

Usporedba projektiranja klasičnim pristupom i opservacijskom metodom na primjeru projekta osiguranja građevne jame KBC Rijeka

Gašparić, Lucija

Master's thesis / Diplomski 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:157:814983>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Lucija Gašparić

**Usporedba projektiranja klasičnim pristupom i opservacijskom
metodom na primjeru projekta osiguranja građevne jame KBC Rijeka**

Diplomski rad

Rijeka, 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo
Geotehnika
Stabilnost kosina**

**Lucija Gašparić
JMBAG: 0114026576**

**Usporedba projektiranja klasičnim pristupom i opservacijskom
metodom na primjeru projekta osiguranja građevne jame KBC Rijeka**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2020.

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**
Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Građevinarstvo
Znanstvena grana: Geotehnika

Tema diplomskog rada

**USPOREDBA PROJEKTIRANJA KLASIČNIM PRISTUPOM I OPSERVACIJSKOM METODOM NA
PRIMJERU PROJEKTA OSIGURANJA GRAĐEVNE JAME KBC RIJEKA**

**A COMPARISON OF CLASSICAL AND OBSERVATIONAL METHOD DESIGN APPROACH APPLIED
TO THE FOUNDATION PIT DESIGN FOR CLINICAL HOSPITAL RIJEKA**

Kandidatkinja: **LUCIJA GAŠPARIĆ**

Kolegij: **STABILNOST KOSINA**

Diplomski rad broj: **G-2020-20**

Zadatak:

Opservacijske metode projektiranja koriste se u geotehnici gdje u fazi projektiranja nije moguće poznavati sve uvjete koji postoje u tlu. Klasične metode projektiranja koriste u proračunima konzervativne vrijednosti parametara materijala (stijene ili tla), što rezultira konzervativnim konstrukcijama, odnosno skupljim rješenjima inženjerskih konstrukcija. Opservacijska metoda omogućuje promjenu projekta tijekom izvedbe radova nakon boljeg poznavanja stanja uvjeta u tlu. U ovom radu potrebno je opisati metode projektiranja građevnih jama u stijenskoj masi opservacijskom metodom koja omogućuje promjenu projekta tijekom izvođenja. Primjenu metode opisati na primjeru građevne jame Kliničkog bolničkog centra na Trsatu u Rijeci. Rad treba sadržavati: opći dio koji opisuje projektiranje u stijenskoj masi, opis opservacijske metode projektiranja, analize stabilnosti stijenskog zasjeke građevne jame KBC Rijeka klasičnom i opservacijskom metodom, usporedbu metoda projektiranja.

Tema rada je uručena: 25. veljače 2020.

Mentor:

prof. dr. sc. Željko Arbanas,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Diplomski rad sam izradila samostalno, u suradnji s mentorom i 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.

Lucija Gašparić

U Rijeci, 9. rujna 2020.

Zahvala

Posebna zahvala mentoru prof. dr. sc. Željku Arbanasu na stručnoj pomoći, usmjeravanju te na prenesenom znanju koje sam usvojila tokom pisanja ovog rada.

Zahvala mojim roditeljima, bratu i sestri na bezuvjetnoj podršci i ljubavi koju su mi pružili kroz sve godine mojeg obrazovanja.

SAŽETAK

Mnogo inženjerskih aktivnosti kao što su površinski objekti, prometnice, površinski i podzemni iskopi uključuju projektiranje i iskop u stijenskoj masi. Kako bi se pravilno izveli radovi u stijenskoj masi potrebno je provesti odgovarajuće geotehničke istražne radove i klasifikacijskim sustavima utvrditi kvalitetu stijenske mase. Danas se u geotehničkoj praksi susreću dva pristupa projektiranju. Prvi i prevladavajući je klasični pristup koji podrazumijeva završetak projekta prije početka gradnje. Klasični pristup također pretpostavlja najnepovoljnije karakteristike stijenske mase. Drugi pristup, pod nazivom opservacijska metoda je pristup u kojem se projekt prilagođava stvarnom stanju na terenu. U ovom radu, prikazana je usporedba ovih pristupa na primjeru osiguranja sjevernog pokosa građevne jame KBC Rijeka. U programskom paketu Rocscience, programima Phase i Slide provedene su analize stanja naprežanja i deformacija i provjere stabilnosti. Provedenom numeričkom analizom dobivene su deformacije za zadnju fazu iskopa sjevernog pokosa. Na temelju dobivenih deformacija, moguće je modificirati inicijalni projekt zaštite pokosa kako bi se optimiziralo projektno rješenje. Ovaj pristup moguć je samo uz provođenje odgovarajućeg nadzora i monitoringa.

Ključne riječi: projektiranje, stijenska masa, štapna sidra, opservacijska metoda, građevne jame

ABSTRACT

Numerous engineering activities such as surface structures, roads, surface and underground excavations include design and excavation in the rock mass. In order to properly perform works in the rock mass, it is necessary to complete appropriate geotechnical exploration works and determine the quality of the rock mass with classification systems. Today, two ways to deal with configuration meet in geotechnical practice. The first and predominant is the classical approach which suggests and implies the completion of the project before the beginning of construction. It also assumes the most unfavorable rock mass characteristics. Other method, is the observational method, is an approach in which the project adapts to the geotechnical properties of the site. Comparison and examination of these methodologies is introduced in this paper, on the example of securing the northern slope of the construction pit KBC Rijeka. Stress-strain analysis and stability analysis were performed in the Phase and Slide programs. The performed mathematical calculation and analysis obtained deformations for the last phase of the excavation of the northern slope. Based on the obtained deformations, it is possible to adapt, modify and change the starting reinforcing system design to optimize the design solution. This approach is possible only with implementation of appropriate monitoring and supervision.

Keywords: designing, rock mass, rockbolts, observational method, construction pit

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KLASIFIKACIJE STIJENSKE MASE	2
2.1. Terzaghijeva klasifikacija.....	3
2.2. Laufferova klasifikacija.....	4
2.3. Rock Quality Designation klasifikacija (RQD).....	4
2.4. Rock Structure Rating klasifikacija (RSR).....	6
2.5. Geomehanička klasifikacija (RMR)	7
2.6. Q klasifikacija.....	10
2.7. GSI klasifikacija	10
3. KARAKTERISTIKE STIJENSKE MASE	14
3.1. Kriterij čvrstoće stijenske mase.....	14
3.2. Kriterij čvrstoće diskontinuiteta	19
3.3. Deformabilnost stijenske mase.....	23
4. PROJEKTIRANJE U STIJENSKOJ MASI.....	26
4.1. Projektiranje stijenskih pokosa.....	26
4.2. Stabilizacija stijenskih pokosa.....	28
4.2.1. Stijenska sidra.....	29
5. OPĆENITO O GRAĐEVNIM JAMAMA.....	33
6. OPSERVACIJSKA METODA	37
6.1. Razvoj metode opažanja.....	37
6.2. Opservacijska metoda prema Eurocode 7 (EC7).....	38
6.3. Monitoring.....	41
7. PRIMJER GRAĐEVNE JAME KBC RIJEKA	45
7.1. Provedeni istražni radovi.....	45
7.2. Inženjerskogeološke značajke lokacije.....	46
7.3. Inženjerskogeološko kartiranje izvedenih zasjeka	47

7.4. Inženjerskogeološke zone sjevernog pokosa.....	51
7.5. Iskop i zaštita sjevernog pokosa.....	52
8. PROVJERA STABILNOSTI I ANALIZA STANJA NAPREZANJA I DEFORMACIJA GRAĐEVNE JAME KBC RIJEKA.....	54
8.1. Provjera stabilnosti	55
8.1.1. Klasični pristup.....	56
8.1.2. Opservacijska metoda.....	58
8.2. Analiza stanja naprezanja i deformacija.....	59
8.2.1. Klasični pristup.....	60
8.2.2. Opservacijska metoda.....	65
8.2.3. Usporedba rezultata	70
9. ZAKLJUČAK.....	71

POPIS SLIKA

Slika 1 Postupak određivanja RQD indeksa (Deere, 1989)	5
Slika 2 Dijagram za određivanje GSI vrijednosti (Marinos, Marinos and Hoek, 2005)	11
Slika 3 Dijagram za određivanje GSI vrijednosti za heterogene stijenske mase (Marinos, Marinos and Hoek, 2005)	12
Slika 4 Uvjeti primjene Hoek-Brownovog kriterija (Hoek, 2000)	18
Slika 5 Izravno smicanje po diskontinuitetu (Wyllie and Mah, 2017)	19
Slika 6 Profili hrapavosti s pripadajućim vrijednostima JRC (Barton and Choubey, 1977)	21
Slika 7 Procjena čvrstoće stijenki diskontinuiteta Schmidovim čekićem (Marinos, Marinos and Hoek, 2005)	22
Slika 8 Ispitivanje deformabilnosti metodom "Plate jacking test" PJT (Rezaei, Ghafoori and Ajalloeian, 2016)	23
Slika 9 Empirijske jednadžbe za procjenu modula deformabilnosti stijenske mase u usporedbi s in situ mjerenjima (Hoek and Diederichs, 2006)	24
Slika 10 Grafički prikaz odnosa modula deformabilnosti i GSI vrijednosti (Hoek and Diederichs, 2006)	25
Slika 11 Stabilni zidovi pri iskopu stijenske mase u kamenolomu (Foto L. Gašparić)	27
Slika 12 Utjecaj geoloških uvjeta na stabilnost stijenskih iskopa: a) potencijalno nestabilan-diskontinuiteti na licu kosine b) stabilnog pokosa- lice iskopa paralelno s diskontinuitetima c) stabilan pokos- diskontinuiteti usmjereni prema licu pokosa d) prevrtanje e) trošenje škriljevca kojim se stvaraju privjesi f) plitki slom u trošnoj stijenskoj masi (Wyllie and Mah, 2017)	28
Slika 13 Kategorije najčešćih mjera za stabilizaciju pokosa	29
Slika 14 Elementi sustava ojačanje (Arbanas, 2008)	30
Slika 15 Geotehnička (kabelska) sidra (Li, 2017)	30
Slika 16 Različiti slučajevi ugradnje sidara: (a) prednapregnuto sidro; (b) pasivno injektirano sidro (Wyllie and Mah, 2017)	31
Slika 17 Samobušivo sidro (Li, 2017)	32
Slika 18 Izvođenje građevne jame Zagrad B (Monterra, 2020)	33
Slika 19 Rubni uvjeti i uvjeti izvođenja (Keller Group, 2015)	35
Slika 20 Rješenja i tehnike građevnih jama (Keller Group, 2015)	36

Slika 21 Raspon uvjeta u tlu (Patel <i>et al.</i> , 2007)	40
Slika 22 Princip mjerenja inklinometrom (Arbanas, 2008).....	42
Slika 23 Akumulirani horizontalni pomaci izmjereni inklinometarskom sondom (preuzeto iz programskog zadatka L. Gašparić).....	43
Slika 24 Princip mjerenje kliznim mikrometrom (Arbanas, 2008)	44
Slika 25 Primjer fotografije jezgre iz bušotina (Geotech d.o.o., 2020).....	46
Slika 26 Pogled na sjeverni i zapadni pokos građevne jame KBC Rijeka (LiveCam Croatia, 2020).....	48
Slika 27 Pogled na sjeverni pokos (LiveCam Croatia, 2020).....	52
Slika 28 Ugradnja i injektiranje geotehničkih sidara (Foto L. Gašparić).....	53
Slika 29 Krivulja čvrstoće dobivena u RocLabu	54
Slika 30 Geometrija sjevernog stijenskog pokosa.....	55
Slika 31 Faktor sigurnosti iskopa (Klasični pristup)	56
Slika 32 Faktor sigurnosti ojačanog stijenskog pokosa (Klasični pristup).....	57
Slika 33 Faktor sigurnosti za iskop (Opservacijska metoda)	59
Slika 34 Dijagram horizontalnih pomaka za sve faze (Klasičan pristup).....	61
Slika 35 Prikaz deformirane mreže za završnu fazu (Klasični pristup)	62
Slika 36 Vertikalna naprezanja za završnu fazu (Klasični pristup).....	62
Slika 37 Horizontalna naprezanja za završnu fazu (Klasični pristup).....	63
Slika 38 Dijagram uzdužnih sila u sidru #5 (Klasični pristup).....	64
Slika 39 Dijagram horizontalnih pomaka za sve faze (Opservacijska metoda)	66
Slika 40 Prikaz deformirane mreže za završnu fazu (Opservacijska metoda)	67
Slika 41 Vertikalna naprezanja za završnu fazu (Opservacijska metoda).....	67
Slika 42 Horizontalna naprezanja za završnu fazu (Opservacijska metoda).....	68
Slika 43 Dijagram uzdužnih sila u sidru #2 (Opservacijska metoda).....	69
Slika 44 Usporedba horizontalnih pomaka završne faze klasičnog pristupa i opservacijske metode	70

POPIS TABLICA

Tablica 1 Opis značajki vrsta stijenske mase prema Terzaghijevoj teoriji opterećenja (Singh, Goel and Goel, 2006)	3
Tablica 2 Odnos RQD indeksa i kvalitete stijenske mase (Bieniawski, 1989)	5
Tablica 3 Odnos vrijednosti RMR-a i kvalitete stijenske mase (Bieniawski, 1989).....	8
Tablica 4 Rock Mass Rating System RMR (Bieniawski, 1989)	8
Tablica 5 Utjecaj pružanja i orijentacije nagiba diskontinuiteta (Hoek, 2000).....	9
Tablica 6 Procjena jednoosne tlačne čvrstoće (Hoek, 2000).....	15
Tablica 7 Vrijednosti konstante mi za intaktnu stijenu, prema podijeli stijena (Hoek, 2000) ..	16
Tablica 8 Predložene vrijednosti faktora poremećenosti stijenske mase (D) (Hoek, 2000).....	17
Tablica 9 Jednadžbe za procjenu modula deformabilnosti (Hoek and Diederichs, 2006)	24
Tablica 10 Metode izvođenja građevnih jama (Nonveiller, 1979).....	34
Tablica 11 RMR klasifikacija sjevernog pokosa Z10 (Arbanas, 2017)	49
Tablica 12 Inženjerskogeološke jedinice.....	50
Tablica 13 Parametri za provjeru stabilnosti (Klasičnom pristupu)	56
Tablica 14 Parametri za analizu stabilnosti (Opservacijska metoda).....	58
Tablica 15 Parametri za analizu stanja naprezanja i deformacija (Klasični pristup).....	60
Tablica 16 Parametri za analizu stanja naprezanja i deformacija (Opservacijska metoda).....	65

1. UVOD

Mnogo inženjerskih aktivnosti kao što su brane, mostovi, prometnice, površinski i podzemni iskopi uključuju projektiranje i iskop u stijenskoj masi. Stijenska masa *in situ* ima sljedeća svojstva: heterogenost, anizotropnost, raspucanost i prirodna napregnutost. Uključuje intaktnu stijenu i diskontinuitete, o kojima uvelike ovise inženjerske značajke stijenske mase. Osnovna nosiva komponenta stijenske mase jest ona sama, dok u tlu nosivi element predstavlja podgradna konstrukcija od inženjerskih materijala. Modifikacije za osiguranje stabilnosti provode se zahvatima poboljšanja i ojačanja. Danas se u geotehničkoj praksi susreću dva pristupa projektiranju. Prvi i prevladavajući je klasični pristup koji podrazumijeva završetak projekta prije početka gradnje. Drugi pristup, pod nazivom opservacijska metoda je pristup u kojem se projekt prilagođava stvarnom stanju na terenu. U ovom radu, prikazana je usporedba ovih pristupa na primjeru izvedbe sjevernog pokosa građevne jame KBC Rijeka. Projektiranje u stijenskoj masi podrazumijeva određene korake. Geotehnička istraživanja važan su korak u procesu projektiranja stijenskih iskopa. Sastoje se od inženjerskogeološkog kartiranja, istraživačkog bušenja, determinaciji i klasifikaciji izbušene jezgre i laboratorijskom ispitivanju uzorka. Klasifikacija stijenske mase razvija se preko 100 godina otkako je Ritter 1879. godine pokušao razviti empirijski pristup pri određivanju potrebnog ojačanja kod projektiranja tunela (Hoek, 2000). U radu je opisan razvoj mnogih klasifikacija do onih koji su danas u upotrebi. Na temelju geotehničkih istraživanja i upotrebi klasifikacijskih sustava mogu se odrediti deformabilnost i parametri čvrstoće koji su neophodni za provedene analize. Provjere stabilnosti provedene su u programskom paketu Rocscience Slide metodom granične ravnoteže, a analize naprezanja i deformacija u računalnom programu Phase2 koji implementira metodu konačnih elemenata. Analiza klasičnog pristupa provedena je konzervativno, usvajajući najnepovoljnije uvjete koji se mogu pojaviti u stijeni. Analiza po pristupu opservacijske metode provedena je usvajajući parametre koji su utvrđeni u tijeku izvođenja zaszeka. Opservacijska metoda, razvijena je iz potrebe da se izbjegnu konzervativne pretpostavke o uvjetima u tlu/stijenskoj masi (Szavits Nossan, 2006). Metodu koju su u prošlosti intuitivno koristili mnogi, ali prvi je prepoznaje i opisuje Terzaghi (Terzaghi and Peck, 1967).

2. KLASIFIKACIJE STIJENSKE MASE

Klasifikacije stijenske mase razvijaju se preko 100 godina otkako je Ritter 1879. godine pokušao razviti empirijski pristup pri određivanju potrebnog ojačanja kod projektiranja tunela (Hoek, 2000). Prvi veći klasifikacijski sustav zasnovan na opterećenju stijenske mase predložio je Terzaghi 1946. godine. Klasifikacija stijenske mase danas čini sastavni dio empirijskih projektnih metoda. Međutim, klasifikacija nikad nije bila namijenjena kao jedinstveno projektno rješenje nego kao sredstvo kojim se dolazi do njega. U suštini, klasifikacija stijenske mase nikad ne smije biti zamjena za proces projektiranja.

Ciljevi klasifikacije stijenske mase su sljedeći (Bieniawski, 1989):

1. Identificirati najznačajnije parametre koju utječu na ponašanje stijenske mase,
2. Grupiranje određene formacije stijenske mase,
3. Osigurati osnovu za razumijevanje karakteristika svake klase stijenske mase,
4. Usporediti uvjete stanja stijenske mase na lokaciji sa iskustvima stečenim na lokacijama sličnih uvjeta,
5. Prikupljanje podataka i smjernica za projektiranje,
6. Osigurati osnovu za komunikaciju inženjera i geologa.

Sljedećih šest klasifikacija stijenske mase spadaju među značajnije te će biti opisane u nastavku:

- Terzaghijeva klasifikacija,
- Laufferova klasifikacija,
- Rock Quality Designation klasifikacija (RQD),
- Rock Structure Rating klasifikacija (RSR),
- Geomehanička klasifikacija (RMR),
- Q klasifikacija (Rock Tunneling Quality Index).

Zajedno s navedenim klasifikacijama bit će opisan koncept geološkog indeksa čvrstoće (engl. *Geological Strength Index (GSI)*) koji se koristi u novije vrijeme.

2.1. Terzaghijeva klasifikacija

Mnogo izgrađenih tunela koristi neki sustav klasifikacije. Najčešće korištena i poznata je Terzaghijeva klasifikacija opterećenja stijenske mase koja se pokazala uspješna kod izvedbe tunela s podgradom od čeličnih lukova. Međutim, sustav je prigodan za navedenu vrstu podgrade, ali ne i za novije metode kao što su mlazni beton i geotehnička sidra. 1970. Deere je modificirao klasifikaciju te predložio nove sustave klasifikacije koji uzimaju u obzir nove napretke u razvoju tehnologije stabiliziranja stijenske mase (Bieniawski, 1989).

Značaj Terzagijeve klasifikacije je doprinos opisu pojedinih značajki stijenske mase, naročito u uvjetima u kojima geostatička naprezanja imaju presudan utjecaj (Hoek, 2000). Uvedeni su sljedeći pojmovi i opisi prikazani u Tablici 1.

Tablica 1 Opis značajki vrsta stijenske mase prema Terzaghijevoj teoriji opterećenja (Singh, Goel and Goel, 2006)

Vrste stijena	Definicija
Intaktna stijenska masa	Ne sadrži pukotine. Stoga, ako se lomi, lomi se preko intaktne stijene.
Uslojena stijenska masa	Sastoji se od pojedinih slojeva te su oni obično široko razdvojeni. Česta pojava ljuštenja.
Umjereno ispucala stijenska masa	Sadrži diskontinuitete. Ispucala stijena. Pukotine su široko odvojene. Može doći do ljuštenja.
Stijenska masa u blokovima	Pukotine su manje udaljene. Stijena se sastoji od kemijski netaknutih ili gotovo netaknutih fragmenata stijene koji su u potpunosti odvojeni jedni od drugih. U takvoj vrsti stijene okomiti zidovi mogu zahtijevati bočnu potporu.
Raspadnuta stijenska masa	Kemijski netaknuta stijena ima karakter drobljenja.

Stijenska masa podložna skupljanju	Pojava gnječenja koja polako napreduje u tunel bez primjetnog povećanja volumena.
Stijenska masa podložna bubrenju	Bubrenje tj. povećanje volumena stijene uzrokovano povećanjem sadržaja vode.

2.2. Laufferova klasifikacija

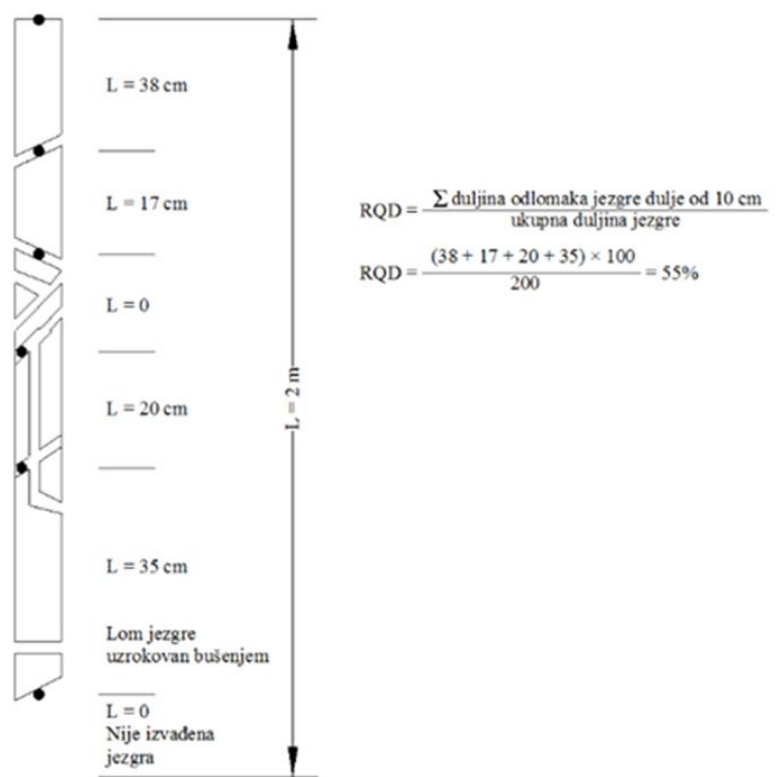
Laufferova klasifikacija iz 1958. temelji se na ranijim radovima Stinija (1950) koji se smatra ocem "austrijske škole" na području mehanike stijena i tunela. Stini je naglašavao značaj strukturnih nedostataka u stijenskoj masi. Laufferova klasifikacija stijenske mase predlaže korelaciju vremena postojanosti stijenskog iskopa nepodgrađenog raspona u odnosu na različite klase stijenske mase. Vrijeme postojanosti nepodgrađenog raspona predstavlja vrijeme u kojem tunnelski raspon može stajati bez podgrade. Laufferova izvorna klasifikacija se više ne koristi jer su je austrijski inženjeri nekoliko puta modificirali što je dovelo do razvoja Nove Austrijske tunnelske metode, NATM (Bieniawski, 1989).

