapanjem probnih jama do dubine gdje nisu bile pod utjecajem rastrošbe. Uzorci za određivanje omjera dezintegracije pripremljeni su prema normi ASTM D 4644 i stavljeni u dvanaest metalnih posuda koje predstavljaju dvanaest mjeseci, slika 8. Prije izlaganja uzorci su sušeni u pećnici 24 sata na 50 ° C. Ta je temperatura odabrana prema prijedlozima Gautama i Shakoora [40].

### 6. Rezultati pokusa dezintegracije

Rezultati ispitivanja trajnosti prikazani su u tablici 4. Slike 9.a i 9.b prikazuju uzorke prije ispitivanja i nakon drugog i petog ciklusa. Indeks trajnosti kreće se između 95 % < Id(2) < 98 %. Kako bi se razvrstao stupanj dezintegracije nakon prvog i drugog ispitnog ciklusa, Gamble [45] je predložio klasifikaciju koju su modificirali Erguler i Shakoora [43], tablica 5. Prema ovoj klasifikaciji permski sedimenti pripadaju skupini s visokim ili vrlo visokim otporom



Slika 9. a) Uzorak s km 28+650 prije pokusa i nakon drugog ciklusa, b) Uzorak s km 30+200 prije pokusa i nakon petog ciklusa, c) Granulometrijske krivulje nakon drugog i petog ciklusa



Tablica 5. Sustav klasifikacije trajnosti na temelju koeficijenta dezintegracije [43]

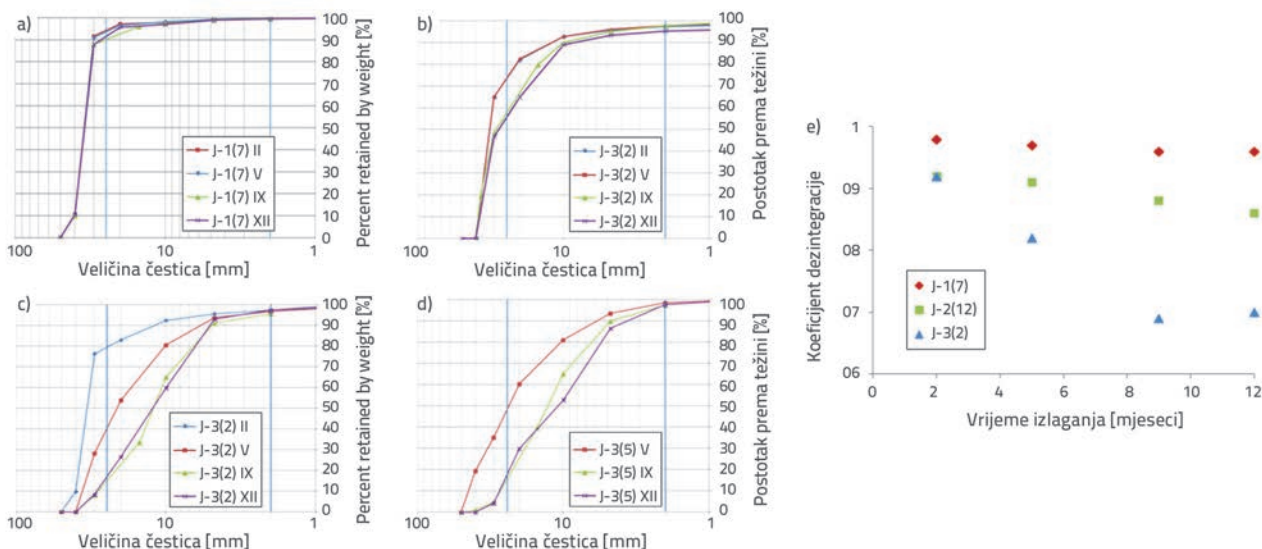
Klasifikacija trajnosti	Indeks trajnosti nakon drugog ciklusa (Id2 %)	Koeficijent dezintegracije ( $D_{RL}$ )
Vrlo visoka	> 98	0,96 - 1,00
Visoka	95 - 98	0,92 - 0,95
Srednje visoka	85 - 95	0,79 - 0,91
Srednja	60 - 85	0,50 - 0,78
Mala	30 - 60	0,20 - 0,49
Vrlo mala	< 30	0,0 - 0,19

