

# Analiza odrona i stabilnosti kosine napuštenog tupinoloma u Majdanu

---

Glibota, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:590723>

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

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



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



Datum: 16.09.2019	
602-04/19-13/0002	
61	
2181-208-19-0053	

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: **Ante Glibota**

BROJ INDEKSA: 605

KATEDRA: **Katedra za geotehniku**

PREDMET: **Mehanika stijena**

### ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Analiza odrona i stabilnosti kosine napuštenog tupinoloma u Majdanu

#### Opis zadatka:

Za potrebe uređenja napuštenog tupinoloma u Majdanu (grad Solin), kandidat treba izraditi prijedlog sanacije strmih padina u neposrednoj okolici. Na istočnom i jugoistočnom dijelu lokacije je umjetno stvorena padina visine i do 70 m, nastala eksploatacijom lapora. Na predmetnoj padini (klifu) su prisutni trajni procesi rastrošbe meke stijene, erozije i osipanja rastrošenog laporovitog materijala, kao i mogućeg odvajanja blokova pješčenjaka pri vrhu padine. Deblji slojevi čvrstih vapnenačkih pješčenjaka su vidljivi pri vrhu klifa, te blokovi stijene (veličine do 1 m<sup>3</sup>) predstavljaju potencijalnu opasnost od odrona. Koristeći raspoložive arhitektonske i geodetske podloge, kao i prikladne računalne programe i literaturu koja će se staviti na raspolaganje, kandidat treba izvršiti analizu globalne stabilnosti kosine i analizu potencijalne opasnosti od odrona u narednih 50 godina korištenja platoa. Na temelju rezultata iste, kandidat treba izraditi nekoliko prikladnih varijanti stabilizacije pokosa i/ili mjera zaštite od odrona i predložiti najekonomičnije rješenje. Predloženo rješenje treba zadovoljiti uvjete uporabljivosti prostora s obzirom na obuhvat arhitektonskog rješenja uređenja platoa u podnožju klifa.

U Splitu, 16. listopada 2017.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof. dr.sc. Predrag Mišćević



Predsjednik Povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:  
Doc. Dr. Sc. Ivo Andrić



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ante Glibota**

**Split, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Ante Glibota**

**Analiza odrona i stabilnosti kosine napuštenog  
tupinoloma u Majdanu**

**Diplomski rad**

**Split, 2019.**

# **Analiza odrona i stabilnosti kosine napuštenoga tupinoloma u Majdanu**

## ***Sažetak:***

U ovom radu izvršena je analiza odrona i kontrola stabilnosti kosine napuštenog tupinoloma u Majdanu. Preduvjet za korištenje tupinoloma u Majdanu kao rekreacijskog područja je stvaranje sigurnih uvjeta. S istočne strane tupinoloma strmi je zasjek visine do 50 metara sa prevjesom vapnenačkog pješčenjaka što predstavlja potencijalnu opasnost za korisnike rekreativne zone. Korištenjem matematičkih modela izvršen je proračun promjene geometrije lica kosine u vremenu. Za svaki vremenski korak napravljena je analiza odrona i kontrola stabilnosti kosine te su definirane mjere zaštite od potencijalnih odrona.

## ***Ključne riječi:***

diferencijalna erozija, rastrošba, fliš, kinematička analiza, odron, gabion

# **Rockfall analysis and slope stability control of an abandoned marlstone quarry in in Majdan**

## ***Abstract:***

In this paper an rockfall analysis and slope stability control of an abandoned quarry in flysch rock mass in Majdan was performed. A prerequisite for using quarry in Majdan as a recreational area is to ensure safe conditions. On the eastern side of the quarry is a steep slope up to 50 meters high with a large sandstone layers overhanging on the top which is a potential danger for future users of recreational area. Calculation and modeling of changes in the geometry of cuts in soft rock in time was made by using mathematical models. For each time step a two-dimensional model of the geometry of slope was made and simulations of the rockfall were performed. Based on the results of the above analysis, a measures of protection against potential odds were defined.