2.3. Rock Quality Designation klasifikacija (RQD)

RQD indeks, pokazatelj kvalitete stijenske mase, razvio je D.U. Deere 1964. godine te ga objavio tri godine kasnije. Indeks je definiran kao postotak intaktne jezgre koja sadrži odlomke dužine 100 mm ili više u ukupnoj dužini izbušene jezgre (Slika 1). Kako bi se pravilno odredio RQD indeks, Međunarodno društvo za mehaniku stijena predlaže veličinu promjera jezgre NX (54.7 mm) bušenu dvostrukom sržnom cijevi. Tablica 2 u nastavku prikazuje odnos RQD indeksa i kvalitete stijenske mase koji je predložio Deere.

Tablica 2 Odnos RQD indeksa i kvalitete stijenske mase (Bieniawski, 1989)

RQD indeks [%]	Kvaliteta stijenske mase
<25	Vrlo slaba
25- 50	Slaba
50 -75	Povoljna
75- 90	Dobra
90- 100	Odlična



Slika 1 Postupak određivanja RQD indeksa (Deere, 1989)

Iako je RQD jednostavna i povoljna metoda, sama po sebi nije dostatna za adekvatan opis stijenske mase zato što ne uzima u obzir orijentaciju i debljinu pukotina te materijal ispune (Bieniawski, 1989). Danas se koristi kao standardan parametar u logovima i formama istražnih bušotina te kao jedan od osnovnih elemenata RMR i Q klasifikacije.

2.4. Rock Structure Rating klasifikacija (RSR)

RSR koncept, model za predviđanje podgradnog sustava, razvili su 1972. godine Wickham, Tiedemann i Skinner. Za razliku od Terzaghijeve kvalitativne klasifikacije, RSR klasifikacija daje kvantitativni opis kvalitete stijenske mase. Nadalje, RSR je klasifikacija stijenske mase koja uzima u obzir mnogo parametara, za razliku od RQD indeksa. Suprotno Laufferovoj klasifikaciji, RSR koncept zasniva se na temelju iskustava stečenih projektiranjem koja im pružaju potrebne informacije o podgrađivanju (Bieniawski, 1989).

Glavni doprinos RSR klasifikacije je uvođenje sustava bodovanja. Ova klasifikacija uzima u obzir dvije kategorije parametara koji utječu na ponašanje stijenske mase, a to su geološki parametri i parametri podgradne konstrukcije. Wickham, Tiedmann i Skinner grupirali su faktore geoloških i podgradnih parametara u tri osnovna parametra, A, B i C. RSR vrijednost pojedine dionice tunela dobivena je zbrajanjem numeričkih vrijednosti svakog parametra maksimalne vrijednosti 100. Prema tome $RSR = A + B + C$, gdje su A, B i C parametri kako slijedi (Bieniawski, 1989):

1. Parametar A: Generalna procjena geološke strukture zasnovana na:

- a) Porijeklu tipa stijena (magmatska, metamorfna, sedimentna),
- b) Tvrdoci stijenske mase (tvrda, srednja, meka, raspadnuta),
- c) Geološkoj strukturi (masivna, slabo raspucala, srednje raspucala, jako raspucala).

2. Parametar B: Efekt položaja pukotina uz poštivanje smjera napredovanja tunela zasnovana na:

- a) Razmaku pukotina,

- b) Orijentaciji pukotina (nagib i smjer pružanja),
- c) Smjeru napredovanja tunela.

3. Parametar C: Efekt utjecaja toka podzemne vode zasnovan na:

- a) Ukupnoj kvaliteti stijenske mase na osnovi kombinacije A i B parametara,
- b) Uvjetima pukotinskog sustava (dobar, povoljan, slab),
- c) Vrijednosti dotoka podzemne vode.

2.5. Geomehanička klasifikacija (RMR)

Geomehaničku klasifikaciju odnosno "Rock Mass Rating System (RMR)", razvio je Bieniawski tokom 1972- 1973 za projektiranje podgradnih sustava tunela i karakterizaciju stijenske mase. Tijekom godina sustav se pokazao uspješan obzirom da su brojeve modifikacije nastale na temelju stečenog iskustva i međunarodnih standarda. Najviše korištene verzije su iz 1976. i 1989. godine, a nadalje u ovom radu biti će opisana klasifikacija RMR₈₉. Stijenska masa se klasificira na temelju sljedećih šest parametara (Hoek, 2000):

1. Jednoosna čvrstoća stijenskog materijala,
2. RQD indeks,
3. Razmak diskontinuiteta,
4. Stanje diskontinuiteta,
5. Uvjeti podzemne vode,
6. Orijentacija diskontinuiteta.

U primjeni, stijenska masa dijeli se u pojedinačne strukturne regije te se svaka regija klasificirana zasebno. Granice strukturnih regija uobičajeno su značajne strukturne pojave kao što su rasjedi, zdrobljene zone ili promjene tipa stijenske mase. Tablica 4 prikazuje podjelu pet parametara grupiranih u pet raspona vrijednosti. Raspon vrijednosti nije jednak za sve parametre zato što parametri nisu jednakog značaja. Šesti parametar (Tablica 5), utjecaj pružanja i orijentacije nagiba diskontinuiteta tretira se odvojeno te koristi ovisno o kojoj je inženjerskog

primjeni riječ (Bieniawski, 1989). Bodovi se sumiraju i ukupna suma daje vrijednost RMR-a u rasponu od 0 do 100 (Tablica 3).

Tablica 3 Odnos vrijednosti RMR-a i kvalitete stijenske mase (Bieniawski, 1989)

Opis	Bodovi
Vrlo dobra stijena	81- 100
Dobra stijena	61- 80
Povoljna stijena	41- 60
Loša stijena	21- 40
Vrlo loša stijena	< 20

Tablica 4 Rock Mass Rating System RMR (Bieniawski, 1989)

A. Klasifikacijski parametri i njihovi bodovi											
Parametri		Vrijednosti parametara									
1	Čvrstoća intaktnih stijena (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	30	Neznatno hrapave površine Zijev < 1 mm Stijenka zidova neznatno rastrošene	25	Neznatno hrapave površine Zijev < 1 mm Stijenka zidova jako rastrošene	20	Sliske površine ili ispuna < 5 mm Zijev 1-5 mm Kontinuirani	10	Mekana ispuna > 5 mm ili Zijev > 5 mm Kontinuirani	0
		Bodovi	30	25	20	10	0				
5	Podzemna voda	Dotok na 10 m duljine tunela (l/m)	nema	< 10	10-25	25-125	>125				
		Odnos tlaka puk. vode i većeg gl. napreznja	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5				
		Opći uvjeti	kompletno suho	vlažno	mokro	kapanje	tečenje				
		Bodovi	15	10	7	4	0				

B. 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

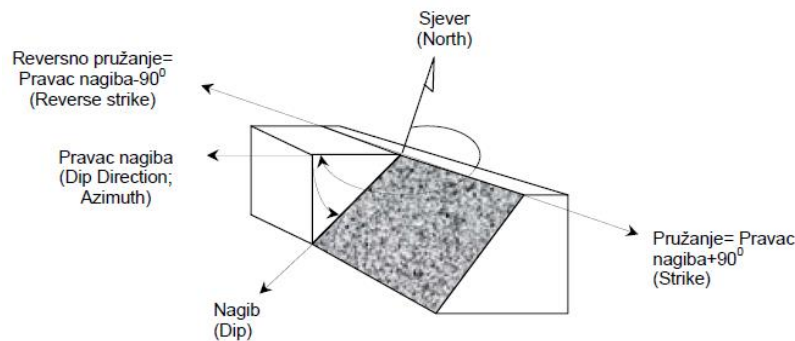
C. Kategorizacija stijenske mase na osnovi ukupnog broja bodova					
Ukupni bodovi	100-81	80-61	60-41	40-21	<21
Oznaka kategorije	I	II	III	IV	V
Opis	Vrlo dobra stijena	Dobra stijena	Povoljna stijena	Slaba stijena	Vrlo slaba stijena

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	tvrdna ispunjena <5 mm	tvrdna ispunjena >5mm	meka ispunjena <5 mm	meka ispunjena >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

Tablica 5 Utjecaj pružanja i orijentacije nagiba diskontinuiteta (Hoek, 2000)

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	



2.6. Q klasifikacija

Q sustav klasifikacije stijenske mase engl. Rock Mass Quality System, razvili su 1974. godine članovi Norveškog Geotehničkog Instituta, Barton, Lien i Lunde (Bieniawski, 1989). Klasifikacijski sustav temelji se na stečenom iskustvu pri iskopu 212 tunela, od kojih je većina izvedena u Skandinaviji. Jednako kao i RMR klasifikacija, sustav se temelji na numeričkoj procjeni kvalitete stijenske mase uz pomoć sljedećih šest parametara:

1. RQD indeks kvalitete jezgre
2. J^n broj skupova pukotina
3. J^r indeks hrapavosti pukotina
4. J^a indeks alteracije pukotina
5. J^w faktor pukotinske vode
6. SRF faktor redukcije naprezanja

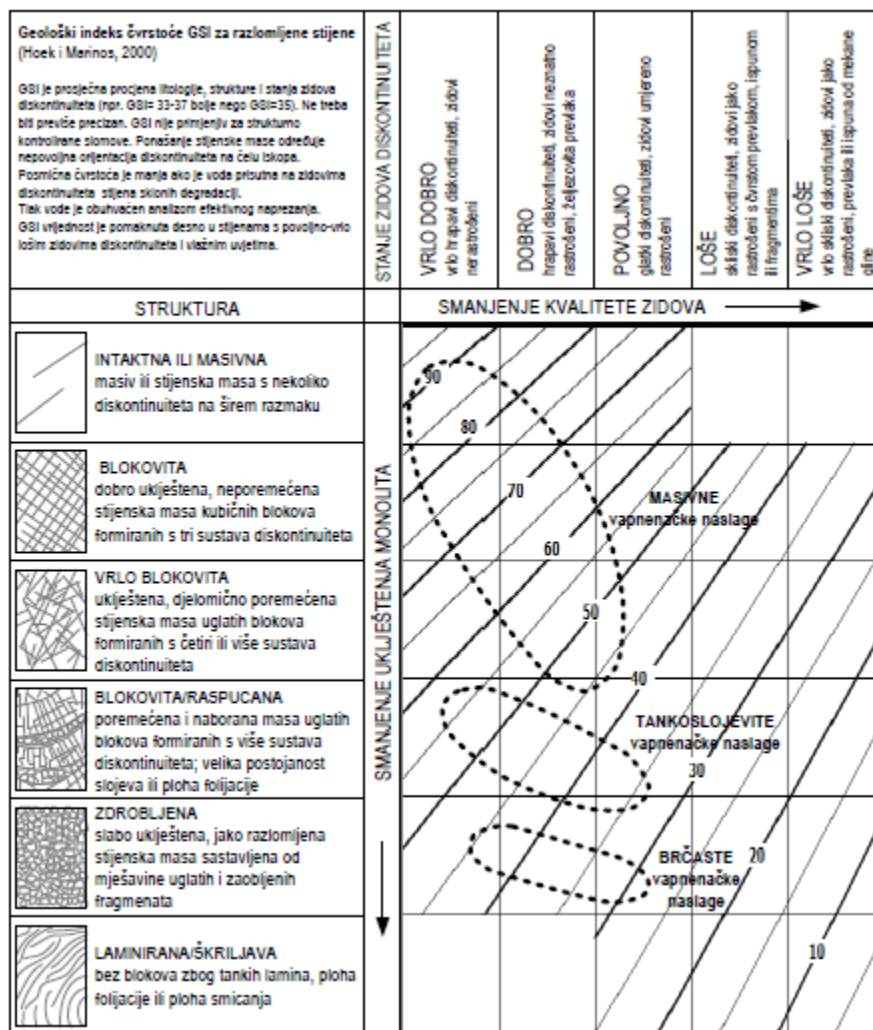
$$Q = \left(\frac{RQD}{J^n} \right) \times \left(\frac{J^r}{J^a} \right) \times \left(\frac{J^w}{SRF} \right) \quad (1)$$

Jednadžba (1) kojom se određuje vrijednost Q definira se kao umnožak tri kvocijenta, od kojih prvi predstavlja strukturu stijenske mase, drugi predstavlja vrijednost približne posmične čvrstoće između blokova te treći predstavlja aktivni tlak stijenske mase. Dobivena numerička vrijednost varira od $Q= 0.001$ do maksimalne vrijednosti $Q= 1000$ na logaritamskoj ljestvici kvalitete stijenske mase.

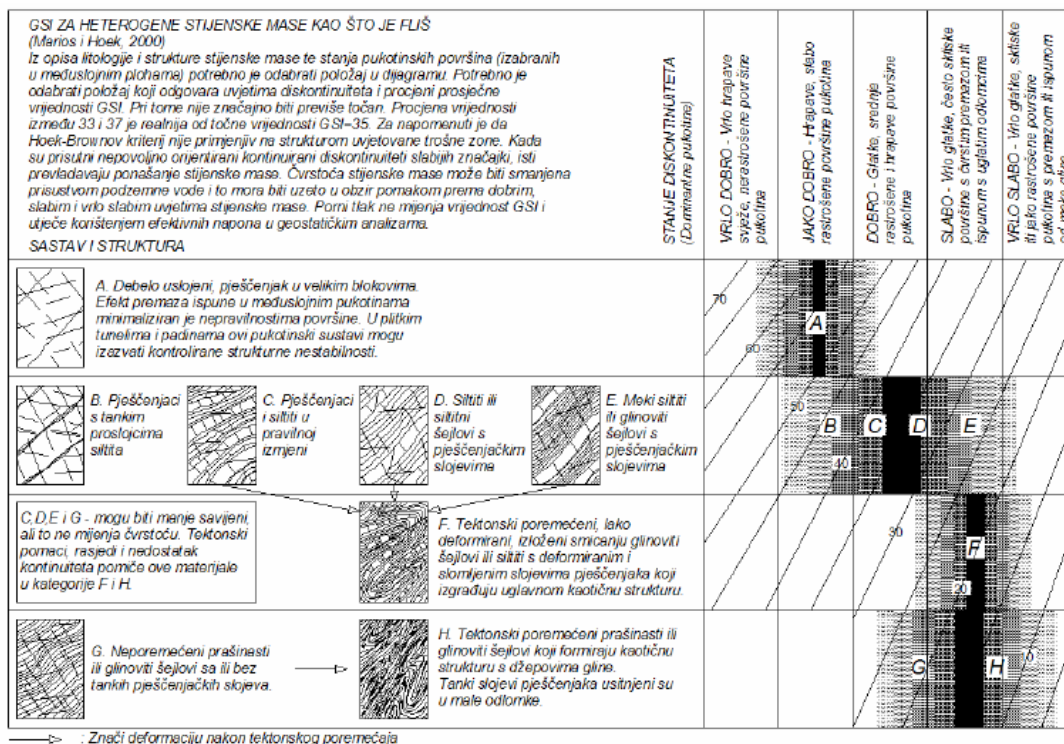
2.7. GSI klasifikacija

Hoek i Brown došli su do zaključka kako kriterij čvrstoće nema praktičnu vrijednost osim ako nije u vezi s geološkim opažanjima koji se provode relativno brzo i jednostavno. S vremenom je postalo očito da RMR sustav nije adekvatan za stijenske mase vrlo loše kvalitete. RMR i Q klasifikacije uključuju te su ovisne o RQD indeksu koji za slabe stijenske mase iznosi nula. Postalo je jasno kako je potrebno razviti alternativni klasifikacijski sustav.

Novu klasifikaciju, Geološki indeks čvrstoće te njenu primjenu kod Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće razvio je i opisao Hoek (1994), Hoek et al. (1995) i Hoek Brown (1997). Evert Hoek i Paul Marinos u Grčkoj su susreli teške uvjete pri iskopu tunela te na temelju iskustva razvili GSI sustav koji uključuje stijenske mase vrlo loše kvalitete (Slika 2). Isto tako su proširili primjenu na heterogene stijenske mase (Slika 3) (Marinos, Marinos and Hoek, 2005).



Slika 2 Dijagram za određivanje GSI vrijednosti (Marinos, Marinos and Hoek, 2005)



Slika 3 Dijagram za određivanje GSI vrijednosti za heterogene stijenske mase (Marinos, Marinos and Hoek, 2005)

GSI indeks je zasnovan na procjeni litologije, strukture i uvjeta površine diskontinuiteta u stijenskoj masi i određuje se vizualnim ispitivanjem stijenske mase vidljive u zasjecima, u površinskim iskopima kao što su zasjeci za ceste, lica tunela i jezgre bušotina. GSI se određuje kombinacijom dva osnovna parametra geološkog procesa, blokovitost stijenske mase i uvjeta diskontinuiteta, uvažavajući glavna geološka ograničenja koja određuju formaciju, pa je zbog toga indeks koji se lako primjenjuje na terenu.

GSI klasifikacijski sustav temelji se na pretpostavci da stijenska masa sadrži dovoljan broj slučajno orijentiranih diskontinuiteta na način da se ponaša kao izotropna masa. Stoga se GSI sustav ne smije primijeniti kod stijenske mase u kojoj je jasno definirana dominantna strukturalna orijentacija (Marinos, Marinos and Hoek, 2005).

U cilju povezivanja vrijednosti GSI i RMR klasifikacije predloženi su sljedeći odnosi:

-za $RMR_{76} > 18$ vrijedi:

$$GSI = RMR_{76}$$

-za $RMR_{89} > 23$ vrijedi:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

Tijekom ranih godina primjene GSI sustava, vrijednost GSI određuje se izravno preko RMR-a. Međutim, korelacija se pokazala nepouzdana, posebice za stijenske mase loše kvalitete. Stoga se za određivanje GSI vrijednosti preporučuje korištenje dijagrama na slikama 2 i 3 (Hoek, 2000).

3. KARAKTERISTIKE STIJENSKE MASE

Pouzdana procjene čvrstoće i deformabilnosti stijenskih masa prijeko potrebne su za bilo koji oblik analize koji se koristi za projektiranje stabilnosti padina, temeljenju i izvedbi podzemnih otvora.

3.1. Kriterij čvrstoće stijenske mase

U ovom radu bit će prikazana najnovija verzija Hoek-Brownovog kriterija u obliku koji se pokazao praktičan. Opći oblik Hoek-Brownovog kriterija za procjenu čvrstoće stijenske mase, uveo je Hoek et al. (1995), dan je izrazom (Hoek and Brown, 2019):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

gdje su:

σ'_1 i σ'_3 veće i manje glavno efektivno naprezanje pri slomu,
 m_b je vrijednost Hoek-Brownove konstante m za stijensku masu,
 s i a su konstante ovisne o karakteristikama stijenske mase, i
 σ_{ci} je jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene.

Gdje god moguće vrijednosti konstanta σ_{ci} i m_i trebale bi se utvrditi statističkom analizom rezultata dobivenih ispitivanjem u triaksijalnom uređaju na uzorcima jezgara. U slučaju da laboratorijska ispitivanja nisu dostupna, Tablice 6 i 7 mogu se koristiti za usvajanje vrijednosti (Hoek, 2000).

Tablica 6 Procjena jednoosne tlačne čvrstoće (Hoek, 2000)

Stupanj	Opis stijenske mase	Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)	Point load test (PLT) (MPa)	Terenska procjena čvrstoće	Primjeri
R6	Ekstremno čvrsta	>250	>10	Uzorak se s geološkim čekićem jedino okrhne	Svježi bazalt, čert, diabaz, gnajs, granit, kvarcit
R5	Vrlo čvrsta	100-250	4-10	Uzorak zahtijeva veliki broj udaraca geološkim čekićem da bi se slomio	Amfibiolit, pješčenjak, bazalt, gabro, gnajs, granodiorit, vapnenac, mramor, riolit, tuf
R4	Čvrsta	50-100	2-4	Uzorak zahtijeva više od jednog udarca geološkim čekićem da bi se slomio	Vapnenac, mramor, filit, pješčenjak, škriljevac, šejl
R3	Srednje čvrsta	25-50	1-2	Uzorak nije moguće zarezati ili rascijepiti nožem, ali se može slomiti jednim udarcem geološkog čekića	Glinjak, ugljen, beton, škriljevac, šejl, siltit
R2	Meka	5-25	**	Uzorak se može zarezati nožem uz teškoće, a pojedini odlomci mogu se odcijepiti laganim udarcima geološkog čekića	Kreda, kamena sol, potaša
R1	Vrlo meka	1-5	**	Uzorak se raspada pod laganim udarcem geološkog čekića i može se rezati nožem	Jako raspadnute stijene ili izmijenjene stijene
R0	Ekstremno meka	0.25-1	**	Razdvaja se pod pritiskom nokta	Meka pukotinska ispuna

Tablica 7 Vrijednosti konstante m_i za intaktnu stijenu, prema podijeli stijena (Hoek, 2000)

Vrijednosti konstante m_i za intaktnu stijenu, prema podijeli stijena. Vrijednosti u zagradama su procijenjenje. Pridodane vrijednosti svakom tipu stjenke mase ovise o granulaciji i uklještenosti kristalne strukture pri čemu su više vrijednosti pridružene većoj uklještenosti i višim značajkama trenja. Ova tabela sadrži značajne promjene u odnosu na prethodno objavljene inačice. Promjene su uzrokovane iz podataka dobivenih laboratorijskim pokusima i s geologa i inženjerskih geologa.

Tip stijene	Klasa	Grupa	Tekstura			
			Krupna	Srednja	Fina	Vrlo fina
SEDIMENTNE	Klastične	Konglomerat a	Pješčenjak 17a4	Siltit (Prahovnjak) 7a2	Argilit (Glinjak) 4a2	
		Breča a		Grauvaka (18a3)	Šeji (6a2) Lapor (7a2)	
	Neklastične	Karbonatne	Kristalinični vapnenac (12a3)	Spartični vapnenac (10a2)	Mikritični vapnenac (9a2)	Dolomit (9a3)
		Kemijske (evaporitne)		Gips 8a2	Anhidrit 12a2	
Organske					Sadra 7a2	
METAMORFNE	Neuslojene		Mramor 9a3	Hornfels (Rožnac) (19a4) Metapješčenjak (19a3)	Kvarcit 20a3	
	Slabo uslojene		Migmatit (29a3)	Amfibolit 26a6	Gnajs 28a5	
	Uslojene b			Škrijavac 12a3	Filit (7a3)	Siejt 7a4
MAGMATSKE	Dubinske	Svjete (Kisele)	Granit 32a3 Granodiorit (29a3)	Diorit 25a5		
		Tamne (Luznate)	Gabro 27a3 Norit 20a5	Diorit (16a5)		
	Hipobazalne		Porfirit (20a5)		Diabaz (15a5)	Peridotit (25a5)
	Vulkanske	Lava		Riolit (25a5) Andezit 25a5	Dacit (25a3) Bazalt (25a5)	
Piroklastične		Aglomerat (19a3)	Breča (19a5)	Tuf (13a5)		

Vrijednosti konstanta m_b , s i a zavisne o geološkom indeksu čvrstoće dane su kao:






$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (3)$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (4)$$

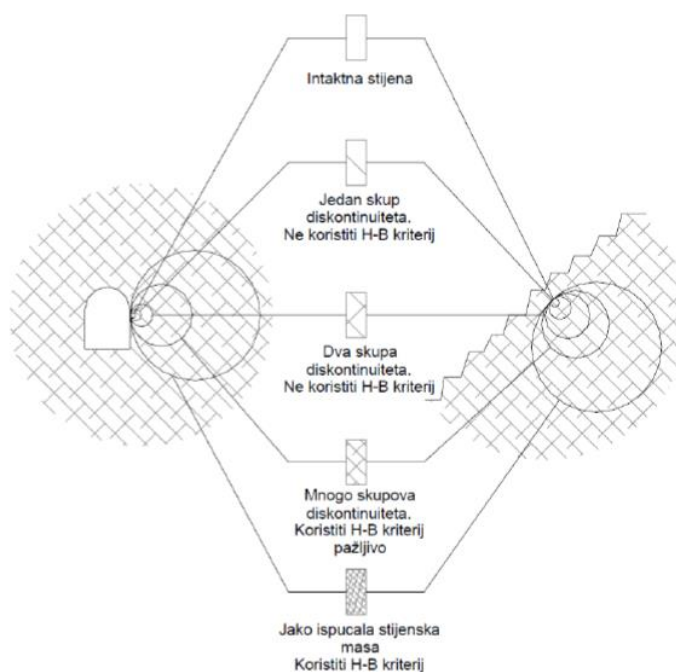
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (5)$$

Za intaktnu stijensku masu gdje je konstanta stijenskog materijala označena s m_i vrijedi $s=1$ i $a=0.5$. D predstavlja faktor koji ovisi o stupnju poremećenosti stijenske mase uslijed oštećenja nastalih miniranjem i relaksacijom. Vrijednost varira od 0 za neporemećenu stijensku masu do 1 za znatno poremećenu stijensku masu (Arbanas, 2013). Tablica 8 prikazuje različite primjere i primjerene faktore poremećenosti D gdje način iskopa i miniranja imaju veliku ulogu.