na dezintegraciju. Materijali zadržani nakon testiranja sastoje se od velikih i malih fragmenata. Granulometrijske krivulje svih uzoraka nakon drugog i petog ciklusa prikazane su na slici 9.c. Određivanje krivulje granulometrijskog sastava nakon svakog ciklusa rastrošbe daje bolju usporedbu između laboratorijskih i uzoraka izloženih prirodnim klimatskim uvjetima. Kao što je prikazano u tablici 4.,  $D_{RL}$  vrijednost je slična onoj za odgovarajući Id indeks. Tablica 4 također pokazuje vrijednosti koeficijenta dezintegracije određenog nakon 2, 5 i 12 mjeseci za uzorke J-1 (7), J-2 (12) i J-3 (2), (vidi tablicu 6.).

Uzorci su bili izloženi prirodnim klimatskim uvjetima od travnja 2014. do travnja 2015., tijekom jednogodišnjeg razdoblja, na krovu privatne zgrade. Koeficijent dezintegracije određen je nakon 2, 5, 9 i 12 mjeseci izlaganja na reprezentativnim uzorcima iz svake lokacije. Zbog poteškoća s prijevozom, prosijavanje svih 36 uzoraka obavljeno je tek nakon 12 mjeseci izlaganja. Uzorci za koje je  $D_R$  koeficijent određen nakon 2, 5, 9 i 12 mjeseci pažljivo su odabrani nakon vizualnog pregleda tako da predstavljaju prosječni stupanj dezintegracije svih uzoraka s jednog mjesta. Nakon prosijavanja, uzorci su ponovno izloženi

Tablica 6. Koeficijent dezintegracije

Lokacija	Uzorak	$D_{R2}$	$D_{R5}$	$D_{R9}$	$D_{R12}$	Lokacija	Uzorak	$D_{R2}$	$D_{R5}$	$D_{R9}$	$D_{R12}$
km 22+850	J-1(1)		0,96	0,95	0,93	km 28+650	J-2(1)			0,86	0,84
	J-1(2)				0,90		J-2(2)				0,95
	J-1(3)				0,95		J-2(3)				0,84
	J-1(4)				0,94		J-2(4)				0,84
	J-1(5)				0,97		J-2(5)				0,97
	J-1(6)				0,93		J-2(6)				0,89
	J-1(7)	0,98	0,97	0,96	0,96		J-2(7)				0,91
	J-1(8)				0,97		J-2(8)				0,95
	J-1(9)				0,96		J-2(9)		0,97	0,91	0,90
	J-1(10)				0,96		J-2(10)				0,89
	J-1(11)			0,96	0,92		J-2(11)				0,91
	J-1(12)				0,93		J-2(12)	0,92	0,91	0,88	0,86
km 30+200	J-3(1)				0,79						
	J-3(2)	0,92	0,82	0,69	0,70						
	J-3(3)				0,78						
	J-3(4)				0,71						
	J-3(5)		0,82	0,69	0,66						
	J-3(6)				0,67						
	J-3(7)				0,68						
	J-3(8)				0,72						
	J-3(9)				0,73						
	J-3(10)			0,79	0,76						
	J-3(11)				0,83						
	J-3(12)				0,78						



Slika 10. Granulometrijski sastav: a) J-1(7), b) J-2(12), c) J-3(2), d) J-3(5), e) koeficijent dezintegracije s vremenom izloženosti