## ***Keywords:***

differential erosion, weathering, flysch, kinematic analysis, rockfall, gabion barrier

# S a d r Ź a j:

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Namjena rada .....	3
1.2. Struktura rada .....	3
<b>2. GEOLOŠKA I INŽENJERSKO GEOLOŠKA SVOJSTVA</b>	
<b>TERENA .....</b>	<b>4</b>
2.1. Opis lokacije i postojeće stanje .....	4
2.2. Terenska istraživanja .....	5
2.3. Geološke i inženjerskogeološke značajke lokacije .....	6
2.4. Seizmološke značajke lokacije .....	8
<b>3. PROMJENA GEOMETRIJE LICA ZASJEKA U VREMENU .....</b>	<b>10</b>
3.1. Meke stijene .....	11
3.2. Diferencijalna erozija i rastrošba zasjeka u flišnoj formaciji .....	11
3.3. Odnos rastrošbe i erozije .....	12
3.4. Fisher-Lehmannov matematički model erozije vertikalnog zasjeka .....	14
3.5. Grafički prikaz promjene geometrije lica zasjeka u vremenu .....	16
<b>4. ANALIZA ODRONA .....</b>	<b>21</b>
4.2. Odroni - definicija i faktori utjecaja .....	22
4.3. Koeficijenti restitucije podloge .....	24
4.4. Mjere zaštite od odrona .....	25
4.5. RocFall .....	25
4.5.1. Analiza vjerojatnosti .....	25
4.5.2. Slučajne varijable .....	26
4.5.3. Algoritmi .....	26

4.5.4. Algoritam kosog hica	26
4.6. Ulazni parametri za analizu odrona u RocFall-u.....	28
4.7. Rezultati RocFall-a.....	29
4.7.1. $\Delta T=0$ godina - trenutno stanje	30
4.7.2. $\Delta T=5$ godina	31
4.7.3. $\Delta T=10$ godina	32
4.7.4. $\Delta T=20$ godina	33
4.7.5. $\Delta T=50$ godina	34
4.7.6. $\Delta T=100$ godina	35
4.8. Tablični i dijagramski prikaz rezultata RocFall-a.....	37
4.9. Odabir zaštitne barijere .....	41
<b>5. ANALIZA GLOBALNE STABILNOSTI KOSINE.....</b>	<b>45</b>
5.1. Općenito .....	45
5.2. Proračunski pristup.....	47
5.3. Definiranje parametara čvrstoće osnovne stijenske mase GS1 .....	47
5.4. Definiranje parametara talusa GS2 .....	50
5.5. Projektna opterećenja .....	51
5.6. Rezultati analize globalne sigurnosti zasjeka.....	51
5.6.1. $\Delta T=0$ godina	52
5.6.2. $\Delta T=5$ godina	53
5.6.3. $\Delta T=10$ godina	54
5.6.4. $\Delta T=20$ godina	55
5.6.5. $\Delta T=50$ godina	56
5.6.5. $\Delta T=100$ godina	57
5.7. Diskusija.....	58

<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>59</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>60</b>
<b>8. PRILOZI .....</b>	<b>66</b>
7.1. Učinak barijere za $\Delta T=0$ godina – trenutno stanje.....	66
7.2. Učinak barijere za $\Delta T=5$ godina .....	68
7.3. Učinak barijere za $\Delta T=10$ godina .....	70
7.4. Učinak barijere za $\Delta T=20$ godina .....	72
7.5. Učinak barijere za $\Delta T=50$ godina .....	74
7.5. Podaci o analizi odrona u RocFall-u .....	76
7.6. Građevinska situacija – tupinolom Majdan.....	80



## 1. UVOD

Razvoj industrije u drugoj polovici 19. stoljeća snažno je utjecao na gospodarsku sliku srednjedalmatinskog priobalnog pojasa što dovodi do transformacije iz dotadašnjeg agrikulturnog u industrijski kraj.

Otkriće bogatih ležišta kvalitetnog lapora u Splitu i okolici pokrenulo je razvoj cementne industrije. Veliko povećanje proizvodnje cementa, a time i otvaranje brojnih pogona na prijelazu iz 19.-og u 20.-o stoljeće posljedica je primjene armiranog betona u graditeljstvu. Otvarane su redom tvornice cementa u Dujmovači, Sv. Kaji, Majdanu i ostalim naseljima uže i šire okolice Splita [1]. Višestruka važnost za razvoj očituje se gradnjom prometne infrastrukture, cesta, željezničkih pruga, luka i pristana, izgradnjom vodovoda i elektrifikacijom naselja.