Tablica 8 Predložene vrijednosti faktora poremećenosti stijenske mase (D) (Hoek, 2000)

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

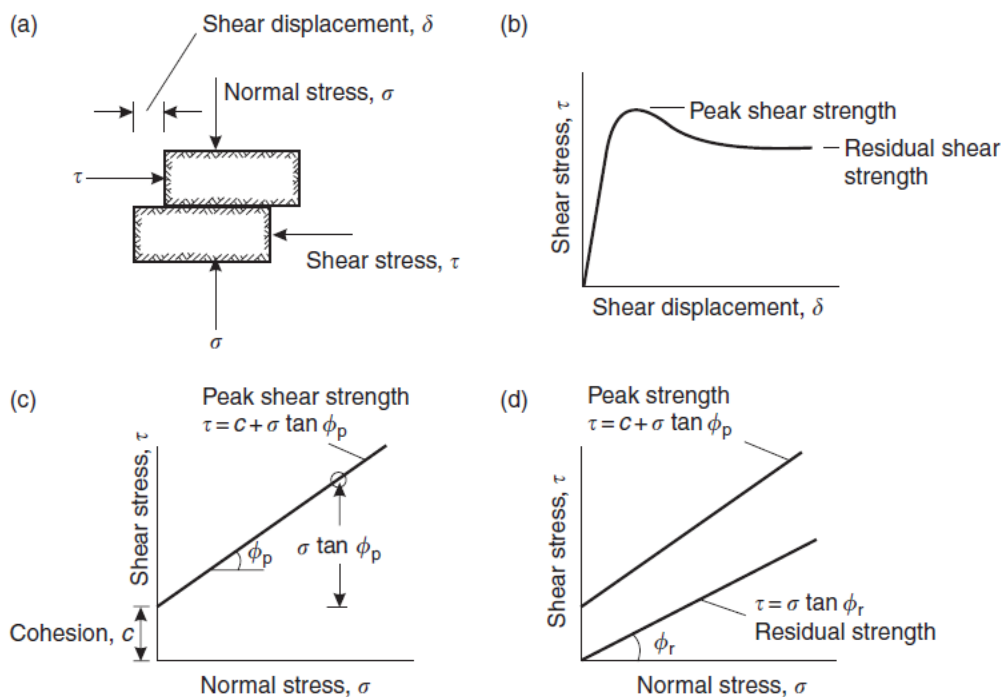
Hoek-Brownov kriterij čvrstoće je primjenjiv samo u slučajevima u kojima se može pretpostaviti izotropno i homogeno ponašanje stijenske mase. Ono vrijedi za intaktnu stijenu te znatno raspucale stijenske mase u kojima postoji dovoljan broj diskontinuiteta raspoređenih blizu jedan drugome (Slika 4). Kada je u usporedbi analizirana struktura velika u odnosu na veličinu bloka, kriterij je primjenjiv. Kada je veličina bloka jednaka veličini analizirane strukture ili kada je jedan set diskontinuiteta slabiji od ostalih kriterij se ne može primijeniti. U ovim slučajevima potrebno je analizirati kritičan mehanizam sloma (Hoek, 2000).



Slika 4 Uvjeti primjene Hoek-Brownovog kriterija (Hoek, 2000)

3.2. Kriterij čvrstoće diskontinuiteta

Analizira se smicanje uzorka kroz koje prolazi ravan diskontinuitet ispunjen cementnim materijalom. Uzorak se izlaže normalnom naprezanju σ , a mjeri se posmično naprezanju τ koje je potrebno kako bi se ostvario pomak δ (Slika 5a).



Slika 5 Izravno smicanje po diskontinuitetu (Wyllie and Mah, 2017)

Posmična čvrstoća potpuno ravnog diskontinuiteta linearna je funkcija normalnih naprezanja na plohi diskontinuiteta i odgovara Mohr Coulombovom kriteriju čvrstoće:

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi \quad (6)$$

gdje su

c kohezija (kohezivna čvrstoća cementirane plohe diskontinuiteta),

ϕ kut trenja.

U slučaju rezidualne čvrstoće (Slika 5d), vrijednost kohezije pada na nulu te vrijedi sljedeći odnos:

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi \quad (7)$$

Stvarna kohezija postoji jedino kod diskontinuiteta s ispunom koja posjeduje koheziju ili kod međuslojnih diskontinuiteta s cementnim vezivom. Međutim, kod praktične primjene, termin kohezije odnosi se na hrapavost površine.

Svi prirodni diskontinuiteti iskazuju određeni stupanj hrapavosti. Takve površinske nepravilnosti nazivaju se neravnine te mogu imati značajan utjecaj na stabilnost padine. Smicanje diskontinuiteta stijenskih padina ovisi o kombiniranim utjecajima hrapavosti, čvrstoći stijenske mase na površini, normalnom naprezanju i pomaku pri smicanju. Povećanjem naprezanja i pomaka, neravnine će biti smaknute stoga će se kut trenja postupno smanjiti na minimalnu vrijednost bazičnog odnosno rezidualnog kuta trenja (Wyllie and Mah, 2017).

Patton (1966) je ispitivao utjecaj površinske hrapavosti diskontinuiteta na povećanje posmične čvrstoće pokusom na uzorcima kojima su površine nazubljene u obliku pile i definirao osnovni zakon čvrstoće diskontinuiteta u koji je uključena neravnost diskontinuiteta (Arbanas, 2013). Iako je Pattonov pristup vrlo jednostavan, ne predstavlja stvarno ponašanje pri visokim normalnim naprezanjima. Zato je Barton 1973. godine predložio novu inačicu Pattonovog kriterija sloma koji glasi:

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (8)$$

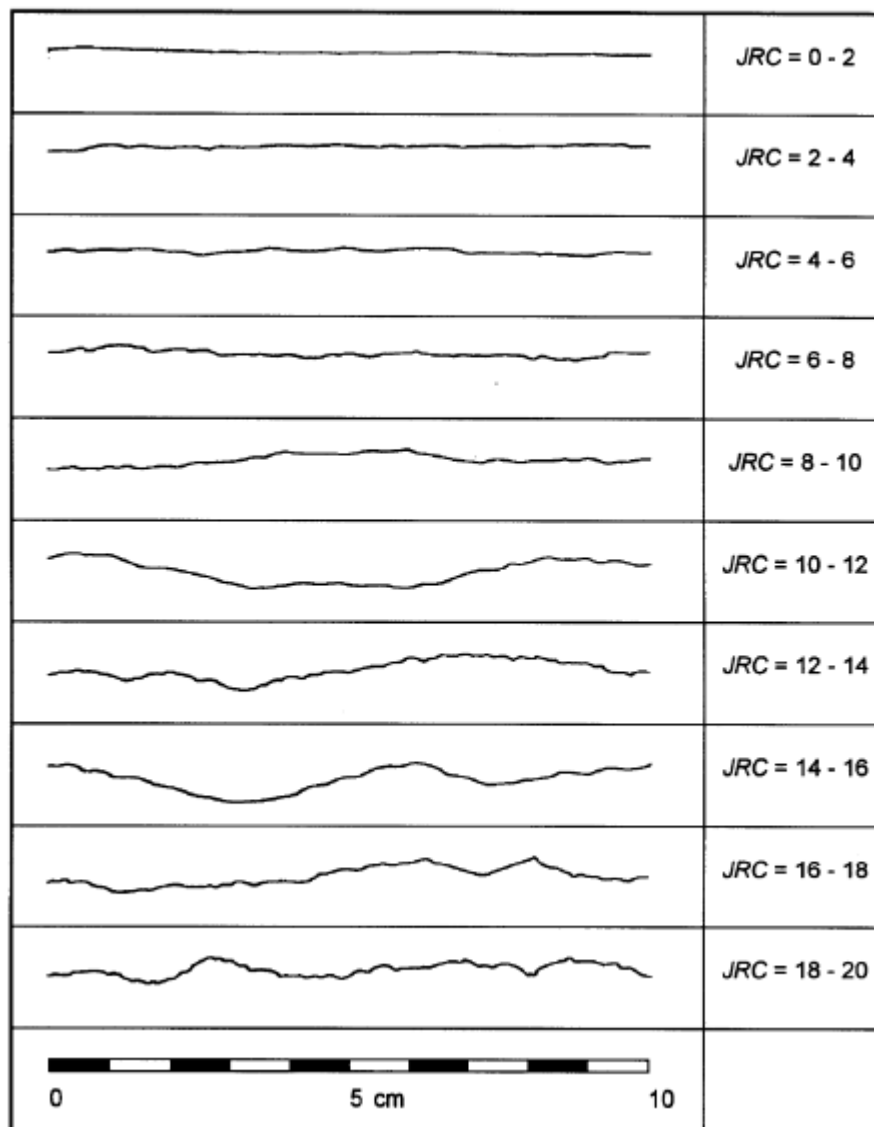
gdje su

JRC koeficijent hrapavosti diskontinuiteta (*Joint Roughness Coefficient*)

JCS tlačna čvrstoća zidova diskontinuiteta (*Joint Wall Compressive Strength*)

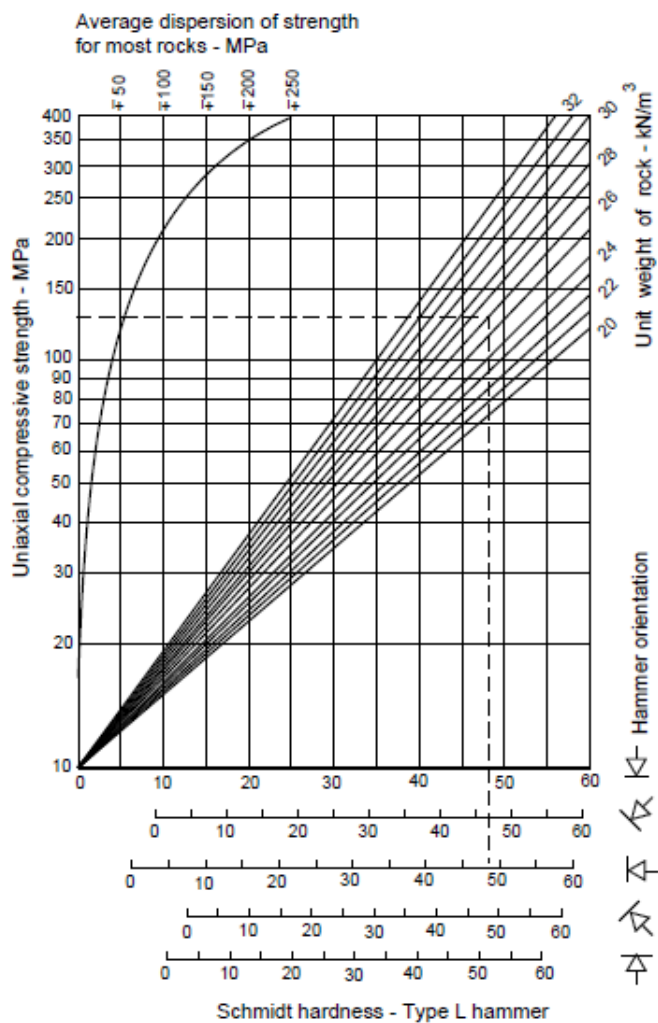
ϕ_b bazični kut unutarnjeg trenja stijenske mase

Koeficijent hrapavosti je broj koji se dobiva usporedbom stanja površine diskontinuiteta sa standardiziranim profilima (Barton and Choubey, 1977). Jedan od najkorisnijih setova profila, prikazan na Slici 6 objavili su Barton i Choubey, (1997).



Slika 6 Profili hrapavosti s pripadajućim vrijednostima JRC (Barton and Choubey, 1977)

Čvrstoća stijenki diskontinuiteta može se odrediti na terenu, no relevantniji podaci mogu se dobiti ispitivanjem Schmidtovim čekićem. Schmidtov čekić koristi se za jednostavno, brzo i jeftino određivanje jednoosne tlačne čvrstoće stijenki diskontinuiteta ili stijene (Slika 7) (Dugonjić Jovančević, 2016).



Slika 7 Procjena čvrstoće stijenki diskontinuiteta Schmidtovim čekićem (Marinos, Marinos and Hoek, 2005)

3.3. Deformabilnost stijenske mase

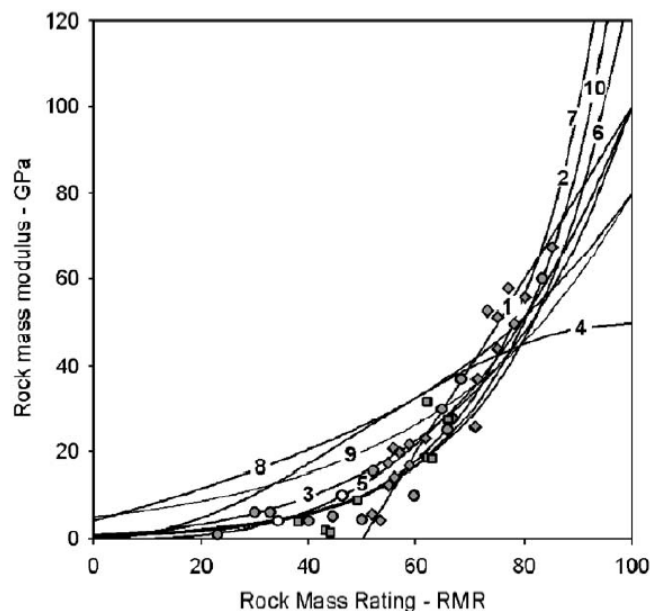
Modul deformabilnosti važan je ulazni parametar za bilo koju analizu ponašanja stijenske mase koja uključuje deformacije. Najčešće in situ metode za određivanje modula su: pokus opterećenja pločom (Slika 8), pokus radijalnog opterećenja, ispitivanje velikim tlačnim jastucima, fleksibilni ili kruti dilatometar. Takvi testovi podrazumijevaju primjenu opterećenja na površinu stijene pomoću krute kružne ploče koju se tlači hidrauličkom prešom ili pomoću hidrauličkog tlačnog jastuka (Vrkljan, 2003). Međutim, terenska ispitivanja pokazala su se kao skup i dugotrajan proces određivanja modula deformabilnosti.



Slika 8 Ispitivanje deformabilnosti metodom "Plate jacking test" PJT (Rezaei, Ghafoori and Ajalloeian, 2016)

Stoga je nekoliko autora predložilo empirijske korelacije za određivanje modula deformabilnosti na osnovi klasifikacija kao što je RMR, Q klasifikacija i GSI (Hoek and Diederichs, 2006). Sve korelacije pretpostavljaju izotropno ponašanje stijenske mase.

Slika 9 i Tablica 9 prikazuju najpoznatije empirijske jednadžbe za procjenu modula deformabilnosti u usporedbi s in situ mjerenjima.



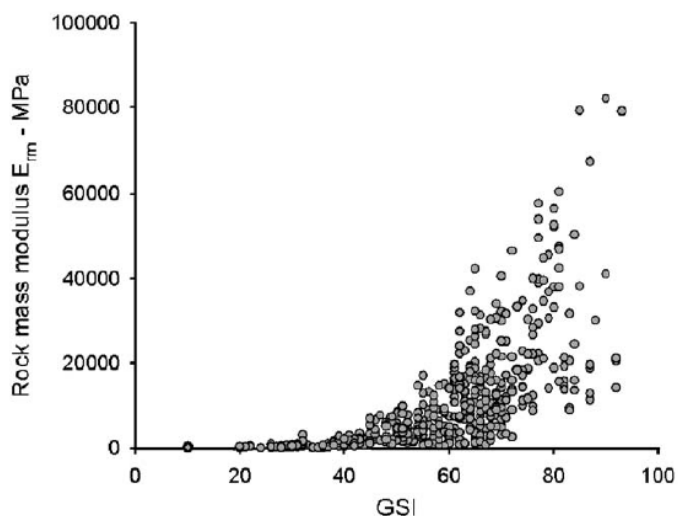
Slika 9 Empirijske jednadžbe za procjenu modula deformabilnosti stijenske mase u usporedbi s in situ mjerenjima (Hoek and Diederichs, 2006)

Tablica 9 Jednadžbe za procjenu modula deformabilnosti (Hoek and Diederichs, 2006)

●	Field data	Serafim and Pereira
◆	Field data	Bieniawski
■	Field data	Stephens and Banks
1	$E_{rm} = 2RMR - 100$	Bieniawski
2	$E_{rm} = 10^{((RMR-10)/40)}$	Serafim and Pereira
3	$E_{rm} = E_i/100(0.0028RMR^2 + 0.9 \exp(RMR/22.82)), E_i = 50 \text{ GPa}$	Nicholson and Bieniawski
4	$E_{rm} = E_i(0.5(1 - \cos(\pi RMR/100))), E_i = 50 \text{ GPa}$	Mitri et al
5	$E_{rm} = 0.1(RMR/10)^3$	Read et al.
6	$E_{rm} = 10Q_c^{1/3}$ where $Q_c = Q\sigma_{ci}/100, \sigma_{ci} = 100 \text{ MPa}$	Barton
7	$E_{rm} = (1 - D/2)\sqrt{\sigma_{ci}/100} \times 10^{((RMR-10)/40)}, D = 0, \sigma_{ci} = 100 \text{ MPa}$	Hoek et al.
8	$E_{rm} = E_i(s^a)^{0.4}, E_i = 50 \text{ GPa}, s = \exp((GSI - 100)/9), a = 1/2 + 1/6(\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3)), GSI = RMR$	Sonmez et al.
9	$E_{rm} = E_i s^{1/4}, E_i = 50 \text{ GPa}, s = \exp((GSI - 100)/9)$	Carvalho
10	$E_{rm} = 7(\pm 3)\sqrt{Q'}, Q' = 10((RMR - 44)/21)$	Diederichs and Kaiser

J.C. Chern iz Tajvana znatno je doprinio razvoju metoda za određivanje modula deformabilnosti tako što je autorima pružio bazu podataka in situ mjerenja. Baza sadrži veliki broj podataka dobivenih različitim tipovima ispitivanja za različite tipove stijena na raznim lokacijama. Na podacima iz Kine i Tajvana, koji su grafički prikazani na Slici 10, provedena je analiza (Hoek and Diederichs, 2006). Izvedena je sljedeća jednačba:

$$E_{rm}(MPa) = 100000 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right) \quad (9)$$



Slika 10 Grafički prikaz odnosa modula deformabilnosti i GSI vrijednosti (Hoek and Diederichs, 2006)

4. PROJEKTIRANJE U STIJENSKOJ MASI

Osnovna aktivnost inženjerstva u stijenskoj masi je projektiranje i izvedba konstrukcija u stijenskoj masi kroz tri osnovna aspekta (Arbanas, 2013):

1. Procjena stabilnosti iskopa ili temeljenja;
2. Projektno rješenje mjera, kao što su geometrija i/ili podgradni sustav, potrebnih da zadovolji traženu stabilnost i
3. Projektno rješenje mjera potrebnih da održi deformacije stijenske mase u traženim granicama.

Inženjersko projektiranje u mehanici stijena, u pravilu uključuje razvoj rješenja do usvojenog savladavanja problema (Stacey, 2004). Ni jedan projekt, tj. gradilište, nisu identični te zahtijevaju prilagođena rješenja projekta i iskopa u stijenskoj masi.

4.1. Projektiranje stijenskih pokosa

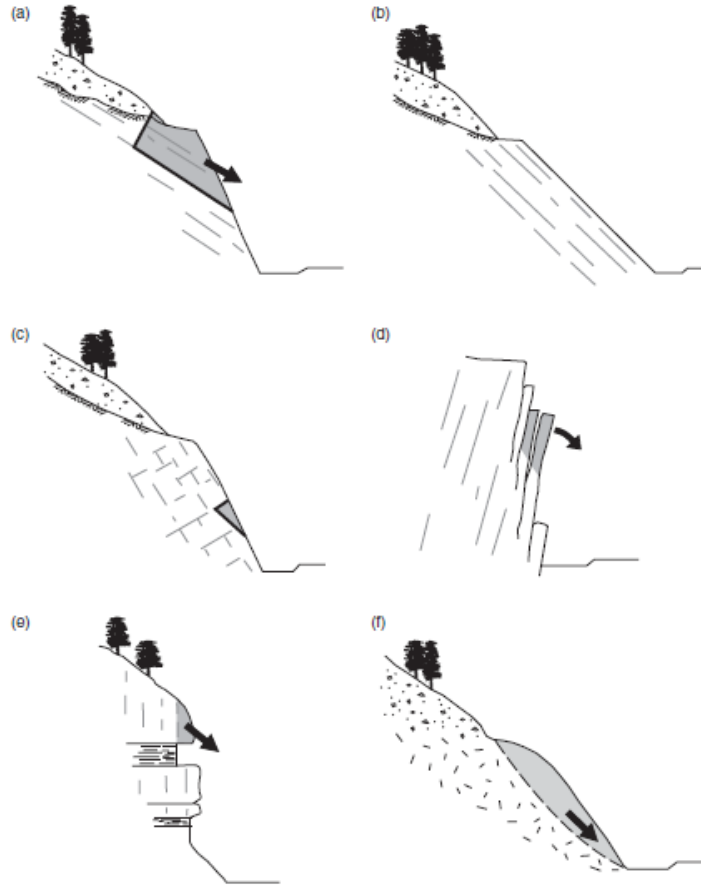
Mnogo inženjerskih aktivnosti kao što su autoceste, željeznice, brane, urbani razvoj uključuju iskop u stijenskoj masi. Veliki udio svjetske proizvodnje minerala provodi se u otvorenim jamama (Slika 11). Svaki projekt ima različite zahtjeve stabilnosti koji ovise o svrsi izgradnje i posljedicama sloma. Primjerice, prometnice u zasjecima u stijenskoj masi, vrlo je važno zaštititi od kamenih odrona kako ne bi ugrozile sigurnost kretanja. S druge strane iskop rudnika projektira se s nižim faktorima sigurnosti koji zadovoljavaju stabilnost do završetka operacije (Wyllie and Mah, 2017).



Slika 11 Stabilni zidovi pri iskopu stijenske mase u kamenolomu (Foto L. Gašparić)

U većini slučajeva orijentaciju pokosa nije moguće prilagoditi geološkim uvjetima pa je projekt pokosa potrebno prilagoditi uvjetima na koje se naiđe. Uobičajen zahtjev pri projektiranju stijenskih pokosa, utvrditi je stabilan maksimalni nagib zasjeka i njegovu maksimalnu visinu. Pri projektiranju potrebno je pronaći optimalno rješenje koje ujedno zadovoljava sigurnost i ekonomičnost (Wyllie and Mah, 2017).