Slika 11. Uzorci 2, 5 i 12 mjeseci: a) J-1(7); b) J-2(12); c) J-3(2); d) J-3(5); i promjena površinskih stanja za uzorke e) J-1(4); f) J-2(5); g) J-3(8)

kako bi se pratila daljnja dezintegracija. Kao što je prikazano u tablici 6., uzorci s mjesta km 22 + 850 (označeni J-1) najmanje su osjetljivi na dezintegraciju, a uzorci s mjesta km 30 + 200 (označeni J-3) pokazali su najveću osjetljivost na dezintegraciju. Granulometrijski sastavi za uzorke J-1 (7), J-2 (12), J-3 (2) i J-3 (5) prikazani su na slici 10a-d. Može se vidjeti da je najveći prirast dezintegracije postignut tijekom prvih pet mjeseci izloženosti, dok je dezintegracija između 9 i 12 mjeseci izloženosti beznačajna. Dobiveni rezultati pokazuju da je stijenska masa umjereno otporna na rastrošbu (osim u slučaju uzoraka s lokacije 22 + 850). Koeficijenti dezintegracije s vremenom izloženosti za uzorke s tri mjesta prikazani su na slici 10.e. Izgled uzoraka prije i nakon izlaganja atmosferskim uvjetima prikazan je na slici 11. Slika 11. pokazuje da dezintegracija stijenske mase dvostruko utječe na mehanička svojstva permskih

sedimenata. U početku se razvijaju nove pukotine na intaktnim dijelovima, a već postojeći diskontinuiteti se šire i započinje proces fragmentacije. Tijekom daljnjeg izlaganja površine diskontinuiteta se troše, a kvaliteta im se smanjuje. Trošenje površina diskontinuiteta ne može se dobiti iz kratkotrajnih laboratorijskih pokusa. Prije izlaganja uzorci su bili malo ili umjereno istrošeni vremenskim djelovanjem, tako da je stanje površine bilo umjereno do dobre kvalitete. Nakon jednogodišnje izloženosti, kvaliteta stanja površine prosječno je smanjena za jednu kategoriju. Ove promjene također su utjecale na hrapavost površine. Ako su svi izloženi uzorci grupirani u jednu hrpu slabe stijene s ponašanjem sličnim onom koji je prikazao Hoek [46], može se zaključiti sljedeće:

- Intaktne stijene sastoje se od nekoliko međusobno preklapajućih skupova diskontinuiteta određene kvalitete. U početku imaju jednu GSI vrijednost.
- Kao posljedica izloženosti razvijaju se nove pukotine, a uzorci se raspadaju u manje fragmente. Površina diskontinuiteta se mijenja i kvaliteta se smanjuje. To dovodi do smanjenja GSI vrijednosti.

### 7. Koncept smanjenja čvrstoće zbog rastrošbe

Kao posljedica dezintegracije, GSI vrijednost se smanjuje i u horizontalnom i u vertikalnom smjeru. Početnu ocjenu SCR koeficijenta i volumena blokova treba smanjiti na GSI dijagramu, slika 7.

U nekoj točki dezintegracije promjena će napredovati u unutrašnjost stijenske mase tako da materijalnu konstantu ( $m$ ) i vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće ( $\sigma_c$ ) treba smanjiti. Faktor poremećaja je posljedica relaksacije naprezanja i / ili miniranja i ne smije se mijenjati zbog rastrožbe. Ovdje prikazani koncept odnosi se samo na smanjenje GSI vrijednosti razmatranog Hoek-Brownova materijala.