Eksploatacija lapora za izvoz i proizvodnju cementa trajno je i nepovratno promjenila vizuru šire splitske okolice (Slika 1.).

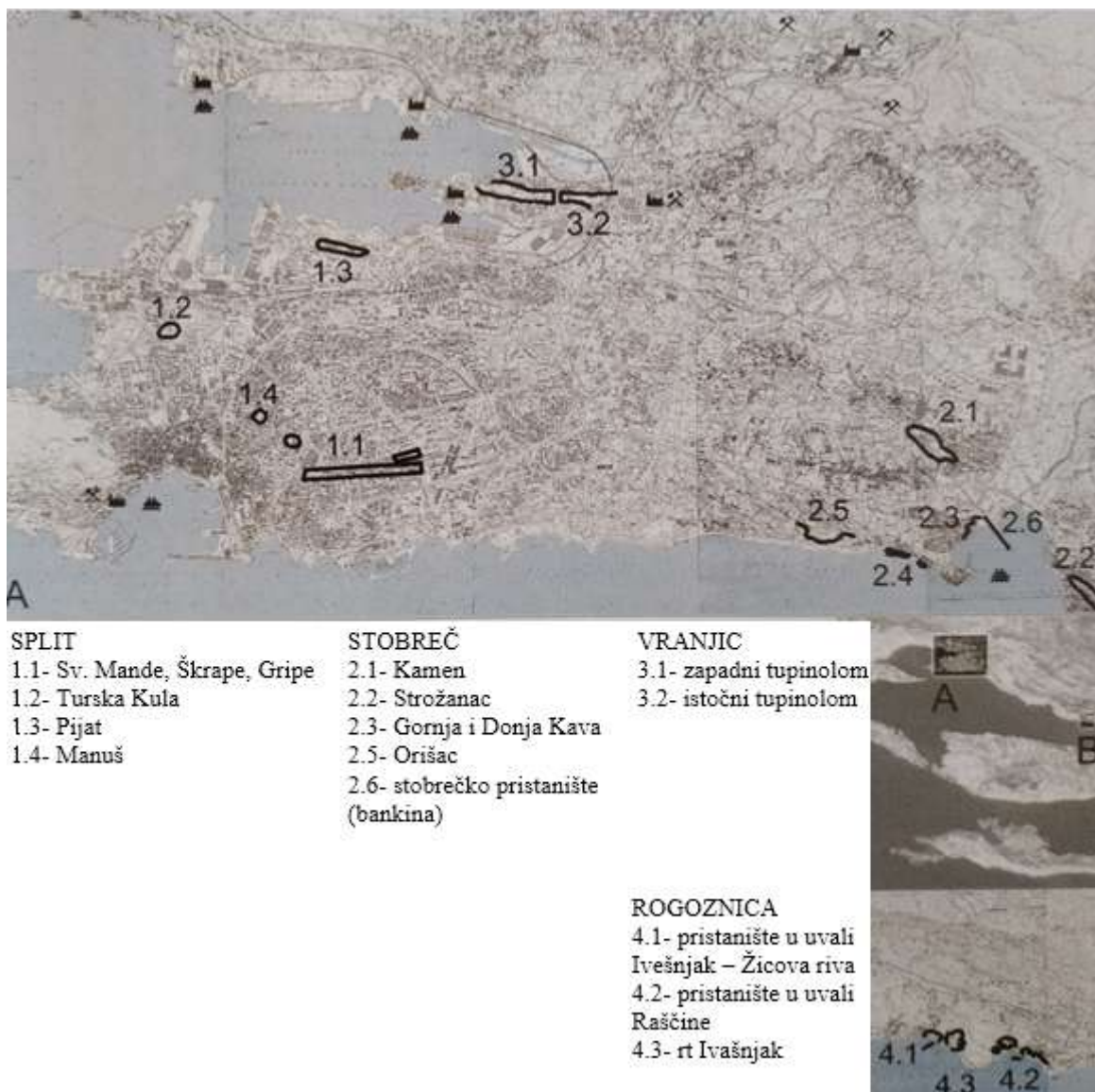


Slika 1. Pogled prema južnim padinama Kozjaka [2]

Izgradnjom stambenih i infrastrukturnih objekata nestali su i obrisi pojedinih tupinoloma, posebice onih u urbaniziranim dijelovima naselja (Slika 2.). Međutim veliki je broj tupinoloma čije obrise iskopa i danas lako uočavamo u prostoru iako su se prirodnim putem, širenjem i rastom raslinja reintegrirali u okolinu.