Na malim dubinama, gdje su primarna naprezanja niska, lom stijenske mase rijetko je moguć, a ponašanje stijenske mase je uvjetovano klizanjem po diskontinuitetima. Struktura geologija, orijentacija i karakteristike (duljina, hrapavost i materijal ispune) pukotina, slojevitost i rasjedi, značajna je pri projektiranju prometnica. Slika 12 prikazuje niz različitih geoloških uvjeta i njihov utjecaj na stabilnost padine.

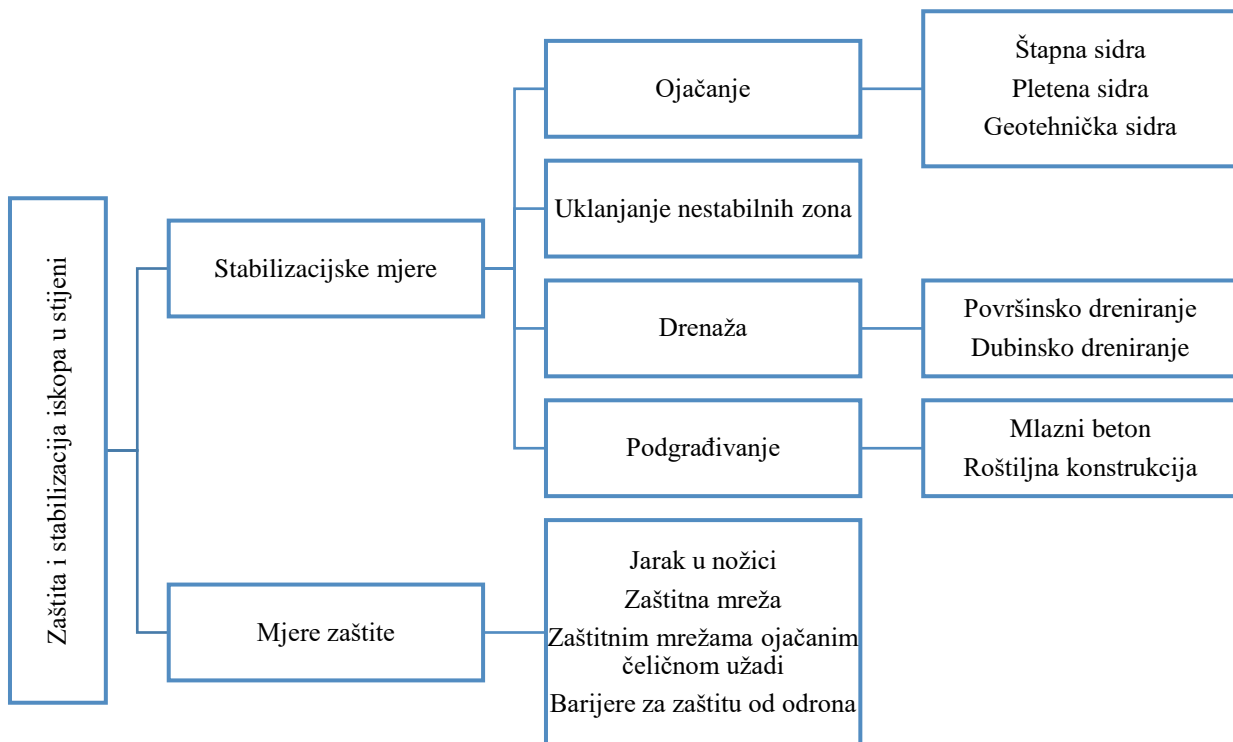


Slika 12 Utjecaj geoloških uvjeta na stabilnost stijenskih iskopa: a) potencijalno nestabilan-diskontinuiteti na licu kosine b) stabilnog pokosa- lice iskopa paralelno s diskontinuitetima c) stabilan pokos- diskontinuiteti usmjereni prema licu pokosa d) prevrtanje e) trošenje škriljevca kojim se stvaraju privjesi f) plitki slom u trošnoj stijenskoj masi (Wyllie and Mah, 2017)

4.2. Stabilizacija stijenskih pokosa

Izbor metoda za stabilizaciju pokosa ovisi o različitim uvjetima na terenu, kao što su topografija, geološki uvjeti i uvjeti izvođenja. Metode (Slika 13) se mogu podijeliti u tri kategorije (Wyllie and Mah, 2017):

- Podgrada
- Uklanjanje stijenske mase
- Zaštita



Slika 13 Kategorije najčešćih mjera za stabilizaciju pokosa

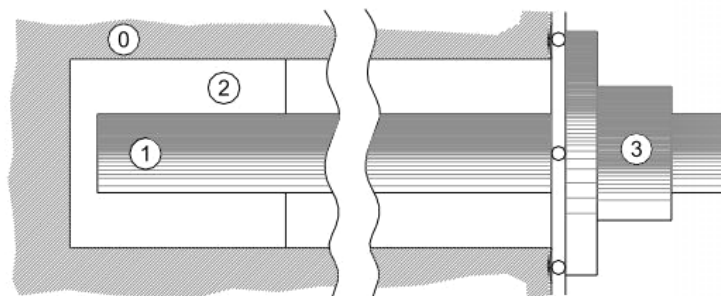
Podgrađivanje i ojačanje stijenske mase razlikuju se u primjeni metode kojom se stabilizira zasjek. Podgrađivanje podrazumijeva ugradnju čeličnih, betonskih, armiranobetonskih podgradnih konstrukcija, mlaznog betona, kako bi se aktivirala sila ili opterećenje na pokosu zasjeka i ograničili pomaci konture iskopa. Ojačanje stijenske mase podrazumijeva poboljšanje većine značajki stijenske mase unutar stijenske mase i uključuje tehnike i ugradnju različitih tipova sidara (Arbanas, 2008).

4.2.1. Stijenska sidra

Korištenje stijenskih sidara zabilježeno je krajem 19. stoljeća (US Bureau of Mines, 1987). Početkom 20. stoljeća, primjena sidara uvedena je u rudnicima ugljena kao stabilizacijska mjera. Sidra su danas jedan od najčešće korištenih mjera sustava ojačanja stijenske mase podzemnih građevina (Li, 2017).

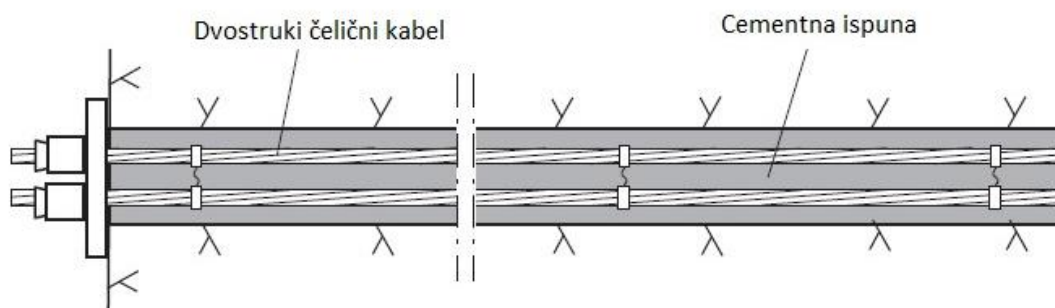
Štapna sidra predstavljaju sustav koji se sastoji od četiri osnovna elementa (Slika 14):

0. Stijenska masa
1. Element sustava ojačanja
2. Unutarnja veza elementa ojačanja i stijenske mase – injekcijska smjesa
3. Vanjska veza elementa ojačanja i stijenske mase



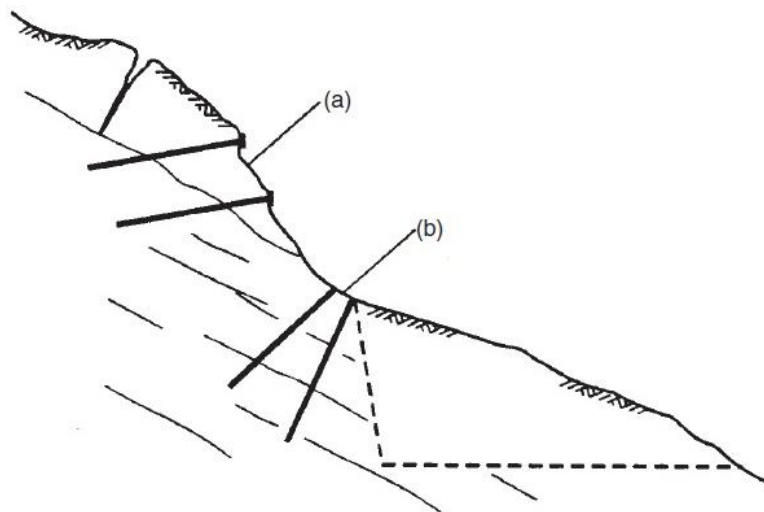
Slika 14 Elementi sustava ojačanje (Arbanas, 2008)

Postoji mnogo podjela sidara, a među značajnima je podjela s obzirom na aktiviranje vlačne sile sidra koja ih dijeli na aktivna (prednapregnuta) i pasivna (bez prednaprežanja). Isto tako, sidra se mogu podijeliti po trajnosti. Trajnim sidrima smatraju se injektirana sidra koja su zaštićena od vanjskih utjecaja dok nezaštićena služe samo privremeno. Za razliku od štapnih sidara, koja su formirana od čeličnog profila razlikujemo geotehnička (kabelska) sidra (Slika 15), formirana od čeličnih žica koja se ugrađuju s ili bez prednaprežanja.



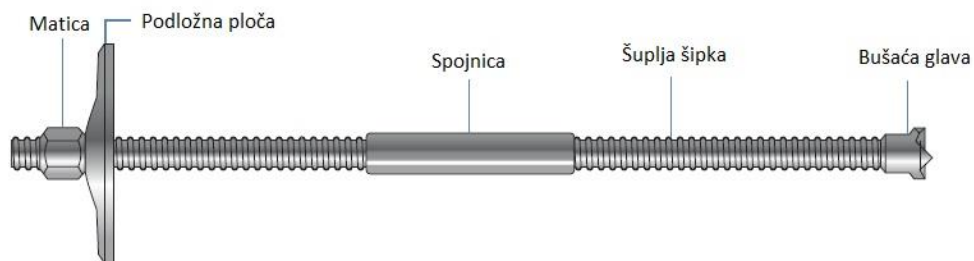
Slika 15 Geotehnička (kabelska) sidra (Li, 2017)

Prethodno ojačanje može se provesti ugradnjom pasivnog, cijelom dužinom injektiranog sidra, na vrhu planiranog iskopa. Injektirana sidra sprječavaju gubitak povezanosti iz razloga što su ugrađena sidra dovoljno kruta da spriječe pomake. Međutim, gdje je došlo do pomaka blokova potrebno je ugraditi prednapregnuta sidra kako bi se spriječili daljnji pomaci. Za razliku od prednapregnutih sidara, sidra bez prednapreznjanja su jeftinija i jedostavnija za ugradnju (Wyllie and Mah, 2017). Navedeni i opisani slučajevi prikazani su na Slici 16.



Slika 16 Različiti slučajevi ugradnje sidara: (a) prednapregnuto sidro; (b) pasivno injektirano sidro (Wyllie and Mah, 2017)

Samobušiva sidra (Slika 17) vrlo su praktična aplikacija štapnih sidra, gdje se umjesto bušeće šipke za bušenje koristi odgovarajuća bušača glava na vrhu sidra kroz koju se kasnije provodi injektiranje bušotine. Posebna prednost ovih sidara je uporaba u jako oštećenim stijenskim masama kako ne bi došlo do urušavanja bušotine prije same ugradnje sidra. Na vrh sidra postavlja se podložna ploča i matica, a po potrebi se elementi nastavljaju spojnicama.



Slika 17 Samobušivo sidro (Li, 2017)

5. OPĆENITO O GRAĐEVNIM JAMAMA

Građevnom jamom (Slika 18) nazivamo prostor, pristupačan i siguran za rad koji je potreban za izvedbu temelja i/ili dijela podzemne građevine (Nonveiller, 1979). Zbog neprestanog porasta stanovništva i urbanizacije dolazi do povećane potražnje prostora u gradovima. Jedno od rješenja nedostatka potrebnog prostora je podzemna gradnja. Izvedba građevne jame predstavlja veliki građevinski rizik zbog potencijalnog ugrožavanja stabilnosti okolnih objekata i komunalne infrastrukture. Iskop jame sam po sebi nije stabilan, već je potrebno osigurati vertikalne zidove od pomaka koje uzrokuju pritisci tla, okolni objekata i voda. Podzemna voda može imati vrlo negativan utjecaj na stabilnost stoga je potrebno osigurati vodonepropusnost zidova i eventualno crpljenje vode iz jame. Metode izrade građevne jame ovise o (Nonveiller, 1979):

- Osobinama materijala u kojem se gradi,
- Položaju temeljne plohe prema najvišoj razini podzemne vode,
- Dubini temelja ispod površine terena.



Slika 18 Izvođenje građevne jame Zagrad B (Monterra, 2020)

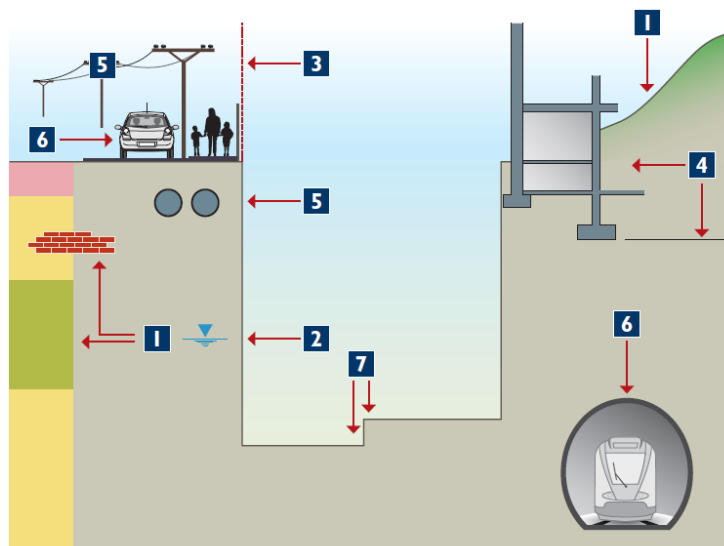
Sljedeća tablica prikazuje uvjete rada i metode izvođenja građevnih jama po (Nonveiller, 1979):

Tablica 10 Metode izvođenja građevnih jama (Nonveiller, 1979)

Položaj vode	Materijal	Uvjeti za rad		Crpljenje vode
		neograničeni	ograničeni	
Nivo vode ispod plohe temelja	koherentan	iskop bez ograničenja	vertikalne stijenke iskopa	prema potrebi crpljenje kišnice iz jame
	svi	iskop s privremenim kosinama ($F_s= 1.2$)	razupore, oplata	prema potrebi crpljenje kišnice iz jame
Plitko ispod površine tla	koherentno ili šljunak	iskop s privremenim kosinama uz moguće strujanje niz kosinu	razupore, oplata	crpljenje kišnice i procjedne vode iz jame
	pijesak	iskop s privremenim kosinama ($F_s= 1.2$)	razupore, oplata	crpljenje iz bunara u ili oko jame
			žmurje uz sprječavanje hidrauličkog sloma tla	crpljenje iz jame
			isto, kopanje i rad pod vodom dubina žmurja za tlak	-
smrzavanje	-			
Iznad površine tla	tlo bez samaca	zagati, otoci, bunari, kesoni	plivajući sanduci, bunari, kesoni, zagati s ispunom	iz jame između zagata
	tlo sa samcima i stijena	zagati, plivajući sanduci	čelijski zagati	iz jame između zagata

Tijekom izvođenja i projektiranja građevne jame, potrebno je uzeti u obzir složene rubne uvjete i uvjete izvođenja. Slika 19 prikazuje rubne uvjete koje je potrebno uzeti u obzir (Keller Group, 2015) :

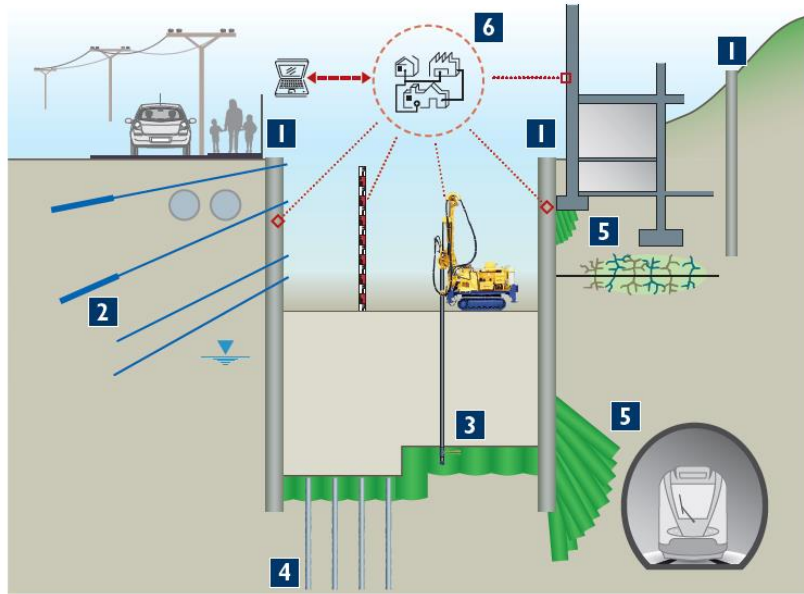
1. Složeni uvjeti tla,
2. Razina podzemne vode,
3. Granica čestice,
4. Postojeće zgrade,
5. Podzemne i nadzemne djelatnosti,
6. Prometna infrastruktura,
7. Različite dubine iskopa.



Slika 19 Rubni uvjeti i uvjeti izvođenja (Keller Group, 2015)

Neka od mnogobrojnih rješenja i tehnika kod složenih iskopa prikazane su (Slika 20) i navedene u nastavku (Keller Group, 2015).

1. Potporne konstrukcije,
2. Dodatno horizontalno ojačanje,
3. Brtvljenje dna jame,
4. Zaštita od uzgona,
5. Zaštita postojećih objekata,
6. Monitoring.



Slika 20 Rješenja i tehnike građevnih jama (Keller Group, 2015)

Osiguranje iskopa i građevnih jama u stijenskoj masi izvodi se u fazama s paralelnim ojačanjem stijenske mase štapnim i geotehničkim sidrima uz odgovarajući podgradni sustav: roštiljna konstrukcija ili armirani mlazni beton. Osiguranje građevne jame u tlu izvodi se ugradnjom armiranobetonske dijafragme, pobijenim žmurjem ili pilotskom stijenom u kombinaciji s geotehničkim sidrima (Geotech d.o.o., 2020).

6. OPSERVACIJSKA METODA

Opservacijska metoda je kontinuirani, upravljani, integrirani, proces dizajna, nadzor gradnje, nadzor i pregled koji omogućuje primjenu prethodno definiranih modifikacija tijekom ili nakon izgradnje. Glavni cilj je postići ekonomičnost bez ugrožavanja sigurnosti (Construction Industry Research and Information Association, 1999).

6.1. Razvoj metode opažanja

Danas se u geotehničkoj praksi susreću dva pristupa projektiranju. Prvi i prevladavajući je klasični pristup koji podrazumijeva završetak projekta prije početka gradnje. Obzirom na nesigurnosti uvjeta u tlu/stijenskoj masi, ovaj pristup bazira se na konzervativnoj (pesimistična/nepovoljna) interpretaciji dostupnih podataka tla/stijenske mase. U ovom pristupu monitoring i nadzor ne igraju značajnu ulogu, već služe kao provjera da se konstrukcija ponaša unutar prihvatljivih granica. Ukoliko je ponašanje nepovoljnije od predviđenog nastupa situacija koja nije predviđena projektom. Drugi pristup, opservacijska metoda, razvijena je iz potrebe da se izbjegnu konzervativne pretpostavke o uvjetima u tlu/stijenskoj masi (Szavits Nossan, 2006).

Metodu koju su u prošlosti intuitivno koristili mnogi, ali prvi je prepoznaje i opisuje Terzaghi (Terzaghi and Peck, 1967) te naziva postupkom opažanja. Peck uvodi izraz "Opservacijska metoda" i definira dva pristupa u svojim Rankin predavanjima (Peck, 1969):

- "Ab Initio" pristup- od početka projekta
- "Best Way Out" pristup- neočekivani problemi u gradnji

Smatrao je da se cjelovita primjena Opservacijska metode sastoji od sljedećih postavki (Peck, 1969):

1. Istražni radovi dovoljni barem za utvrđivanje opće prirode i svojstava tla, ali ne nužno detaljni,
2. Procjena najvjerojatnijih uvjeta u tlu kao i mogućih najnepovoljnijih odstupanja od tih uvjeta,
3. Izrada projekta temeljena na radnoj hipotezi o najvjerojatnijim uvjetima u tlu,

4. Izbor veličina koje će se opažati tijekom izvođenja te njihov proračun na temelju radne hipoteze,
5. Proračun tih veličina za najnepovoljnije uvjete u tlu,
6. Prethodni izbor akcija ili promjena u projektu za svako predvidivo znatnije odstupanje opaženih od predviđenih veličina utvrđenih temeljem radne hipoteze,
7. Mjerenje veličina kojima će se opažati i vrednovati stvarno stanje i
8. Mijenjanje projekta radi prilagodbe stvarnom stanju.

S obzirom da se početni projekt temelji na najpovoljnijim uvjetima čija je vjerojatnost 0.5, vjerojatnost da se susretnu nepovoljni uvjeti isto tako iznosi 0.5. U ovom slučaju potrebne su korektivne mjere koje zahtijevaju vrijeme i novac što nije u interesu sudionika (Szavits Nossan, 2006).

Powderham predlaže opservacijsku metodu koja podrazumijeva konzervativniji početni projekt koji se postupno modificira (engl. *progressive modification*) u manjim i kontroliranim koracima obzirom na veću dostupnost podataka zahvaljujući opservaciji. Uvodi termin vjerojatniji (engl. *more probable*) uvjeti iz što čini njegov pristup umjereno konzervativnim tj. smješta ga između konzervativnog i Peckovog pristupa.

6.2. Opservacijska metoda prema Eurocode 7 (EC7)

Eurokod 7 omogućuje primjenu Metode opažanja kao pristup projektiranju kroz slijedeće odredbe u članku 2.7 (BS EN 1997-1:2004 British Standard, 2004):

- 1) Kada je predviđanje geotehničkog ponašanja konstrukcije otežano, moguće je primijeniti pristup poznat kao „Metoda opažanja“ u kojem se projekt može mijenjati tijekom izvođenja.
- 2) Slijedeći uvjeti moraju biti zadovoljeni prije početka gradnje:
 - moraju se utvrditi prihvatljive granice ponašanja;
 - treba procijeniti raspon mogućeg ponašanja te treba pokazati da postoji prihvatljiva vjerojatnost da će stvarno ponašanje biti unutar prihvatljivih granica;

-mora se izraditi plan opažanja koji će pokazati da li se stvarno ponašanje kreće u okvirima prihvatljivih granica; opažanje mora omogućiti da se to utvrdi u dovoljno ranoj fazi i u dovoljno kratkim intervalima kako bi se omogućila pravodobna primjena korektivnih mjera;

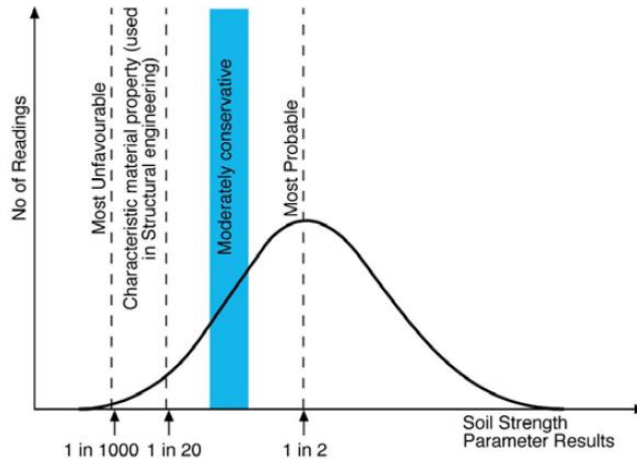
-vrijeme odgovora instrumenata i postupaka analize rezultata mora biti dovoljno kratko u odnosu na moguću evoluciju sustava;

-mora se uspostaviti plan korektivnih mjera koje će se primijeniti ako opažanja upućuju na ponašanje izvan prihvatljivih granica.