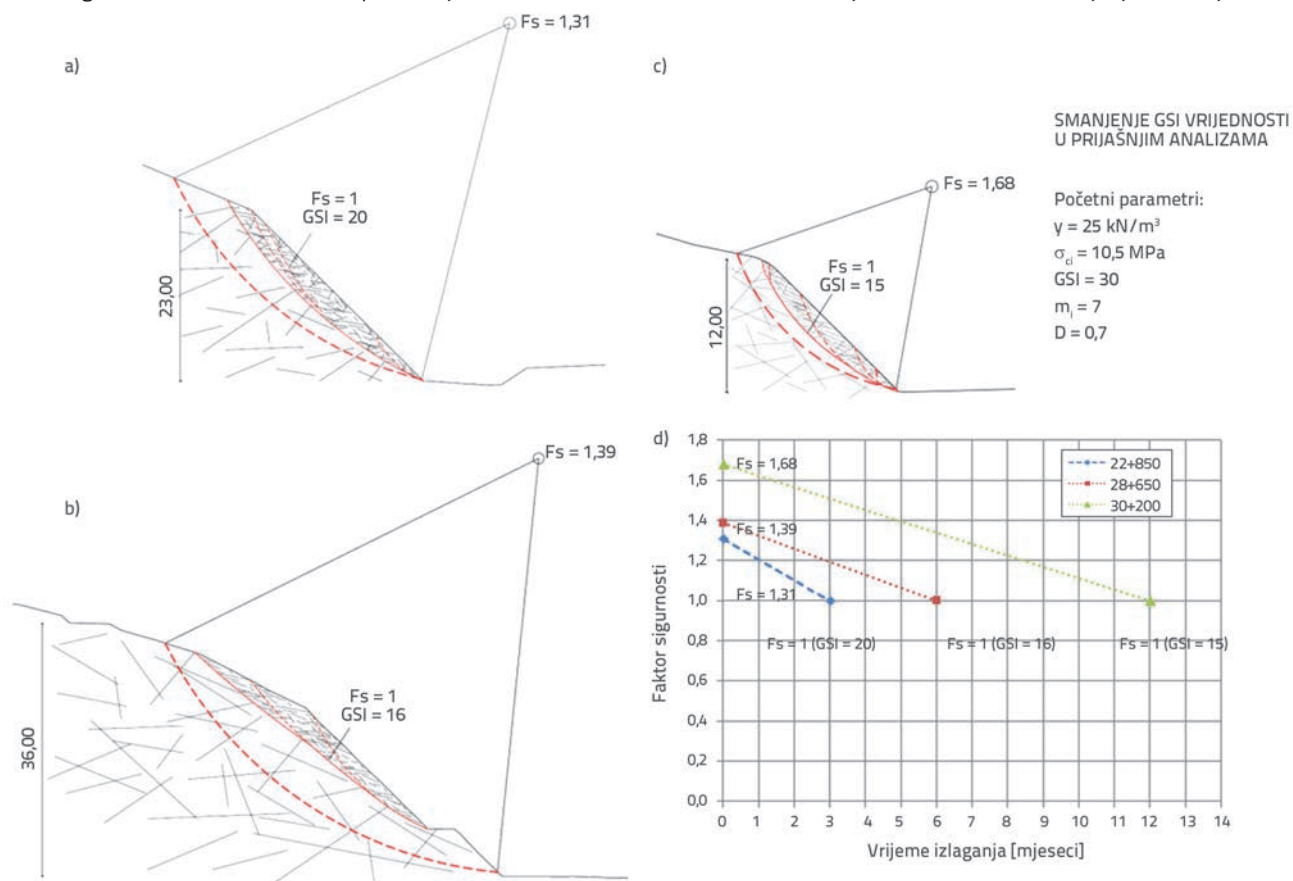
U svrhu analize utjecaja smanjenja GSI na stabilnost usjeka, obavljena je analiza stabilnosti u programskom paketu Slide uz pretpostavku ravninskog stanja deformacija. Donje granične vrijednosti početnih parametara posmične čvrstoće GT III materijala (tablica 3.) korištene su u navedenim analizama. Budući da su permski sedimenti tipični HB materijali, izračuni su izvedeni primjenom Bishopove pojednostavljene metode. Povratne su analize provedene na unaprijed definiranim plohama sloma, gdje je stanje sloma postignuto smanjenjem početne GSI vrijednosti na vrijednost za koju je FoS jednak jedinici. Metoda Morgenstern-Price, s pretpostavkom polusinusne funkcije za međulateralnu silu  $f(x)$ , upotrijebljena je za obavljanje povratnih analiza, jer je promatrana površina sloma na lokaciji km 28 + 650 poligonalnog oblika.