Preostale lokacije tupinoloma, koje nisu integrirane u gradsko tkivo, su uglavnom na „nezgodnijim“ pozicijama, bilo da je riječ o nagibu padina, visini zasjecanja ili nepovoljnijim geološkim postavkama. Uz navedeno, zbog visoke urbanizacije splitskog metropolitanskog

područja, da bi se zadovoljila forma definiranja određenog broja lokacija primarno za javni interes, takve lokacije su predviđene za javne društvene, ponajprije rekreacijske svrhe



Slika 2. Karta položaja splitskih, vranjičkih, stobrečkih i rogozničkih tupinoloma [1]

Dugi niz godina te preostale lokacije ostale su ne privedene svrsi, zapuštene i prepuštene prirodnim procesima. Tek po ulasku hrvatske u Europsku uniju, s određenim vremenskim odmakom i u Dalmaciji, počelo se rasmišljati i prepoznavati potencijal takvih prostora, odnosno ukazala se mogućnost kontroliranog EU financiranja namjenski rezerviranog za reintegriranje istih u javnu upotrebu kao rekreacijske ili izletničke zone.

Jedan od prvih slučajeva tog tipa jest napušteni tupinolom u Maydanu, koji je nakon vrlo uspješne studentske arhitektonske radionice *Mayday! Majdan! Mayday!* [3] u konačnici pravljen za financiranje putem EU fondova za izgradnju i uređenje edukativno-taktilnu odnosno sportsko-rekreativnu zonu.

## 1.1. Namjena rada

U svrhu uređenja napuštenog tupinoloma u Majdanu, čiji se prostor želi prenamjeniti u edukativno-taktilnu odnosno sportsko-rekreativnu zonu, potrebno je izvršiti analizu potencijalne opasnosti od odrona i analizu globalne stabilnosti kosine u narednih 50 godina korištenja platoa. Kako bi se predmetna lokacija ispod same kosine mogla koristiti u predviđene svrhe potrebno je osiguranje sigurnih uvjeta sanacijom potencijalno nestabilnih blokova stijene pri vrhu padine i postavljanjem određenog tipa barijere u dnu kosine kao sigurnosne ograde za zaštitu od potencijalnog odrona.

Na temelju rezultata analiza odrona i globalne stabilnosti kosine potrebno je dati prijedlog zaštite od potencijalnog odrona i sanacije strmih padina na istočnom i jugoistočnom dijelu lokacije.

## 1.2. Struktura rada

Rad je podijeljen u 7 dijelova.

U uvodnom dijelu je objašnjen generalni kontekst iz kojeg proizlazi današnje stanje prostora u široj okolici grada Splita, s aspekta kreiranja napuštenih zona u kojima se uočavaju geotehnički zadaci koji su predmet ovog rada kao i sama namjena rada.

U drugom dijelu rada opisana je predmetna lokacija, geološki uvjeti te inženjersko-geotehničke karakteristike lokacije i predmetnog zasjeka.

U trećem poglavlju opisana je karakteristična stijenska masa koja sačinjava zasjek. Prikazana je teorijska podloga potrebna za prognozu promjene geometrije lica zasjeka te je izvršen proračun i prikazani su rezultati.

U četvrtom poglavlju razrađena je analiza problema i opisane definirane mjere zaštite. Opisane su metode proračuna i korišteni računalni program te su prikazani rezultati analize odrona.

U petom poglavlju izvršena je kontrola globalne stabilnosti zasjeka.

Šesto poglavlje je diskusija i zaključak, sedmo poglavlje literatura te na kraju računalni prilozi.