- 3) Tijekom gradnje, monitoring će biti proveden po planu.
- 4) Rezultate opažanja treba ocjenjivati u prikladnim fazama, a planirane korektivne mjere treba provesti ako su granice ponašanja prekoračene.
- 5) Instrumenti za opažanja treba zamijeniti ili proširiti ako prestanu davati pouzdane podatke ili ih daju u premalom opsegu.

Opservacijska metoda nije prigodna ukoliko postoji mogućnost krkog sloma u strukturi ili brzog pogoršanja u materijalu jer se korektivne mjere ne stignu primijeniti (Patel *et al.*, 2007).

CIRIA 185 (Construction Industry Research and Information Association, 1999) uvodi izraze najvjerojatniji (engl. *most probable*) i najnepovoljniji (engl. *most unfavourable*) za opis raspona uvjeta u tlu (Slika 21). Najnepovoljnije vrijednosti parametra koje se mogu očekivati predstavljaju 0.1% fraktilnosti podataka (Patel *et al.*, 2007).



Slika 21 Raspon uvjeta u tlu (Patel *et al.*, 2007)

Prilikom projektiranja prema EC7 potrebno je osigurati da sljedeća granična stanja nisu prekoračena (BS EN 1997-1:2004 British Standard, 2004):

- Gubitak ravnoteže,
- Unutarnji slom ili prekomjerne deformacije strukture ili strukturnih elemenata,
- Slom ili prekomjerne deformacije u tlu,
- Gubitak ravnoteže uslijed uzgona,
- Hidraulički slom ili unutarnja erozija.

Sljedeće granično stanje koje nije toliko ozbiljno, ali i dalje zahtjeva provjeru je granično stanje uporabivosti. Provjera graničnih stanja za klasični pristup projektiranju, provodi se proračunom koji koristi karakteristične vrijednosti. U metodi opažanja prihvatljiva granice ponašanja je granično stanje uporabivosti koje je proračunato s najvjerojatnijim i karakterističnim parametrima i uvjetima u tlu (Patel *et al.*, 2007).

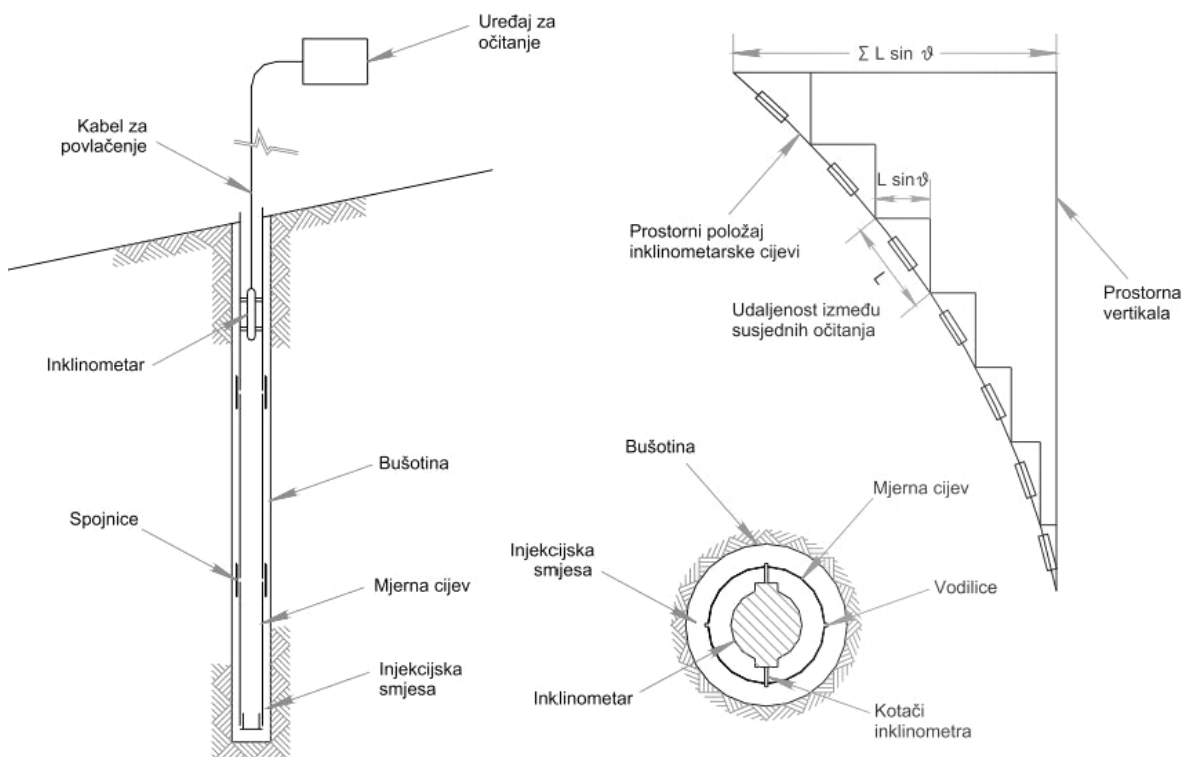
6.3. Monitoring

Geotehničke konstrukcije izgrađene su od prirodnih materijala koji su nehomogeni, anizotropni i prirodno napregnuti. Bez obzira na opseg istražnih radova nije moguće u potpunosti utvrditi značajke i svojstva materijala. Zbog toga je program monitoringa pri praćenju ponašanja padine, zasjeka tijekom izvedbe ili naknadnog praćenja od velikog značaja.

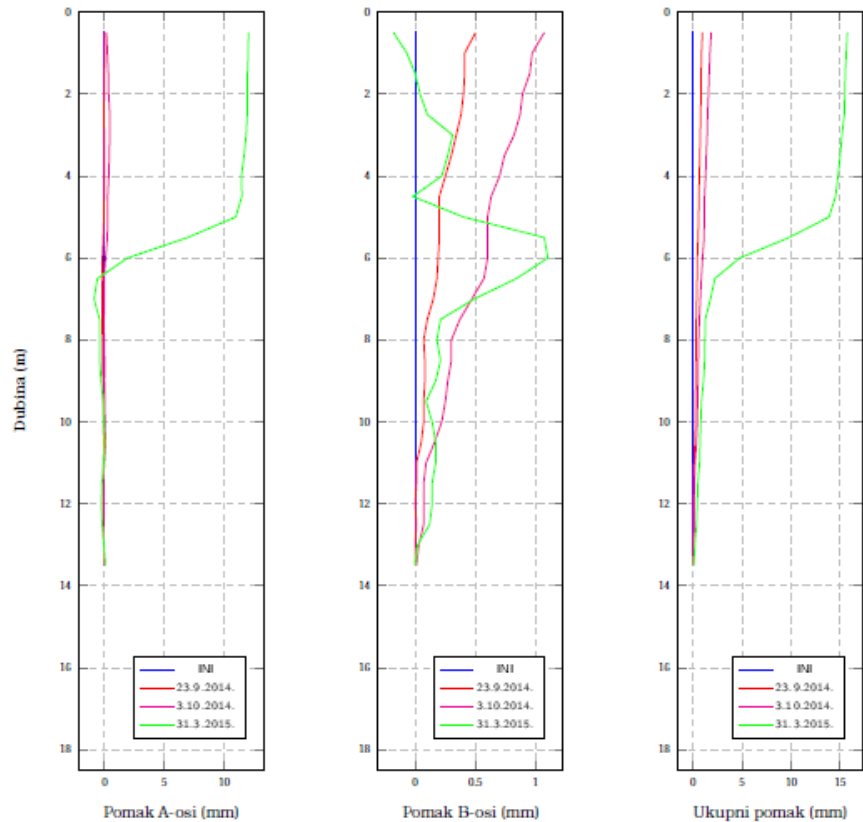
U stijenskim padinama odvijaju se određeni pomaci, takvi pomaci ukazuju da je stijena kvazi-stabilna. Međutim, u drugim slučajevima manji pomaci mogu ukazati da slijede veći pomaci, koji mogu dovesti do sloma. Zbog nepredvidljivosti ponašanja stijenske padine, monitoring može biti od velike važnosti jer ukazuje na moguće predznake potencijalnih geoloških hazarda. Pomaci padine najčešći su u otvorenim jamama rudnika gdje rudnici funkcioniraju na siguran način zbog sustava nadzora koji bi upozorio da je došlo do pogoršanja uvjeta stabilnosti. Padine koje su izložene dugotrajnim pomacima nazivaju se klizišta. Proces puzanja može se odvijati stotinama godina prije odvijanja rezultirajućih pomaka od nekoliko metara (Wyllie and Mah, 2017).

U geotehnici, moguće je mjeriti sljedeće veličine: pomake, silu, naprezanja i deformacije. Mjerenje sile, provodi se u sidrima pomoću mjerne ćelije (engl. *Load cell*). Geodetsko praćenje ponašanja sastoji se od mreže repera na određenoj nadmorskoj visini, mjernih prizmi na padini i totalnih stanica koja prati pomake repera i šalje podatke na računalo. Ovaj način monitoringa predstavlja optimalni odnos cijene i efekta te je najčešći u primjeni.

Za mjerenje pomaka unutar stijenske mase koriste se inklinometri i ekstenzometri ugrađeni u bušotine. Inklinometrom (Slika 22) mjerimo inklinaciju/kut nagiba u odnosu na vertikalu. Sustav se sastoji od inklinometarske sonde za očitavanje i inklinometarske cijevi koja omogućuje mjerenje. Mjerenje pomaka provodi se u dvije ravnine kako bi se otklonile eventualne greške u uređaju. Nakon postavljanja u bušotinu, prostor između cijevi i bušotine mora se zapuniti injekcijskom smjesom. Na Slici 23 grafički su prikazani pomaci dobiveni mjerenjem pomoću inklinometarske sonde.



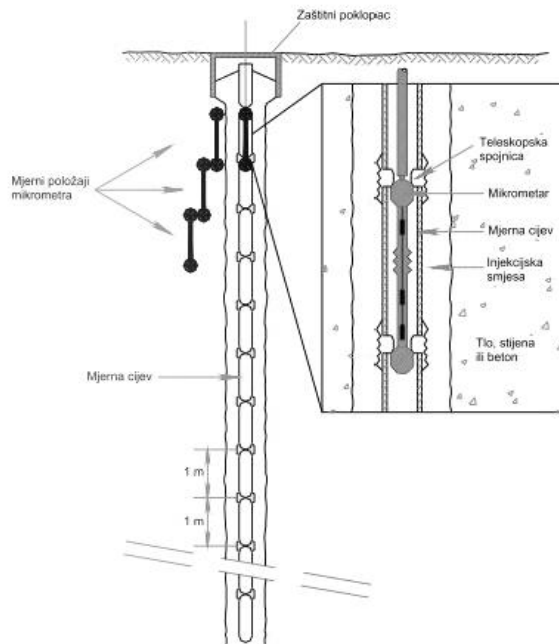
Slika 22 Princip mjerenja inklinometrom (Arbanas, 2008)



Slika 23 Akumulirani horizontalni pomaci izmjereni inklinometarskom sondom (preuzeto iz programskog zadatka L. Gašparić)

Vertikalni ekstenzometri uvijek mjere promjenu razmaka dviju točaka u pravcu bušotine. Samo ime upućuje da su namijenjeni prvenstveno za mjerenje povećanja razmaka dviju točaka (engl. *extension*). Prema konstrukciji i principu mjerenja, razlikuju se štapni ekstenzometri, žičani ekstenzometri i ekstenzometri kod kojih se koristi prenosiva mjerna sonda za mjerenje razmaka fiksnih točaka (klizni deformetri).

Klizni deformetar (Slika 24) radi na principu mjerenja promjene razmaka fiksnih točaka u cijevi koja je ugrađena u stijensku masu/tlo. Zbog osjetljivosti uređaja komercijalno se naziva *sliding micrometer* (osjetljivost uređaja izražena preko deformacije $1 * 10^{-6}$). Monitoring deformetrima i ekstenzometrima znatno je skuplji od geodetskog praćenja mreže repera, ali i znatno točniji (Arbanas, 2008).



Slika 24 Princip mjerenje kliznim mikrometrom (Arbanas, 2008)

7. PRIMJER GRAĐEVNE JAME KBC RIJEKA

Za potrebe izgradnje objekata Kliničkog bolničkog centra Rijeka na Trsatu potrebno je izvesti iskop i zaštitu građevne jame. Kompletan iskop izvodi se u više ili manje raspucanom vapnencu što je sa stanovišta stabilnosti projektiranog zahvata povoljno. Velike količine iskopa u stijenskoj masi zahtijevaju metode brzog iskopa, što je zbog komplicirane geometrije građevinske jame nemoguće, jer ugrožava kontaktne zone s postojećim objektima i već izvedene zaštite pokosa. U svakom slučaju izvođač radova je obavezan izraditi projekt iskopa i miniranja kojim će garantirati tolerantan utjecaj degradirane stjenovite mase na stabilnost pokosa (primjena metoda konturnog miniranja; smooth blasting ili prespliting). Iskop kontaktne zone s postojećim zgradama i u zoni vertikalnih denivelacija dijelova novih zgrada izvodi se isključivo pomoću pneumatskih čekića kako bi se što manje poremetila stabilnost stijenske mase.

Iskop za I. i II. fazu gradnje istovremeno se nameće radi:

- velikih dubina i količina iskopa u stijeni,
- problema u komunikaciji i izvozu materijala iz iskopa,
- utjecaja naknadnih miniranja na stabilizirane pokose,
- nemogućnosti dovođenja u funkciju infrastrukture (prvenstveno lokalne ceste) prije
- izvedbe građevinske jame II. faze i
- opasnosti koje proistječu iz ostavljanja duže vremena otvorenih visokih slobodnih

pokosa građevinske jame (Institut IGH d.o.o., 2010).

7.1. Provedeni istražni radovi

Na predmetnoj lokaciji proširenja Kliničkog bolničkog centra Rijeka na Trsatu izvedeni su geotehnički istražni radovi radi utvrđivanja geološke građe terena, definiranja kontakta pokrivača i podloge, utvrđivanja uvjeta temeljenja budućih građevina i zaštite pokosa građevinske jame. Terenske radove obavila je tvrtka Rijekaprojekt d.o.o. iz Rijeke u svibnju 2008. Provedena su kompleksna geotehnička istraživanja koja su se sastojala od sljedećih metoda istraživanja:

- inženjerskogeološko kartiranje,

- istraživačko bušenje s jezgrovanjem i uzimanje uzoraka,
- determinacija i klasifikacija izbušene jezgre te fotografiranje (Slika 25),
- laboratorijsko ispitivanje uzoraka.



Slika 25 Primjer fotografije jezgre iz bušotina (Geotech d.o.o., 2020)

Na lokaciji KBC Rijeka izvedeno je dvanaest istražnih bušotina, dubine od 10 m do 25 m ovisno o dubini projektiranog iskopa građevinske jame. Bušenje je izvedeno motornom rotacijskom bušilicom metodom kontinuiranog jezgrovanja, a kao isplaka korištena je voda (Institut IGH d.o.o., 2008).

7.2. Inženjerskogeološke značajke lokacije

Na temelju rezultata inženjerskogeološkog kartiranja i istraživačkog bušenja, ustanovljeno je da se teren sastoji od pokrivača koji ima karakteristike tla i osnovne stijenske mase. Pokrivač izgrađuju naslage prirodnog pokrivača – crvenice, te antropogenog pokrivača – nabačaja. Vapnenci, dolomitični vapnenci i karbonatne breče tvore osnovnu stijenu. Vapnenci su litološki tip koji prevladava u stijenskoj masi. Bušenjem su ustanovljene i karbonatne breče. Izdanci osnovne stijenske mase vidljivi su na površini terena uz pokose i zasjeka. Stijenska masa pripada

skupini čvrstih (dobro okamenjenih) karbonatnih stijena sedimentnog podrijetla (Institut IGH d.o.o., 2008).

Na temelju inženjerskogeološkog kartiranja, pregleda izbušene jezgre može se govoriti o pokrivaču na osnovnoj stijeni i o tri tipa karbonatne stijenske mase. Prvom tipu pripada izrazito okršena i zdrobljena stijenska masa s više od 20 % glinovito-prašiniastih primjesa. To je površinska zona raspadanja na osnovnoj stijeni, ali također i zdrobljene zone uz rasjede. Drugom tipu pripada izrazito do jako raspucana i znatnije okršena stijenska masa čije su pukotine djelomice ispunjene glinom. Trećem tipu pripada srednje do slabo raspucana i neznatno okršena stijenska masa. Vapnenačku do dolomitično-vapnenačku stijensku masu odlikuje krški tip poroznosti. Tijekom izvedbe bušotina (svibanj 2008.) nije ustanovljeno postojanje stalne razine podzemne vode na lokaciji (Institut IGH d.o.o., 2008).

7.3. Inženjerskogeološko kartiranje izvedenih zasjeka

Prilikom izvedbe radova nužna je prisutnost inženjerskog geologa radi kartiranja izvedenih zasjeka i prepoznavanja potencijalno opasnih zona te projektantski nadzor vezano na intervencije u smislu projektiranja dodatnih osiguranja u eventualno zdrobljenim zonama vapnenca (rasjedi) ili nestabilnih blokova. Zato je u listopadu 2016. do kolovoza 2017., na pokosima građevinske jame Kliničkog bolničkog centra Rijeka na lokaciji Sušak (Slika 26), provedeno detaljno inženjerskogeološko kartiranje. Ukupno su izdvojene 74 inženjerskogeološke zone istovrsnih karakteristika. Isto tako, identificirani su karakteristični setovi diskontinuiteta te je određena njihova orijentacija i dan je opis.



Slika 26 Pogled na sjeverni i zapadni pokos građevne jame KBC Rijeka (LiveCam Croatia, 2020)

Za svaku zonu provedena je RMR klasifikacija stijenske mase prethodno opisana u poglavlju Geomehanička klasifikacija (RMR). Tablica 11 prikazuje primjer korištenja RMR tablice i sustava bodovanja.

Tablica 11 RMR klasifikacija sjevernog pokosa Z10 (Arbanas, 2017)

PROJEKT:	KBC Rijeka	POKOS:	sjever	ZONA:	S-Z10
LOKACIJA:	Trsat, Rijeka	ETAŽA:	L		
OBJEKT:	građevinska jama	DIO:	lijevo		
RMR KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE					
1. Jedn.tlačna čvrstoća (MPa)		Point load test (MPa)		Bodovi	
Vrlo visoka >250		>10.0		7	
Visoka 100-250		4.0-10.0			
Srednja 50-100	75	2.0-4.0			
Niska 25-50		1.0-2.0			
Vrlo niska 5-25		< 1.0			
Vrlo niska 1-5		-			
Vrlo niska <1		-			
2. RQD		Bodovi	5. Podzemna voda		Bodovi
Vrlo dobar 90-100%		16	Suho	X	15
Dobar 75-90%	70-90%		Vlažno		
Povoljan 50-75%			Mokro		
Nizak 25-50%			Kapanje		
Vrlo nizak <25%			Tečenje		
3. Razmak diskontinuiteta					Bodovi
	S1	S3	S4	P2	
Vrlo velik >200 cm					10
Velik 60-200 cm	X				
Srednji 20-60 cm		X	X		
Mali 6-20 cm			X		
Vrlo mali <6 cm					
4. Stanje diskontinuiteta					Bodovi
	S1	S3	S4	P2	
Postojanost	Vrlo mala <1 m		X		2
	Mala 1-3 m				
	Srednja 3-10 m	X	X	X	
	Velika 10-20 m				
	Vrlo velika >20 m				
Hrapavost	Vrlo hrapavi				1
	Hrapavi				
	Neznatno hrapavi	X		X	
	Glatki		X	X	
	Sliski				
Zijev	Zatvoreno		X		0
	<0.1 mm				
	0.1-1 mm				
	1-5 mm		X		
	> 5 mm	X		X	
Ispuna	Bez ispune		X		2
	Tvrda ispuna <5 mm				
	Tvrda ispuna >5 mm				
	Meka ispuna <5 mm			X	
	Meka ispuna >5 mm				
Trošnost	Svježe		X		1
	Neznatno trošni				
	Umjereno trošni		X		
	Jako trošni	X		X	
	Rotpuno trošni				
JRC	0-2				
	2-4				
	4-6				
	6-8		X		
	8-10	X	X	X	
	10-12				
	12-14				
	14-16				
	16-18				
18-20					
UKUPNO BODOVA:					54

Na istraživanim zasjecima izdvojene su sljedeće inženjerskogeološke jedinice (Arbanas, 2017):

Tablica 12 Inženjerskogeološke jedinice

Geneza/stratigrafski simbol	Vrsta materijala/mase	RMR
Pokrivač, površinske naslage	Transportirano tlo: Umjetne naslage (Q_{ut})	(011) Nasip: mješavina kršja, pijeska i umjetnog materijala /
	Rezidualno tlo (Q_{et})	(022) Tlo: mješavina sitnozrnastog tla i kršja /
Podloga, matična stijena		(121) Raspadnuta stijena: slabo vezana, jako razlomljena stijenska masa s mješavinom oštrobridnih i zaobljenih stijenskih odlomaka 0
		(122) Blokovito/poremećena stijena: razlomljena i/ili rasjednuta stijenska masa s oštrobridnim blokovima koji su omeđeni s mnogo setova diskontinuiteta 37- 58
	Sedimentna stijena: vapnenac i breča različitog stupnja trošnosti ($K_2^{1,2}$)	(123) Vrlo blokovita stijena: povezana, djelomice razlomljena stijenska masa s oštrobridnim blokovima koji su omeđeni s četiri i više setova diskontinuiteta 40- 61
		(124) Blokovita stijena: vrlo dobro vezana neporemećena stijenska masa koja se sastoji od blokova koji su omeđeni s tri do pet setova diskontinuiteta 47- 67

7.4. Inženjerskogeološke zone sjevernog pokosa

Sjeverni pokos je ukupne duljine oko 100 m i prosječne visine 18 m (Slika 27). Pokos je subvertikalan i pružanja 135-315°. Vršni dio zapadnog, centralnog dijela i krajnjeg istočnog dijela sjevernog pokosa izgrađen je od nasipa kojeg čini mješavina kršja, pijesak i umjetnog materijala te raspadnute stijene koju čini intenzivno trošan do raspadnuti vapnenac. Gornji dio pokosa je izgrađen je od izmjene vrlo blokovite stijene i blokovite/poremećene stijenske mase koju čine vapnenac i breča različitog stupnja trošnosti. Središnji istočni dio pokosa izgrađen je od vrlo blokovite stijenske mase i jednim manjim dijelom od blokovite/poremećene stijenske mase. U centralnom dijelu pokos izgrađuje većinom blokovita stijenska masa koju čini slabo trošna breča i manjim dijelom vrlo blokovita stijenska masa vapnenca i breče, dok središnji zapadni dio pokosa izgrađuje blokovito/poremećena stijenska masa vapnenca. Donji dio pokosa na zapadnom dijelu izgrađen je od izmjene blokovite i vrlo blokovite stijenske mase koju čine slabo trošan vapnenac i breča te izmjena vrlo blokovite i blokovito/poremećene stijenske mase srednje do intenzivno trošnog vapnenca na istočnom dijelu. Blokovita/poremećena stijenska masa je slabo vezana, jako razlomljena s mješavinom oštrobriđnih stijenskih odlomaka, s utvrđena 1-4 seta diskontinuiteta i vrijednosti RMR-a 37-50. Vrlo blokovita stijenska masa je povezana, djelomice razlomljena stijenska masa koja se sastoji od oštrobriđnim blokova omeđenih s 1-5 setova diskontinuiteta i vrijednost RMR-a od 42-60. Blokovita stijenska masa je vrlo dobro vezana i neporemećena stijenska masa koja se sastoji od blokova koji su omeđeni s do 3 seta diskontinuiteta, vrijednost RMR-a je od 54-67 (Arbanas, 2017).