Glede pornih tlakova, jedina dostupna informacija je ta da je slobodno vodno lice znatno ispod uočenih slomova, pa se pretpostavlja da je usjek izveden u suhim uvjetima. Vrijednosti faktora sigurnosti odmah nakon iskopa za usjeke na km 22 +

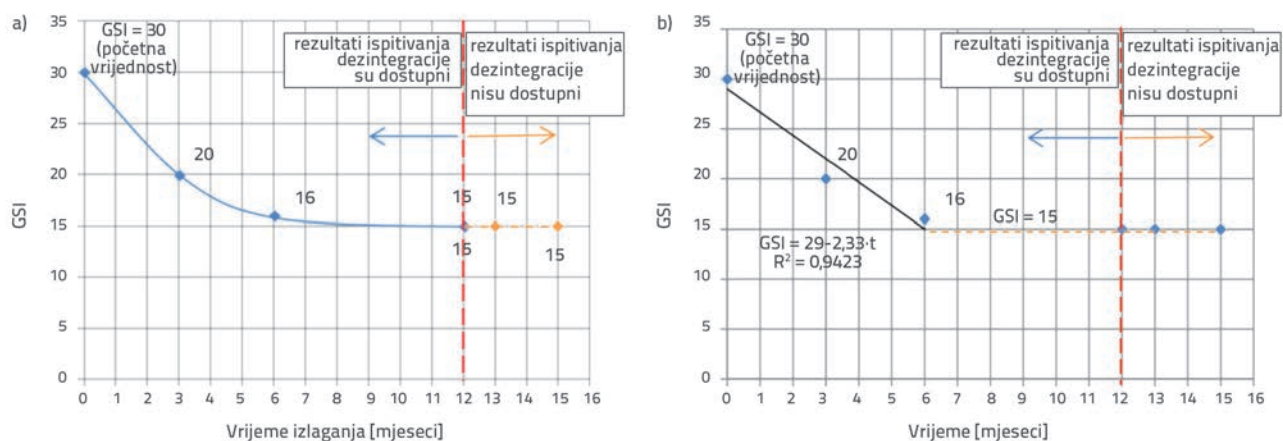
850, km 28 + 650 i km 30 + 200 su 1,31, 1,39 i 1,68. Usijecanje na km 22 + 850 je s najnižim FoS i nestabilnost se dogodila nakon tromjesečne izloženosti. Prosječna kritična GSI vrijednost u trenutku sloma iznosi 20. Globalni slom na km 28 + 650 dogodio se šest mjeseci nakon iskopa s prosječnom GSI vrijednosti 16. Najniži pokos na km 30 + 200 je s najnižom prosječnom GSI vrijednosti do 15 u vrijeme sloma. Drugim riječima, pokos s najnižim početnim FoS bit će prvi koji će doživjeti nestabilnosti u trenutku postizanja najviše kritične GSI vrijednosti. Da bi postali nestabilni, niži usjeci trebaju se dezintegrirati u većoj mjeri i doseći nižu kritičnu GSI vrijednost. Varijacija FOS s vremenom izlaganja prikazana je na slici 12.d.

Zbog heterogenosti materijala i mogućeg postojanja slabijih zona na licu usjeka, ponekad se mogu primijetiti lokalni slomovi, što rezultira nižim GSI vrijednostima.