Slika 27 Pogled na sjeverni pokos (LiveCam Croatia, 2020)

7.5. Iskop i zaštita sjevernog pokosa

Iskop građevne jame izvodi se u etažama visine 4 m na slobodnom pokosu (nagib 3:1). U blizini prometnica i susjednih objekata iskop se izvodi pneumatskim čekićima i bagerima kako bi se izbjegli negativni utjecaji miniranja. Miniranje se provodi samo u dijelovima masivnog iskopa. Iskop se izvodi s postepenim spuštanjem i paralelnom izvedbom zaštite kako bi se izvedeni iskop stabilizirao.

Na sjevernom pokosu provedena je zaštita mlaznim betonom, zaštita mrežama protiv odrona te mjestimično sidrenje. Sidrenje je provedeno samobušivim sidrima $\phi 38$ mm , štapnim sidrima $\phi 32$ mm i čeličnim šipkama Ferriere Nord $\phi 32$ mm. Sidro se sastoji od sidrene šipke, navrtke i podložne pločice. Ugradnja sidra (Slika 28) provodi se na sljedeći način: prvi korak je bušenje stijenke mase, slijedi ulaganje sidra u bušotinu te injektiranje prostora između sidrene šipke i stjenki bušotine.



Slika 28 Ugradnja i injektiranje geotehničkih sidara (Foto L. Gašparić)

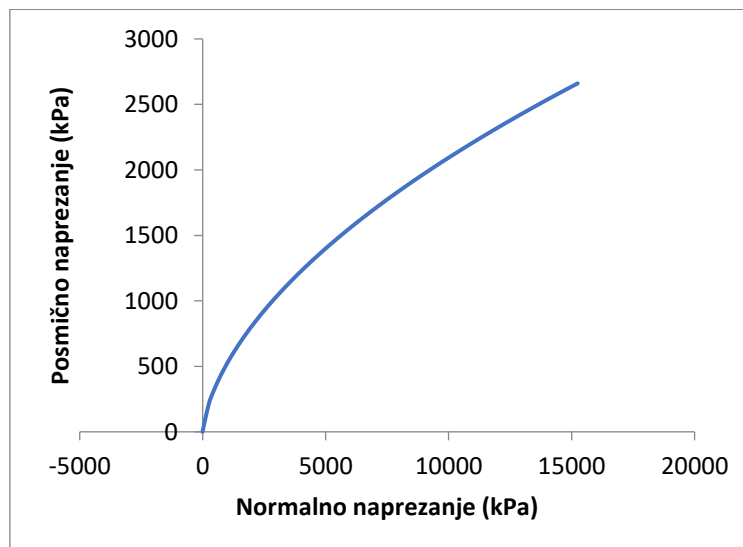
Predviđena je upotreba armaturnih mreža Q188 koje se polažu na prvi sloj mlaznog betona. Obloga stijenskog pokosa mlaznim betonom provodi se u dva sloja debljine 5 cm.

Tokom izvođenja radova treba provoditi kontrolna ispitivanja sidara. Kod kontrolnih ispitivanja silu treba povećavati samo do zahtijevane nosivosti, a ne do loma sidra. Predviđeno je da se kontrolna ispitivanja obave na 5% ugrađenih sidara. Ispitivanja treba obaviti u skladu s preporukama ISRM-a (1974) (Arbanas, 2017).

8. PROVJERA STABILNOSTI I ANALIZA STANJA NAPREZANJA I DEFORMACIJA GRAĐEVNE JAME KBC RIJEKA

Deformabilnost i parametri čvrstoće utvrđeni su geotehničkim istraživanjima i uporabom klasifikacijskih sustava stijenske mase. Na jednak način, definiran je geološki indeks čvrstoće GSI te ostali parametri potrebni za određivanje krivulje čvrstoće. Krivulja čvrstoće s odgovarajućim vrijednostima (Slika 29), određena je korištenjem Hoek-Brown-ovog kriterija čvrstoće pomoću programa RocLab za sljedeće ulazne vrijednosti:

- $\sigma_{ci} = 50000$ kPa,
- GSI = 30,
- $m_i = 8$,
- D = 1,
- $E_i = 12000000$ kPa.

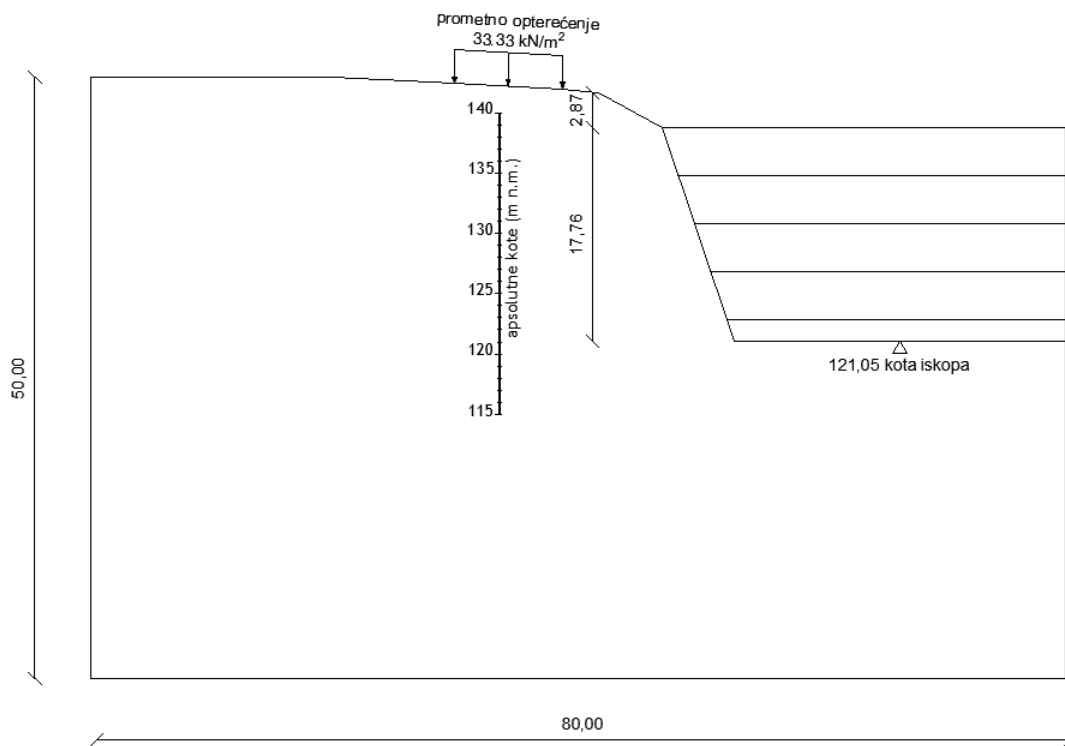


Slika 29 Krivulja čvrstoće dobivena u RocLabu

Tada je moguće izraditi geotehnički model i provesti provjeru stabilnosti i naponsko-deformacijsku analizu. Inicijalni faktor sigurnosti dobiven je analizom koja pretpostavlja iskop bez sustava ojačanja i podgrade stijenske mase. Ukoliko faktor sigurnosti ne zadovoljava

potrebno je provesti ojačanje stijenske mase. Faktor sigurnosti treba biti zadovoljavajući tijekom svih faza iskopa (Arbanas, Vivoda Prodan and Kursar, 2014).

Za presjek sjevernog stijenskog pokosa, izrađen je model iskopa nagiba 3:1 pomoću programa AutoCAD (Slika 30). U obzir je uzeto vanjsko opterećenje prometnice koje iznosi 33.33 kN/m^2 . Za sjeverni pokos prosječne visine 18 m izvodi se iskop u etažama visine 4 m.



Slika 30 Geometrija sjevernog stijenskog pokosa


8.1. Provjera stabilnosti

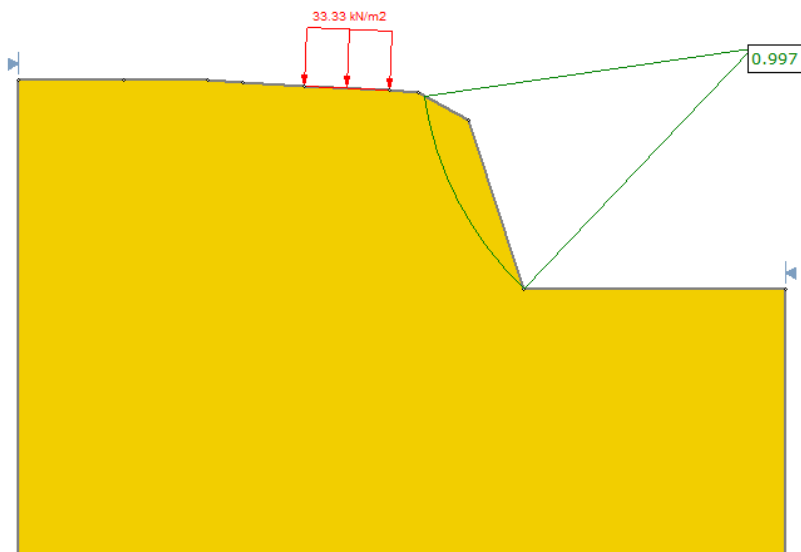
Analize su provedene u programskom paketu Rocscience Slide metodom po Bishopu za približno kružne klizne plohe. Slide 2 je program za dvodimenzionalnu analizu stabilnosti kosina u tlu ili stijenskoj masi. Izračunava faktor sigurnosti za kružne i nekružne plohe sloma koristeći razne metode granične ravnoteže poput Bishopa, Janbua i Spencera.

8.1.1. Klasični pristup

U ovom poglavlju bit će prikazani rezultati analize stabilnosti za klasični pristup koji pretpostavlja najnepovoljnije karakteristike stijenske mase. Na osnovi geomehničke klasifikacije, provedene na temelju geotehničkih istraživanja iz 2008. godine, dobiveni su parametri iz Tablice 13. Nakon unesenih podataka i postavki u provedenoj analizi dobiven je minimalni faktor sigurnosti $FS = 0.99$ (Slika 31).

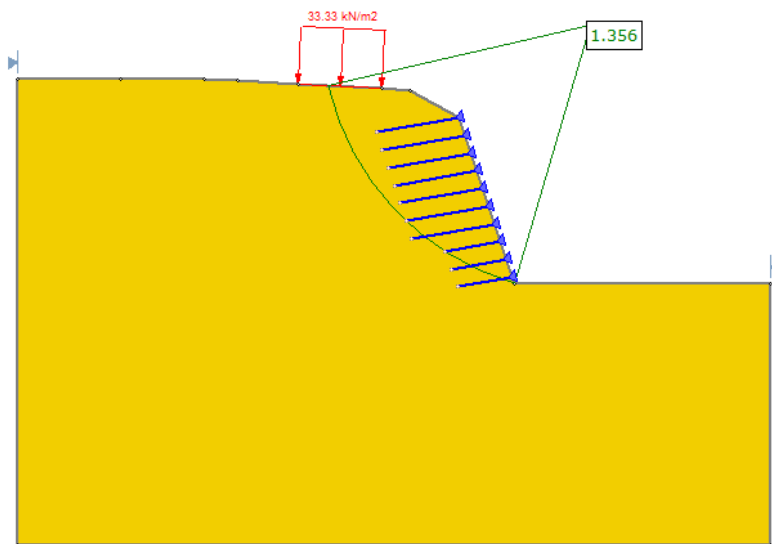
Tablica 13 Parametri za provjeru stabilnosti (Klasičnom pristupu)

Naziv materijala	Boja	Zapreminska težina (kN/m ³)	Kriterij čvrstoće	UCS (kPa)	GSI	mi	D
RMR 35		25	Generalizirani Hoek-Brown	50000	30	8	1



Slika 31 Faktor sigurnosti iskopa (Klasični pristup)

Ostvareni računski faktor sigurnosti ne zadovoljava. Stijenski pokos potrebno je ojačati sidrima. Za primijenjena sidra pretpostavljena je ugradnja pod kutem od 10° od horizontale, duljina 6 do 9 m na rasteru 2×2 m. Nosivost izabranih štapnih sidara iznosi 150 kN. Na Slici 32 prikazan je dobiven faktor sigurnosti $FS = 1.35$ kritične klizne plohe zajedno s primijenjenim sustavom ojačanja.







Slika 32 Faktor sigurnosti ojačanog stijenskog pokosa (Klasični pristup)

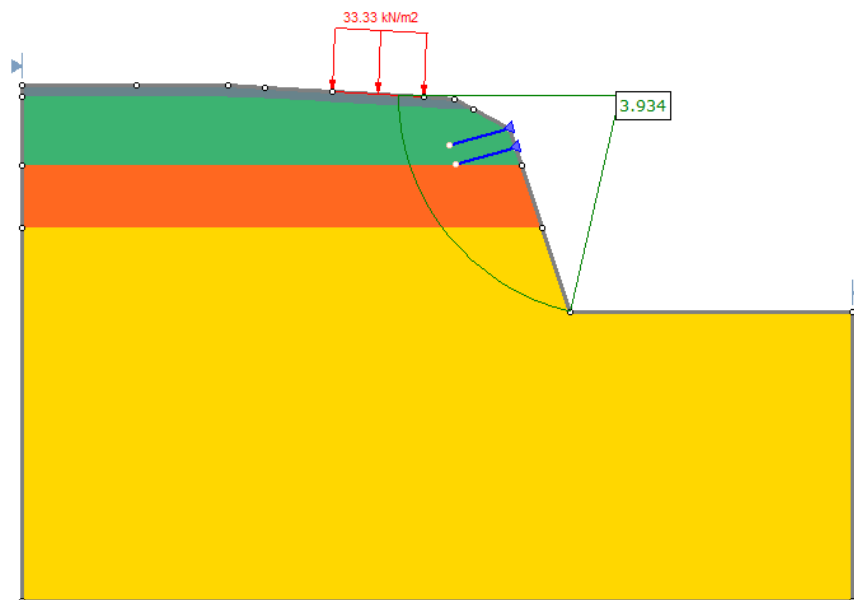
8.1.2. Opservacijska metoda

Na identičnom modelu iskopa stijenskog pokosa provedena je analiza stabilnosti koja predstavlja približno stvarno stanje. Kako bi mogli usporediti predviđeno stanje i stvarno stanje kvalitete stijenske mase, za analizu stvarnog stanja preuzeti su parametri (Tablica 14) dobiveni inženjerskogeološkim kartiranjem izvedenih zasjeka.

Tablica 14 Parametri za analizu stabilnosti (Opservacijska metoda)

Naziv materijala	Boja	Zapreminska težina (kN/m ³)	Kriterij čvrstoće	Kohezija (kPa)	ϕ (deg)	UCS (kPa)	GSI	mi	D
Nasip		21	Mohr-Coulomb	0	35				
RMR 56		25	Generalizirani Hoek-Brown			80000	51	8	1
RMR 67		25	Generalizirani Hoek-Brown			100000	62	8	1
RMR 53		25	Generalizirani Hoek-Brown			75000	48	8	1

Provedenom analizom granične ravnoteže dobiven je faktor sigurnosti FS=3.93 koji zadovoljava (Slika 33). S obzirom na zadovoljavajući faktor sigurnosti nije potrebno sustavno sidrenje već se primjenjuje lokalno sidrenje u području zdrobljenih zona vapnenaca, rasjeda i nestabilnih blokova kamena. Primjenjuju se dva reda štapnih sidara, nosivosti 150 kN i duljine 6 m, pri vrhu zasjeka.



Slika 33 Faktor sigurnosti za iskop (Opservacijska metoda)

8.2. Analiza stanja naprezanja i deformacija

Za sjeverni pokos građevne jame provedena je dvodimenzionalna analiza upotrebom računalnog programa Phase2 (Rocscience) koji implementira metodu konačnih elemenata. Proračunski model sastoji se iz više koraka (faza), geotehničkih jedinica i konstitutivnih zakona ponašanja materijala. U postavkama čvrstoće materijal je definiran kao elastoplastičan, što podrazumijeva sljedeće. Ukoliko se dosegne čvrstoća popuštanja, elastoplastičan materijal će se za razliku od elastičnog trajno deformirati i nakon rasterećenja se neće vratiti u izvorni oblik. Deformacija koja se javlja naziva se plastična deformacija. Model je diskretiziran sa 647 konačnih elemenata te su zadani sljedeći rubni uvjeti: onemogućeni su pomaci u x smjeru na lijevoj i desnoj strani modela te pomaci u x i y smjeru na dnu modela, vrh modela oslobođen je u svim smjerovima.

8.2.1. Klasični pristup

U ovom poglavlju provedena je analiza naprezanja i deformacija za klasični tj. konzervativni pristup projektiranju za najnepovoljnije karakteristike stijenske mase (RMR= 35). Značajke materijala prikazane su u sljedećoj tablici:

Tablica 15 Parametri za analizu stanja naprezanja i deformacija (Klasični pristup)

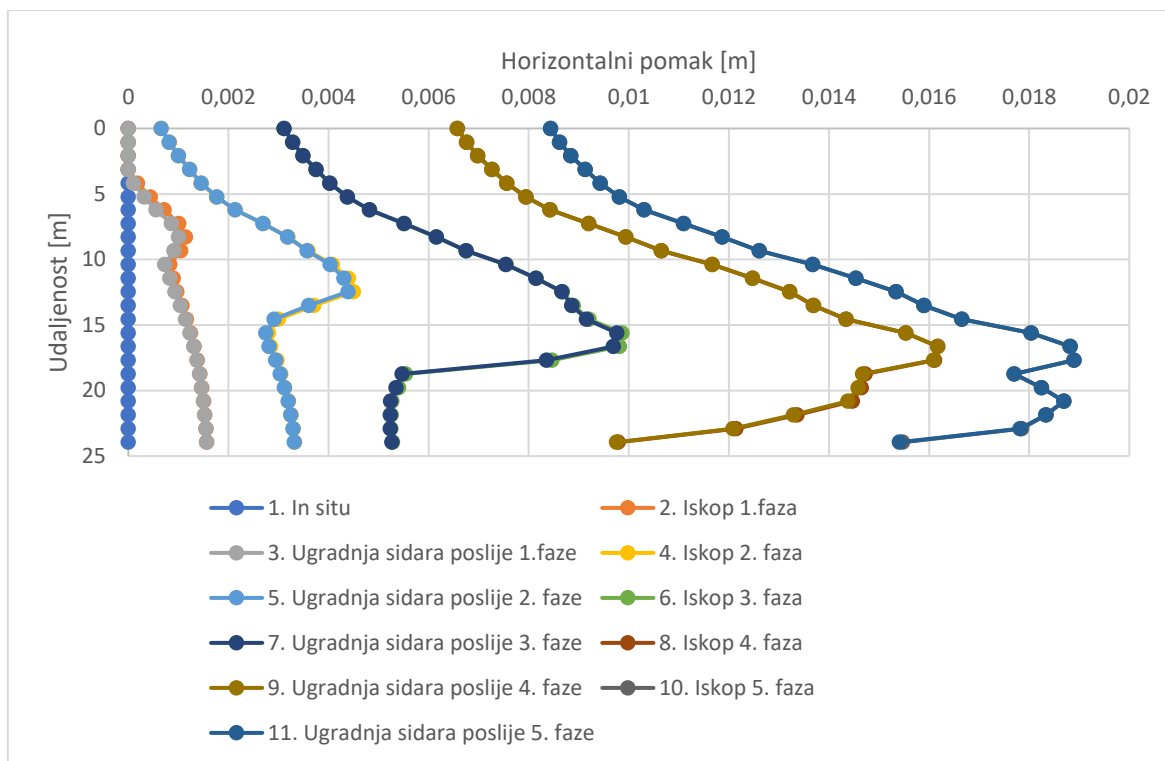
Naziv materijala	Boja	Zapreminska težina (kN/m ³)	Youngov modul (kPa)	Kriterij čvrstoće	UCS (kPa)	mb	s	a
RMR 35		25	335000	Generalizirani Hoek-Brown	50000	0.054	8.575e-06	0.522

Iskop i zaštita građevne jame modelirana je u slijedećim fazama:

1. In situ
2. Iskop 1. faza
3. Ugradnja sidara (L= 9 m)
4. Iskop 2. faze
5. Ugradnja sidara (L= 9 m)
6. Iskop 3. faze
7. Ugradnja sidara (L= 9 m)
8. Iskop 4. faze
9. Ugradnja sidara (L= 6 m)
10. Iskop 5. faze
11. Ugradnja sidara (L= 6 m)

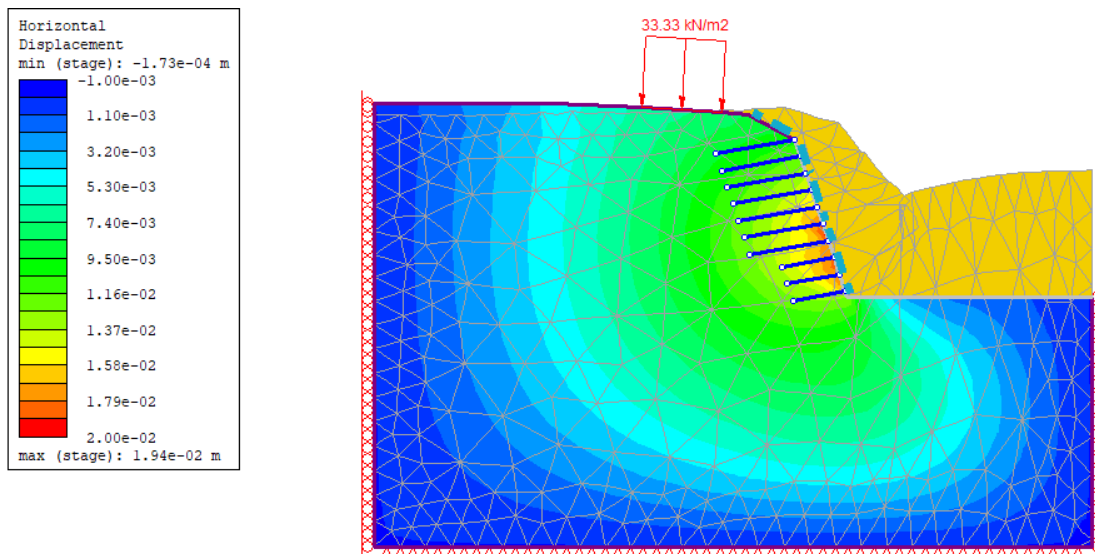
Nakon svake ugradnje štapnih sidara slijedi obloga mlaznim betonom u dva sloja debljine 5 cm.

Na Slici 34 prikazane su vrijednosti horizontalnih pomaka po dubini za svaku fazu. Nakon prve faze "in situ" pomaci su resetirani, kako bi se filtrirali oni koji nisu značajni u ovoj analizi i uspostavilo referentno stanje. Maksimalni izračunati horizontalni pomak javlja se u završnoj fazi i iznosi 1.9 cm.



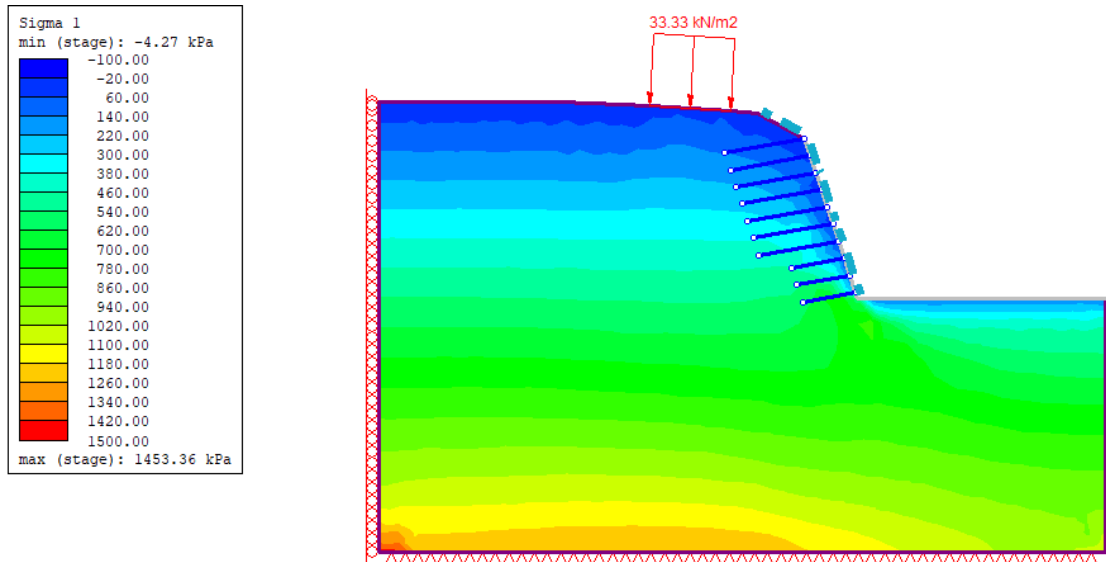
Slika 34 Dijagram horizontalnih pomaka za sve faze (Klasičan pristup)

Slika 35 prikazuje mrežu s horizontalnim pomacima u svim čvorovima. Stijenska masa pomiče se u iskop jer je uklonjen dio stijene s kojim je bila u ravnoteži. Klizanje blokova u iskop može se javiti u diskontinuiranoj stijenskoj masi (Vrkljan, 2003). Pomaci uzrokovani iskopom, kontroliraju se primjenom štapnih sidara i mlaznog betona.



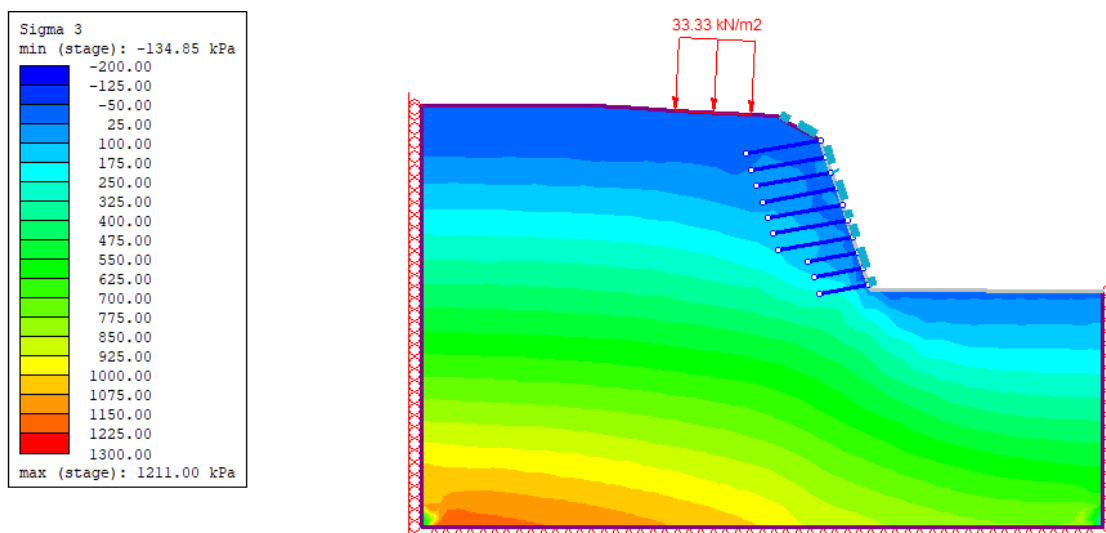
Slika 35 Prikaz deformirane mreže za završnu fazu (Klasični pristup)

Sljedeća slika (Slika 36) prikazuje raspodjelu većeg glavnog napreznja tj. vertikalnog napreznja. Najveće vertikalno napreznje za završnu fazu iznosi 1453.36 kPa.



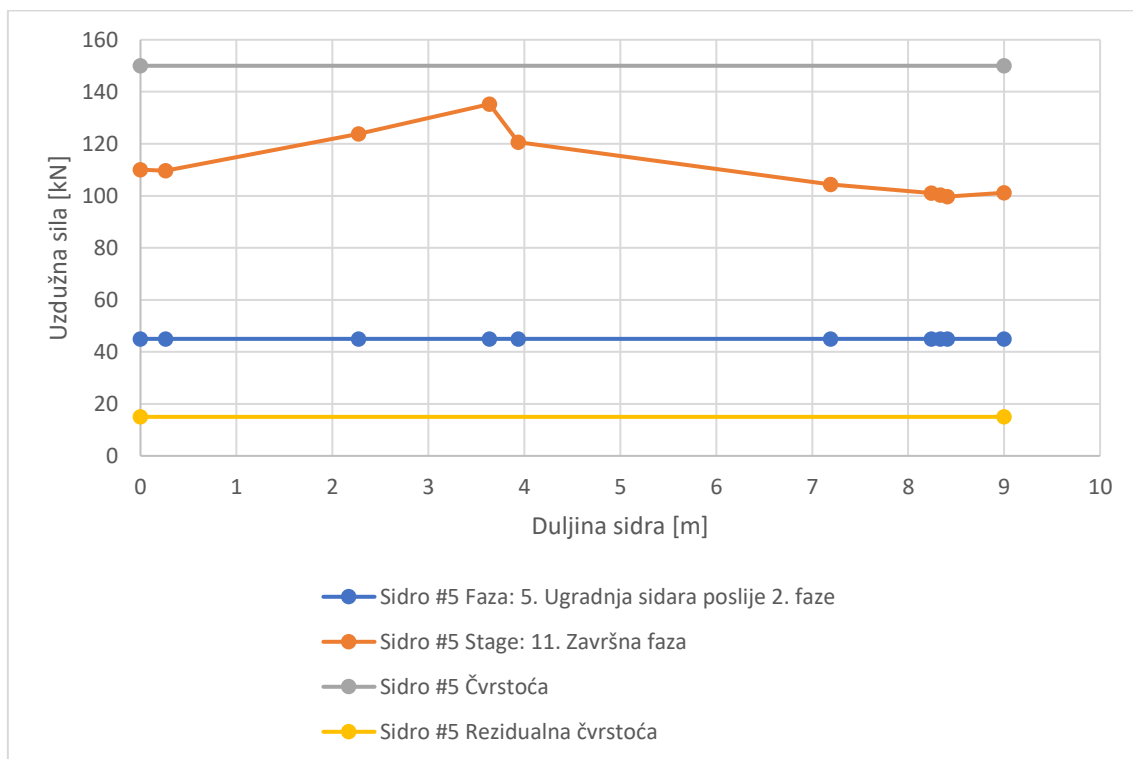
Slika 36 Vertikalna napreznja za završnu fazu (Klasični pristup)

Slika 37 prikazuje manja glavna napreznja tj. horizontalna napreznja, a njihova maksimalna vrijednost za završnu fazu iznosi 1211.00 kPa.



Slika 37 Horizontalna napreznja za završnu fazu (Klasični pristup)

Svaki konstrukcijski element podgrade ima sposobnost preuzeti određeni kapacitet. Slom podgradnog elementa, u ovoj slučaju sidra, javlja se nakon što uzdužna sila prekorači njegov kapacitet. Međutim, nakon što se prekorači vršna čvrstoća elementa, on i dalje posjeduje vrijednost rezidualne čvrstoće. Na Slici 38 prikazan je dijagram uzdužnih sila u sidru #5 koje je najopterećenije ugrađeno sidro. Maksimalna vrijednost uzdužne sile u sidru iznosi 135 kN čime nije dosegnuta vršna čvrstoća od 150 kN.



Slika 38 Dijagram uzdužnih sila u sidru #5 (Klasični pristup)

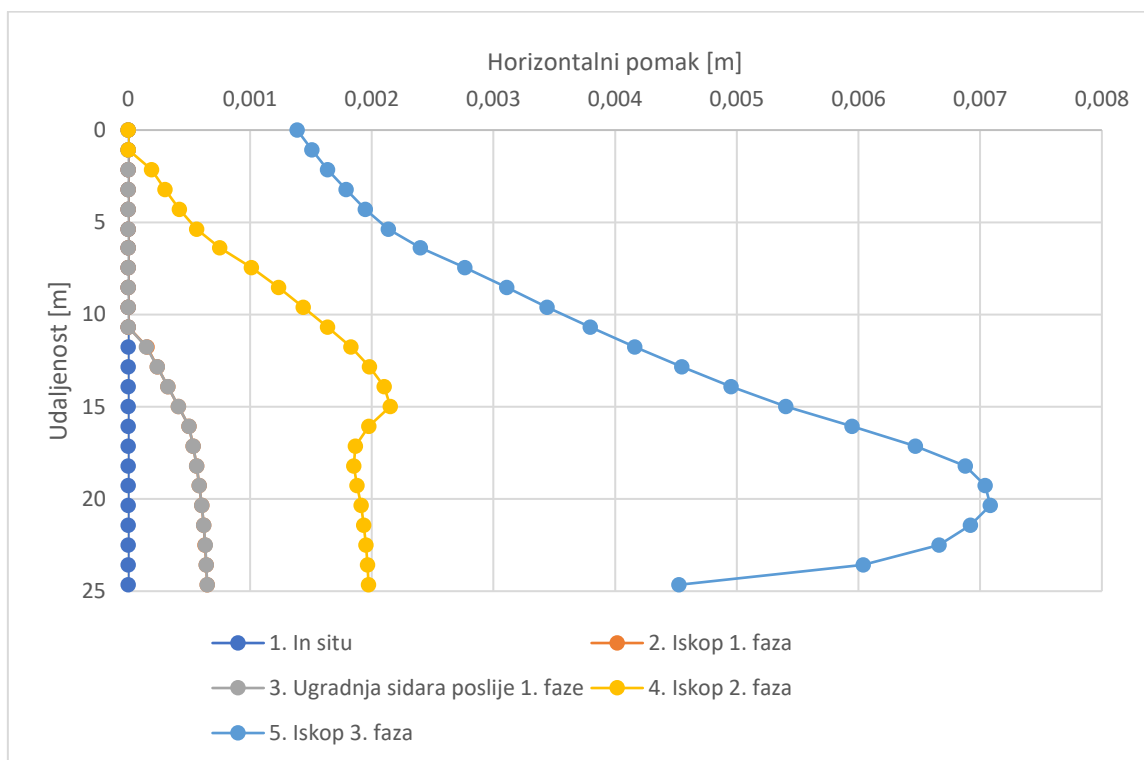
8.2.2. Opservacijska metoda

Opservacijskom metodom prikazana je analiza izvedenog stanja iskopa i zaštite sjevernog stijenskog pokosa. Korištene su identične geotehničke jedinice kao i u poglavlju 8.1.2. koje približno predstavljaju stvarno stanje kvalitete stijenske mase analiziranog zasjeka. Primjenom Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće dobivene su vrijednosti parametara konstanti (mb, s, a) i modula deformabilnosti. Tablica 16 prikazuje optimistične parametre kvalitete stijenske mase.

Tablica 16 Parametri za analizu stanja naprezanja i deformacija (Opservacijska metoda)

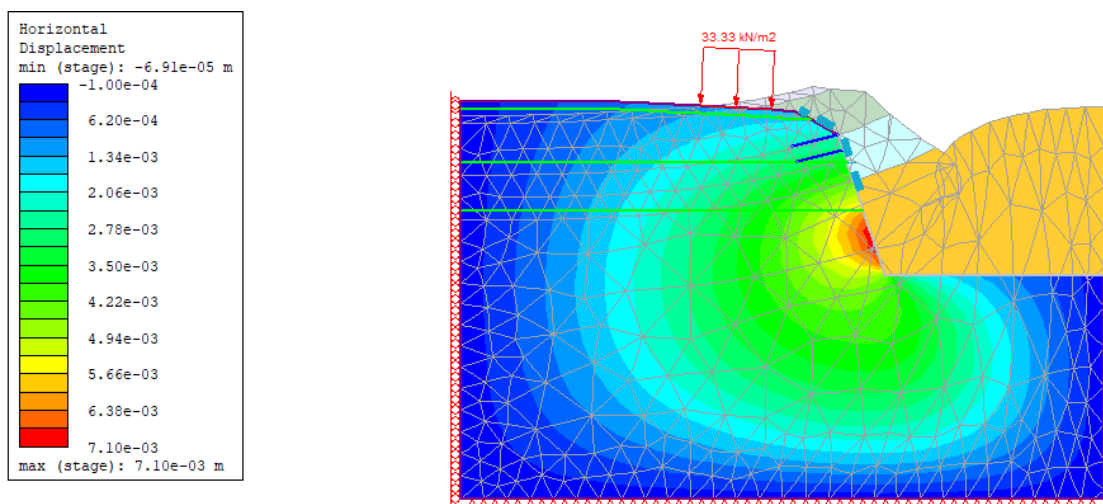
Naziv materijala	Boja	Zapreminska težina (kN/m ³)	Youngov modul (kPa)	Kriterij čvrstoće	UCS (MPa)	mb	s	a
Nasip		21	30000	Mohr-Coulomb				
RMR 56		25	850000	Generalizirani Hoek-Brown	80	0.242	0.0002 84	0.50 5
RMR 67		25	1.65e+06	Generalizirani Hoek-Brown	100	0.53	0.002	0.50 2
RMR 53		25	700000	Generalizirani Hoek-Brown	75	0.195	0.0001 72	0.50 7

Na Slici 39 prikazani su analizom dobiveni horizontalni pomaci za izvedeno stanje. Najveći pomak javlja se u završnoj fazi iskopa i iznosi 0.7 cm.



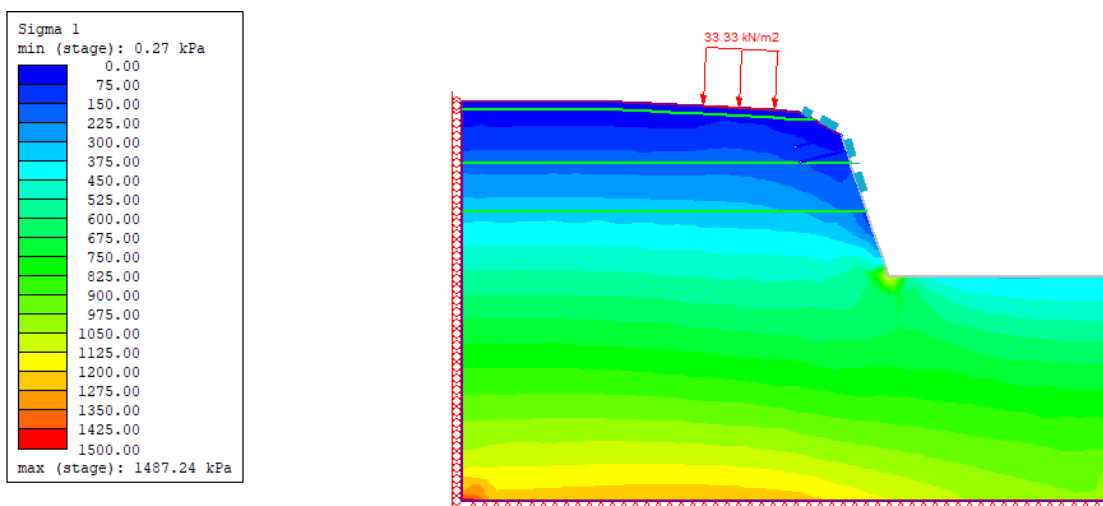
Slika 39 Dijagram horizontalnih pomaka za sve faze (Opservacijska metoda)

Identično analizi klasičnog pristupa, stijenska masa pomiče se u iskop (Slika 40). Najveći pomaci vidljivi su u nožici iskopa pri dnu građevne jame.

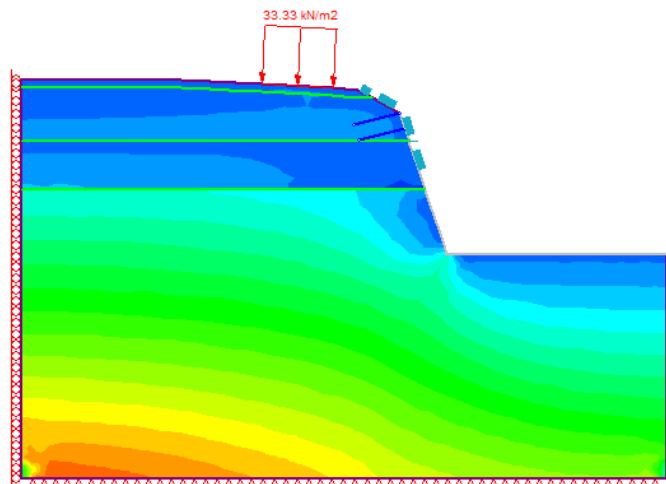
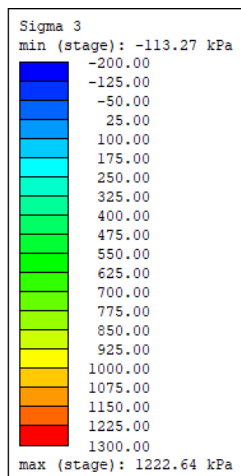


Slika 40 Prikaz deformirane mreže za završnu fazu (Opservacijska metoda)

Slike 41 i 42 prikazuju raspodjelu naprezanja za završnu fazu analize. Najveće vertikalno naprezanje iznosi 1487.24 kPa dok najveće horizontalno naprezanje iznosi 1222.64 kPa.

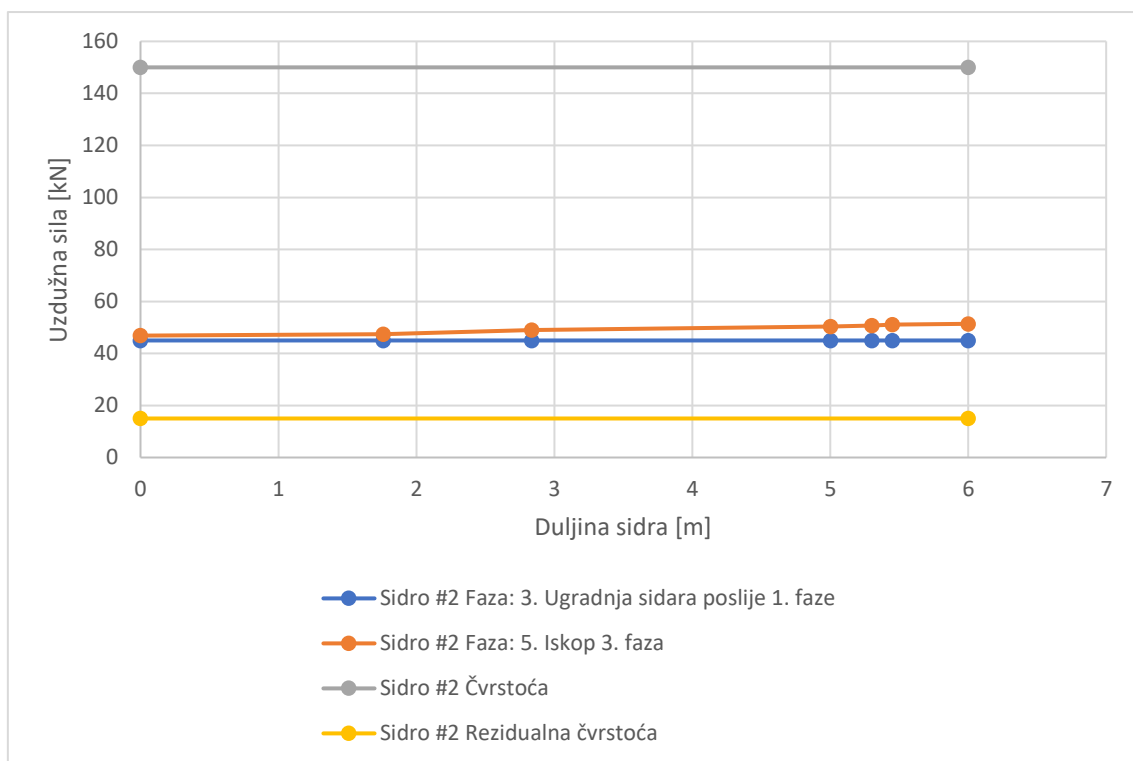


Slika 41 Vertikalna naprezanja za završnu fazu (Opservacijska metoda)



Slika 42 Horizontalna naprezanja za završnu fazu (Opservacijska metoda)

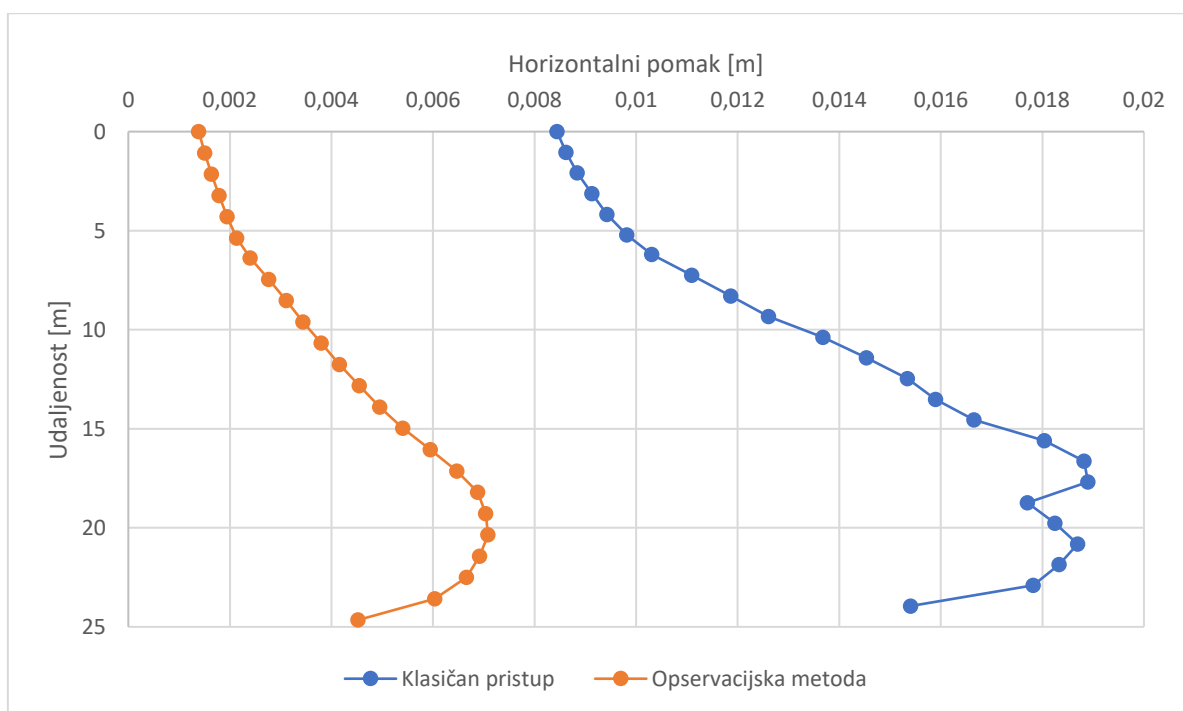
Dijagram uzdužnih sila u sidru #2, najopterećenijem ugrađenom sidru, prikazan je na Slici 43. Maksimalna vrijednost uzdužne sile u sidru iznosi 52 kN. U odnosu na klasični pristup projektiranju, iskorištenost sidra je značajno manja te iznosi 34,66 % što je očekivano s obzirom da je za projektiranje opservacijskom metodom usvojena povoljnija kvaliteta stijenske mase.