GSI vrijednost se smanjuje za trećinu tijekom prvih tri mjeseca izloženosti, a nakon jedne godine početna GSI vrijednost smanjuje se do 50 %, slika 13. Uz GSI vrijednosti dobivene iz tri promatrane lokacije, kritične GSI vrijednosti za usjeke na km 29 + 400, km 29 + 900 i km 30 + 050 prikazane su na slici 13. Ovi svi usjeci su visine 12 metara s nagibom od 1: 1, a stanje sloma je dostignuto nakon 12, 13 i 15 mjeseci (tablica 1.). Ovo pokazuje da najveće smanjenje GSI vrijednosti treba očekivati tijekom prvih šest mjeseci nakon izlaganja. Očekuje se da će između šest i dvanaest mjeseci izloženosti smanjenje GSI vrijednosti



Slika 12. Analize stabilnosti pokosa (nisu u mjerilu): a) km 22+850, b) km 28+650, c) km 30+200, d) faktor sigurnosti s vremenom izloženosti



Slika 13. a) GSI vrijednost s vremenom izloženosti za 1:1 geometriju pokosa; b) Smanjenje GSI kao bilinearna funkcija

biti zanemarivo, dok GSI vrijednost teži prema asimptotskoj vrijednosti od 15. Ovi rezultati su općenito u skladu s brzinom dezintegracije kako je prikazano krivuljama granulometrijskog sastava, slika 10.

Smanjenje GSI može se aproksimirati bilinearnom funkcijom uz relativno visoku točnost, slika 12b. Preporučuje se korištenje konzervativne GSI vrijednosti 15 za analize stabilnosti pokosa ako ona ostane nezaštićena tijekom razdoblja duljeg od šest mjeseci. Bilinearna funkcija može se prikazati sljedećim izrazom:

$$GSI = 29 - 2,33 \cdot t \quad (\text{za } t < 6), \quad GSI = 15 \quad (\text{za } 6 < t < 15)$$

gdje je  $t$  vrijeme izlaganja u mjesecima.

## 8. Zaključci

U ovom istraživanju objašnjen je mogući uzrok velikog broja naknadnih slomova pokosa u permskim sedimentima na koje se naišlo tijekom izgradnje jednog dijela projekta autoceste E80. Sumnja se da proces rastrošbe ima ključnu ulogu u smanjenju posmične čvrstoće tipičnog HB materijala. Iako pokazatelji rastrošbe drugog ciklusa pokazuju da su prepleteni riječni uzorci vrlo otporni na dezintegraciju, izlaganje posebno pripremljenih uzoraka prirodnim klimatskim uvjetima pokazuje da uzorci imaju srednje do srednje veliku otpornost na dezintegraciju.

Nakon jednogodišnje izloženosti, kvaliteta stanja površine u prosjeku se smanjila za jednu kategoriju. To se odnosi na smanjenje vrijednosti GSI indeksa. Predlaže se bilinearna funkcija koja objašnjava pad GSI vrijednosti s vremenom izloženosti. Ovi rezultati mogu se koristiti za izvođenje analiza na usjecima različite visine i nagiba u permskim i sličnim sedimentima. To je od primarne važnosti ako su pokosi izloženi atmosferskim uvjetima duže vrijeme. Navest će se neka ograničenja predložena metodologije:

- Metodologija vrijedi samo za razmatrano razdoblje.
- Kao što je objašnjeno kod Gautama i Shakoora [44], trenutak izloženosti uzoraka prirodnim klimatskim uvjetima (npr. zimski ili ljetni mjeseci) utječe na broj ciklusa smrzavanja, odmrzavanja te sušenja i hlađenja. Nažalost, u ovom istraživanju moguće su neznatne razlike u brzini dezintegracije, budući da autori nisu bili u mogućnosti prikupljati uzorke tako da odgovaraju njihovom mjesecu izloženosti do mjeseca iskopa usjeka. Međutim, brzina dezintegracije, kako je prikazano krivuljama raspodjele veličine zrna, pokazuje dobro slaganje s promatranom brzinom dezintegracije materijala pokosa.
- Zona dezintegracije mogla bi biti deblja nego što je predloženo, pri čemu se GSI vrijednost ne mijenja ravnomjerno s dubinom. Predloženi koncept pretpostavlja prosječne GSI vrijednosti duž površine sloma.
- Ne uzima u obzir smanjenje intaktnih parametara  $\sigma_o$  i  $m_f$ .