Slika 43 Dijagram uzdužnih sila u sidru #2 (Opservacijska metoda)

8.2.3. Usporedba rezultata

Na sljedećem dijagramu (Slika 44) prikazane su vrijednosti horizontalnih pomaka po dubini iskopa za predviđeno stanje, projektirano klasičnim pristupom, i stvarno stanje, projektirano opservacijskom metodom. Maksimalna vrijednost pomaka za predviđeno stanje iznosi 1.8 cm dok za stvarno stanje iznosi 0.7 cm. Za dva različita pristupa projektiranju dobivena je značajna razlika u pomacima od 1.2 cm. Klasičnim pristupom projektiranja dobiveni su veći pomaci jer usvaja najnepovoljnije vrijednosti parametara zbog nesigurnosti poznavanja uvjeta u tlu/stijeni. Projektiranje opservacijskom metodom pretpostavlja znatno povoljniju kvalitetu stijenske mase *in situ* koja je utvrđena iskopom pa zato rezultira manjim pomacima.



Slika 44 Usporedba horizontalnih pomaka završne faze klasičnog pristupa i opservacijske metode

Opservacijska metoda omogućila je prilagodbu projekta stvarnim uvjetima *in situ* i samim time optimizaciju projektnog rješenja zaštite stijenskih pokosa. Kako bi se osigurala optimalna sigurnost nije potrebno ekonomski nepovoljno sustavno sidrenje svih pokosa već se sidrenje provodi mjestimično, u opservacijom utvrđenim oslabljenim zonama.

9. ZAKLJUČAK

Obzirom na nesigurnosti uvjeta u tlu/stijenskoj masi, klasični pristup bazira se na konzervativnoj (pesimistična/nepovoljna) interpretaciji dostupnih podataka tla/stijenske mase. Projektnim rješenjem nije predviđena izvanredna situacija stoga u tom slučaju nije moguće primijeniti korektivne mjere. Pristup po opservacijskoj metodi, razvijen je iz potrebe da se izbjegnu konzervativne pretpostavke o uvjetima u tlu/stijenskoj masi (Szavits Nossan, 2006). Ovaj pristup omogućuje promjene projekta tijekom izvedbe i prilagodbe *in situ* uvjetima stijenske mase. Sudjelovanje projektanta od provođenja istražnih radova do izvedbe građevine od velike je važnosti u ovom pristupu. Promatranje ponašanja i monitoring pri izvedbi građevnih jama predstavlja osnovni uvjet za primjenu opservacijskih metoda u geotehničkom inženjerstvu. Promatranje zahtjeva pouzdanost ugrađenog sustava mjerenja i promatranja i iskustvo u korištenju opreme i provođenju radova promatranja, kao osnovu za efikasnost implementacije opservacijske metode (Arbanas, 2013). 1995. Eurocode 7 (BS EN 1997-1:2004 British Standard, 2004) prihvaća opservacijsku metodu kao normu i prepoznaje ulogu iste u projektiranju i izvedbi radova, ali slabo određuje na koji način se ista provodi. Na primjeru sjevernog pokosa građevne jame KBC Rijeka prikazani su rezultati analize jednog i drugog pristupa kako bi se utvrdile deformacije koje imaju važnu ulogu pri optimizaciji konstrukcije. Za navedeni pokos izvedena su geotehnička istraživanja kako bi se utvrdila kvaliteta stijenske mase. Stijenska masa pripada skupini čvrstih (dobro okamenjenih) karbonatnih stijena sedimentnog podrijetla. Analizom dobiveni horizontalni pomaci 2.5 puta su veći od pomaka dobivenih analizom pristupa po opservacijskoj metodi. S obzirom na veličine pomaka analize po klasičnom pristupu, elementi pograđivanja zidova građevne jame bili bi predimenzionirani. Pristup projektiranju opservacijskom metodom omogućio je prilagodbu projekta *in situ* stanju i na ekonomičan način osigurao optimalnu sigurnost. Unatoč tim prednostima, opservacijska metoda se u Hrvatskoj i dalje rijetko koristi iz razloga što uključuje složeniji projekt koji podrazumijeva veći napor pri projektiranju, promatranje konstrukcije i zahtijeva sudjelovanje projektanta od provođenja istražnih radova do izvedbe.

LITERATURA

- Arbanas, Ž. (2008) Projektiranje u stijenskim masama, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- Arbanas, Ž. (2013) 'Using of Observational Methods during Designing and Constructing of Open Pits in Rock Mass in Urban Areas', Jahorina, p. 32.
- Arbanas, Ž. (2017) 'Projekt izvedenog stanja', Rijeka, El. br. 361-03/16-02/15.
- Arbanas, Ž., Vivoda Prodan, M. and Kursar, P. (2014) 'Pit excavation for underground construction in an urban area near an old tunnel', in Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses - Proceedings of EUROCK 2014, ISRM European Regional Symposium. Vigo, pp. 1105–1110.
- Barton, N. and Choubey, V. (1977) 'The shear strength of rock joints in theory and practice', Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches, 10(1–2), pp. 1–54.
- Bieniawski, Z. T. (1989) 'Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering', Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering, New York: Wiley, 251 p.
- BS EN 1997-1:2004 British Standard (2004) 'Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules', Journal of Constructional Steel Research.
- Construction Industry Research and Information Association (1999) The Observational Method in ground engineering, London, 217 p.
- Deere, D. U. (1989) Rock Quality Designation (RQD) After 20 Years, Rock Mass Classification, London, Vicksburg, 67 p.
- Dugonjić Jovančević, S. (2016) Inženjerska mehanika stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 219 p.
- Geotech d.o.o. (2020) Djelatnosti, <https://www.geotech.hr>, pristup 31.8.2020.
- Hoek, E. (2000) Practical Rock Engineering, <https://www.rocscience.com/learning/hoek-corner/course-notes-books>, 313 p.
- Hoek, E. and Brown, E. T. (2019) 'The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition', Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3), pp. 445–463.
- Hoek, E. and Diederichs, M. (2006) 'Empirical estimation of rock mass modulus', International

- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, pp. 203–215.
- Institut IGH d.o.o. (2008) ‘Geotehnički projekt – Zaštita građevinske jame’, Zagreb, br. projekta: 2200-146-2008.
- Institut IGH d.o.o. (2010) ‘Projekt zaštite građevinske jame’. Zagreb, br. projekta: 3300-454-2010.
- Keller Group (2015) Excavation Pits [Brochure], <http://www.keller-funderingsteknik.dk/en/excavation-pits-solutions.html>, 4 p.
- Li, C. C. (2017) Rockbolting: Principles and applications, Rockbolting: Principles and Applications, Elsevier, 271 p.
- LiveCam Croatia (2020) Images - Rijeka, Construction of the new hospital in Sušak, <https://www.livecamcroatia.com/en/camera/rijeka-construction-of-the-new-hospital-in-susak/slike>, pristup 6.9.2020.
- Marinos, V., Marinos, P. and Hoek, E. (2005) ‘The Geological Strength Index: Applications and limitations’, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64, pp. 55–65.
- Monterra (2020) Construction pit protection during the construction of Zagrad B complex (Phase 1), <https://www.monterra.hr>, pristup 8.9.2020.
- Nonveiller, E. (1979) Mehanika tla i temeljenje građevina. Zagreb: Školska knjiga (Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu), 780 p.
- Patel, D. et al. (2007) ‘The observational method in geotechnics’, in Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Peck, R. B. (1969) ‘Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics’, Géotechnique, 19(2), pp. 171–187.
- Rezaei, M., Ghafoori, M. and Ajalloeian, R. (2016) ‘Comparison between the In Situ Tests’ Data and Empirical Equations for Estimation of Deformation Modulus of Rock Mass’, Geosciences Research, 1.
- Singh, B., Goel, R. K. and Goel, R. K. (2006) Tunnelling in Weak Rocks. Elsevier Science (Geo-Engineering Book Series).
- Stacey, T. R. (2004) ‘The link between the design process in rock engineering and the code of practice to combat rock fall and rockburst accidents’, 104, pp. 29–33.
- Szavits Nossan, A. (2006) ‘Observations on the Observational Method’, XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, pp. 171–178.

http://bib.irb.hr/datoteka/270297.Observations_on_the_OM.pdf (pristup: 01/12/2013).

Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967) Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley (Wiley International Edition), 729 p.

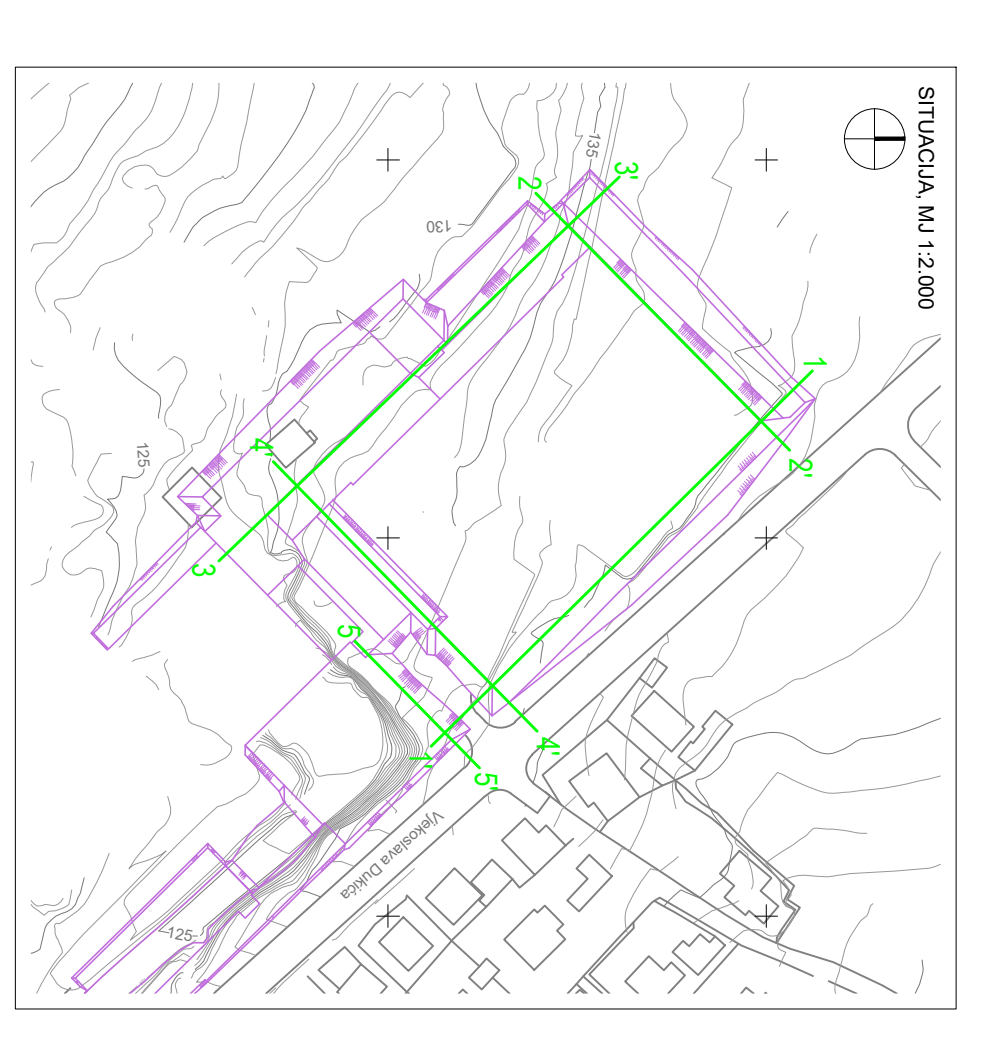
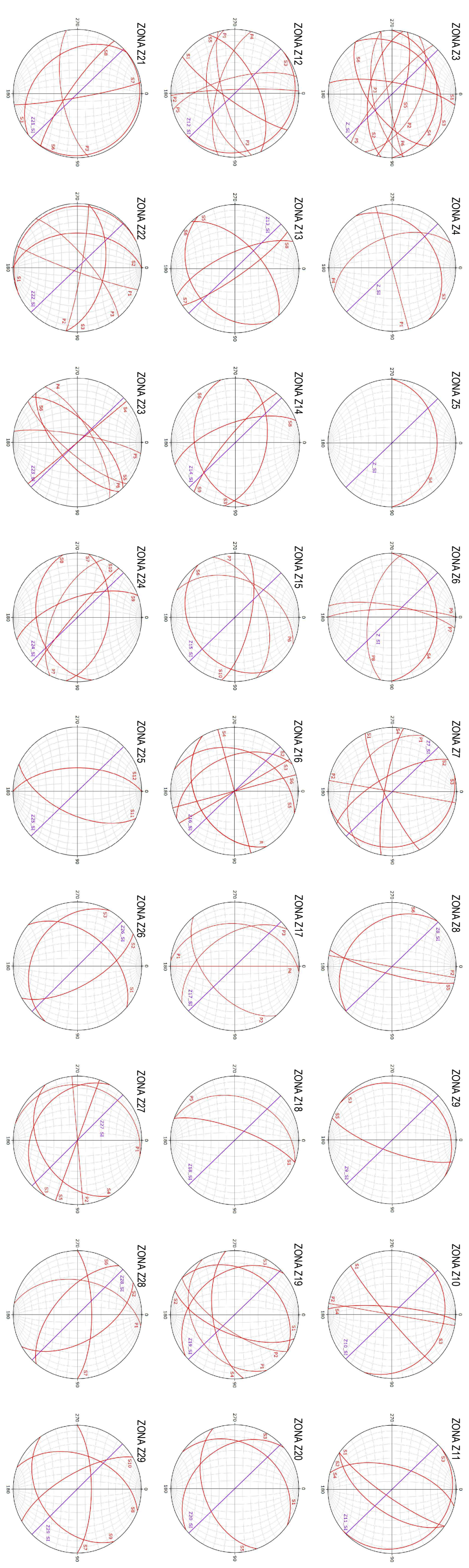
US Bureau of Mines (1987) State-of-the-art and physical properties of rock support system, Denver, 118 p.

Vrkljan, I. (2003) Inženjerska mehanika stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.

Wyllie, D. C. and Mah, C. W. (2017) Rock slope engineering: Civil and mining, 4th edition, Rock Slope Engineering: Fourth Edition, 432 p.

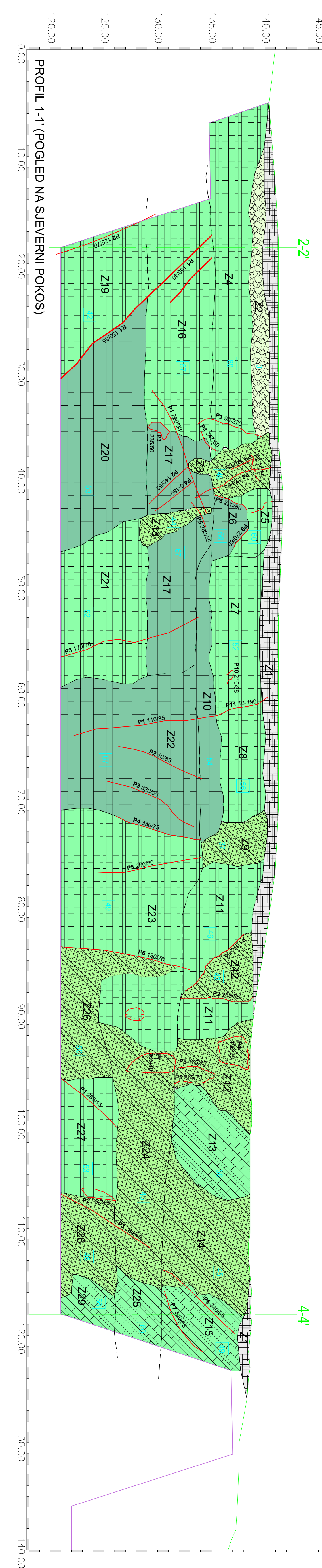
PRILOZI

1. Inženjerskogeološki profil 1-1' pogled na sjeverni pokos (M 1:200)
2. Mjere zaštite, inženjerskogeološki profil 1-1' pogled na sjeverni pokos (M 1:200)

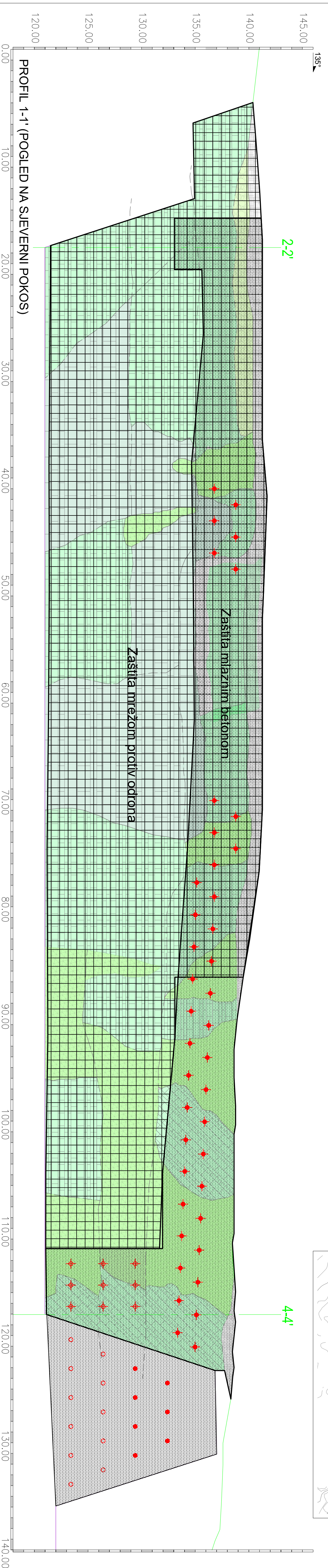
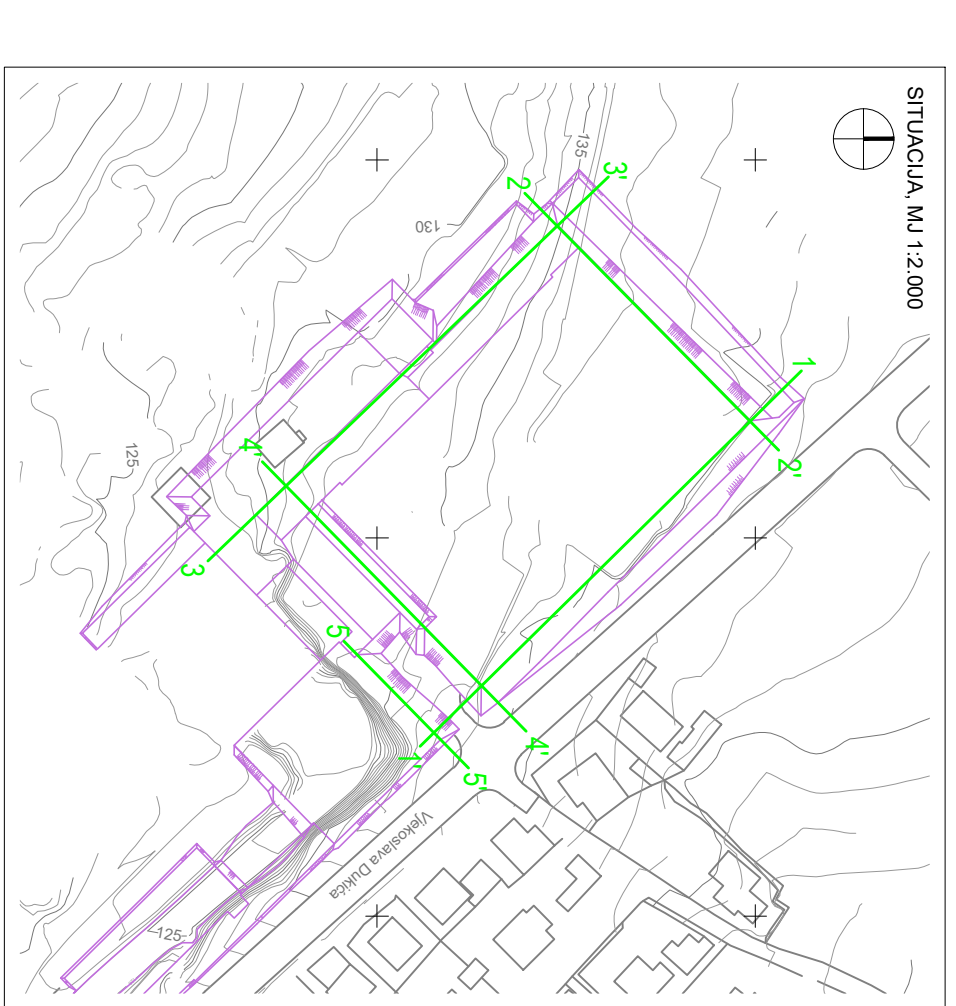


INŽENJERSKOGEOLOŠKE JEDINICE			
GENEZA / STATIGRAFSKI SIMBOL	OZNAKA	VRSTA MATERIALAMASE	RMR KLASIFIKACIJA STUJENSKE MASE
TRANSPORTIRANO TLO: NASIP	Qut	001 NASIP - mješavina klijša, pjeska i umjerenog materijala	/
REZIDUALNO TLO	Qet	002 TLO - mješavina silikastog šljunčnjaka	/
PODLOGA, MATIČNA STUJENA		121 RASPADNUTA STUJENA, slabio vezana, jako razdvojenija sipjenska masa s mješavinom ostrovdinirani i zadržani sipjenskih ostataka	0
		122 BLOKOVITO-POPREČNA STUJENA, razdvojenija ili raspisana sipjenska masa s ostrovdiniranim blokovima koji su omeđeni s mnogo slabio dekomprimirana	37-58
		123 VRLO BLOKOVITA STUJENA, povezana, djelomično omeđeni s debiri i više slabio dekomprimirana	40-61
		124 BLOKOVITA STUJENA, vrlo dobro vezana nepovezana sipjenska masa koja se sastoji od blokova koj su omeđeni s ili do pri slabio dekomprimirana	47-67







LEGENDA	
	GRANICA
	INŽENJERSKOGEOLOŠKE ZONE
	PRETPOSTAVLJENA GRANICA
	INŽENJERSKOGEOLOŠKE ZONE
	POJEDINAČNA PUKOTINA
	RASJED
	KAVERNA
	RMR VRIJEDNOST KLASIFIKACIJE
	STUJENSKE MASE
	ISKOP
	POPREČNI PRESJEK



GF GRADEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI	
Diplomski rad USPOREDBA PROJEKTIRANJA KLASIČNIM PRISTUPOM I OPSERVACIJSKOM METODOM NA PRIMJERU PROJEKTA OSGURANJA GRABEVNE JAMIE KBC RIJEKA	Sadržajni nacrt: INŽENJERSKOGEOLOŠKI PROFIL 1-1' POGLED NA SJEVERNI POKOS (Preuzeto iz: Elaborat broj: 361-03/16-02/15 21/0-5/17-01-00-17-3 Projektant: Prof.dr. sc. Željko Arbanas, mag.jing.aedif. Rijeka, 2017.)
Student: Lucija Gašparić	Kolegiji: STABILNOST KOSINA
Mentor: prof. dr. sc. Željko Arbanas	Datum: 10.9.2020.
	Mjerilo: 1:200
	List: 1



LEGENDA

-  MLAZNI BETON
-  ZAŠTITNA MREŽA
-  SAMOBUŠIVO SIDRO R38, L=3.0 m - 11 kom
-  SAMOBUŠIVO SIDRO R38, L=6.0 m - 7 kom
-  ŠTAPNO SIDRO R32, L=6.0 m - 9 kom
-  FERRIERE NORD FI 32 mm, L=6.0 m - 41 kom

GF GRADEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI

Diplomski rad
**USPOREDBA PROJEKTIRANJA
 KLASIČNIM PRISTUPOM I
 INŽENJERSKOGEOLOŠKI PROFIL 1-1'
 POGLED NA SJEVERNI POKOS**
 PRIMJERU PROJEKTA OSIGURANJA
 GRADNE JAMIE KBC RIJEKA

Student: Lucija Gašparić	Kolegiji: STABILNOST KOSINA
Mentor: prof. dr. sc. Željko Arbanas	Datum: 10.9.2020.
	Mjerilo: 1:200
	List: 2