## LITERATURA

- [1] Bjerrum, L.: Progressive failure in slopes in overconsolidated plastic clay and clay shales. Terzaghi Lecture, J Soil Mech Found Div, ASCE 93 (1967) 5, pp. 3-49.
- [2] Botts, M.E.: Effects of Slaking on the Strength of Clay Shales: A Critical State Approach, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on the Geotechnics of Hard Soils / Soft Rocks, Vol. 1, Naples, Italy, 1998.
- [3] Morgenstern, N.R., Eigenbrod, K.D.: Classification of argillaceous soils and rocks, Proc. ASCE J Geotech Eng Div. 190, GT10 (1974) pp. 1137-1156.
- [4] Mišćević, P., Vlastelica, G.: Impact of weathering on slope stability in soft rock mass, J Rock Mech Geotech Eng, 6 (2014) 3, pp. 240-250.

- [5] Vlastelica, G., Mišević, P., Pavić, N.: Testing the shear strength of soft rock at different stages of laboratory simulated weathering, *GRAĐEVINAR*, 68 (2016) 12, pp. 955-966, <https://doi.org/10.14256/JCE.1878.2016>
- [6] Badger, C.W., Cummings, A.D., Whitmore, R.L.: The disintegration of shale, *Journal of the Institute of Fuel*, 29 (1956), pp. 417-423.
- [7] Nakano, R.: On the weathering and change of Tertiary mudstone related to landslide, *Soil and Foundations*, 7 (1967), pp. 11-14.
- [8] Taylor, R.K., Spears, D.H.: The breakdown of Coal Measures rocks, *Int J Rock Mech Min Sci*, 7 (1970), pp. 481-50.
- [9] Bell, F.G.: *Engineering geology* Second ed. Elsevier Ltd., Chapter 3, pp. 77-149, 2007.
- [10] Olivier, H.J.: A new engineering-geological rock durability classification, *Eng Geol.*, 14 (1979), pp. 255-279.
- [11] Van Der Merwe, D.H.: The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils. *The Civil Engineer in South Africa*, Institute of Civil Engineers. S. Africa., 6 (1964), pp. 103-116.
- [12] O'Neill, M.W., Poormoayed, A.M.: Methodology for foundations on expansive clays, *J Soil Mech Found Div, ASCE* 106 GTI, 2 (1980), pp. 1345-1367.
- [13] Grubić, A., Đoković, I., Marović, M., Toljić, M.: Complex geological study of Resava-Mlava coal basins, Coal mine "Resavica" technical documentation, Resavica (in Serbian), 1989-1992.
- [14] Berisavljević, Z.: Weathering characteristics of heterogeneous Permian-age siltstone and mudstone sediments from Serbia, *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Symposium of the International Society for Rock mechanics EUROCK2017 Ostrava, Czech Republic*, 2017.
- [15] Vujisić, T., Navala, M., Kalenić, M., Krstić, B., Maslarević, Lj., Marković, B., Buković, J.: Explanatory booklet for the basic geological map of SFR Yugoslavia—Sheet Bela Palanka 1:100 000, Federal geological survey, Belgrade (in Serbian), 1980.
- [16] Potter, P.E., Maynard, J.B., Pryor, W.A.: *Sedimentology of Shale*, Springer Verlag, New York, 1980.
- [17] Hoek, E.: Strength of rock and rock masses, *News JISRM*, 2 1994 2 pp.4-16.
- [18] Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F.: *Support of underground excavations in hard rock*, Balkema, Rotterdam, 1995.
- [19] Sonmez, H., Ulusay, R.: Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to the stability of slopes, *Int J Rock Mech Min Sci*, 36 (1999), pp. 743-760.
- [20] Cai, M., Kaiser, P.K., Uno, H., Tasaka, Y., Minami, M.: Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system, *Int J Rock Mech Min Sci*, 41 (2004), pp. 3-19.
- [21] Russo, G.: A new rational method for calculating the GSI. *Tunnel Underground Space Technol*, 24 (2009), pp. 103-111.
- [22] Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S.: *Quantification of the Geological Strength Index Chart*, 47<sup>th</sup> US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco, 2013.
- [23] Bieniawski, Z.T.: *Engineering rock mass classifications*, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [24] Bieniawski, Z.T.: *Tunnel design by rock mass classifications*, US Army Corps of Engineers, GL-79-19, 1990.
- [25] Dearman, W.R.: *Engineering geological mapping* Butterworth - Heinemann Ltd., Oxford, 1991.
- [26] Marinos, P., Hoek, E.: Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, *Bull Eng Geol Environ*, 60 (2001), pp. 85-92.
- [27] Marinos, V.: New proposed GSI classification charts for weak or complex rock masses, *Bull Geol Soc Greece*, XLIII (2010) 3, pp. 1248-1258.
- [28] ISRM SM for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, Part 1 - SM for Determination of the Uniaxial Compressive Strength of Rock Materials, 1979.
- [29] Wood, L.E., Deo, P.: A suggested system for classifying shale materials for embankments, *Bull Assoc Eng Geol.*, 12 (1975) 1, pp. 39-55.
- [30] Deo, P.: *Shales as Embankment Materials*, PhD Thesis, Purdue University, 1972.
- [31] Franklin, J.A., Chandra, R.: The slake-durability test, *Int J Rock Mech Min Sci*, 9 (1972), pp. 325-341.
- [32] ASTM Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks, ASTM designation D 4644-08, 2008.
- [33] Taylor, R.K.: Coal measures mudrocks: composition, classification and weathering processes, *Q J Eng Geol.*, 21 (1988) 1, pp. 85-99.
- [34] Moon, V.G., Beattie, A.G.: Textural and microstructural influences on the durability of Waikato coal measures mudrocks, *Q J Eng Geol.*, 28 (1995) 3, pp. 303-312.
- [35] Bell, F.G., Cripps, J.C., Culshaw, M.G.: *Groundwater in Engineering Geology*, Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 3 (1986), pp. 1-23.
- [36] Crosta, G.: Slake durability vs ultrasonic treatment for rock durability determinations *Int J Rock Mech Min Sci*, 35 (1998) 6, pp. 815-824.
- [37] Mišević, P., Vlastelica, G.: Durability characterization of marls from the region of Dalmatia, Croatia. *Geotech Geol Eng*, 29 (2011), pp. 771-781.
- [38] Cano, M., Tomas, R.: An approach for characterising the weathering behavior of Flysch slopes applied to the carbonatic Flysch of Alicante (Spain), *Bull Eng Geol Environ* (2014), doi:10.1007/s10064-014-0632-6
- [39] Bryson, L.S., Gomez-Gutierrez, I.C., Hopkins, T.C.: Development of a new durability index for compacted shale *Eng Geol.*, 139-140 (2012), pp. 66-75.
- [40] Gautam, P., Shakoor, A.: Slaking behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions, *Eng Geol.*, 166 (2013), pp. 17-25.
- [41] Santi, P.: Field methods for characterizing weak rock for engineering, *Environ Eng Geosci*, 12 (2006) 1, pp. 1-11.
- [42] Santi, P., Higgins, J.: Methods for predicting shale durability in the field, *Geotech Test J*, 21 (1998) 3, pp. 195-202.
- [43] Erguler, Z.A., Shakoor, A.: Quantification of fragment size distribution of clay bearing rocks after slake durability testing, *Environ Eng Geosci*, 15 (2009) 2, pp. 81-89.
- [44] Gautam, T.P., Shakoor, A.: Comparing the Slaking of Clay-Bearing Rocks Under Laboratory Conditions to Slaking Under Natural Climatic Conditions, *Rock Mech Rock Eng*, 49 (2016), pp. 19-31.
- [45] Gamble, J.C.: *Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks*, PhD Thesis, University of Illinois, 1971.
- [46] Hoek, E.: Strength of jointed rock masses, 23rd. Rankine Lecture, *Geotechnique*, 33 (1983) 3, pp. 187-223.