## 2. GEOLOŠKA I INŽENJERSKO GEOLOŠKA SVOJSTVA TERENA

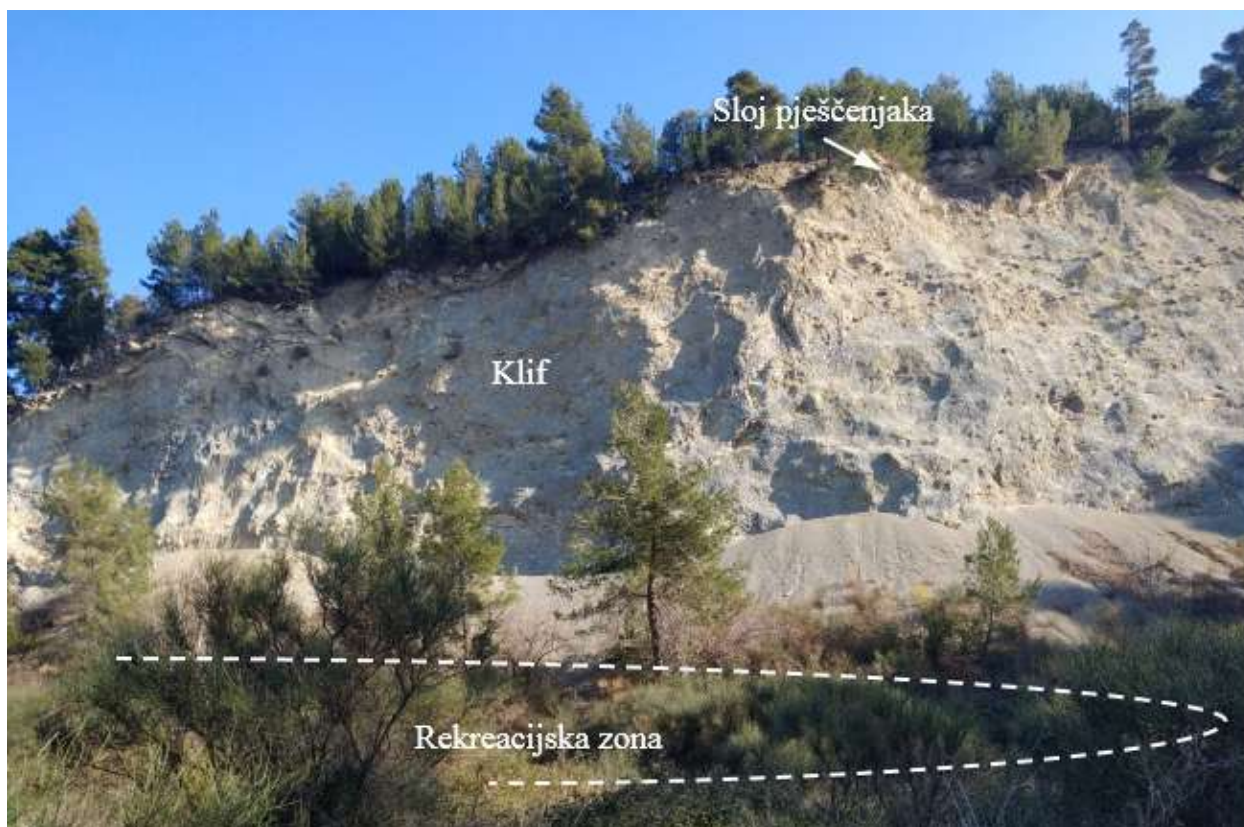
### 2.1. Opis lokacije i postojeće stanje

Napušteni tupinolom „Majdan“ nastao je eksploatacijom lapora za potrebe tvornice cementa „10. kolovoz“ u Majdanu, a nalazi se unutar administrativnih granica Grada Solina na k.č. br. 1241/17 i 1241/18, k.o. Mravince (Slika 3.). U samoj blizini tupinoloma nalazi se izvor rijeke Jadro kao i infrastrukturni pogon i postrojenja tvrtke „Vodovod i kanalizacija“. Tupinolom je omeđen sa sjeverozapadne strane trasom Dioklecijanovog vodovoda dok je s istočne i jugoistočne strane padina nastala eksploatacijom lapora uz koju prolazi brza cesta Solin-Klis. Pristup lokaciji je sa sjeverozapadne strane kroz lukove Dioklecijanovog akvadukta.



Slika 3. Napušteni tupinolom Majdan [4]

Površina katastarskih čestica ubuhvaćenih zahvatom je 54 011 m<sup>2</sup> od čega je površina ravnog terena oko 17 080 m<sup>2</sup>, a površina klifa s šumom oko 36 930 m<sup>2</sup>. Najveća visinska razlika između ravnog dijela i vrha klifa je oko 70 m., a gornje plohe Dioklecijanovog akvedukta i ravnog dijela oko 4 m. Kao što je opisano ravni dio lokacije je nadvišen i omeđen za svih strana i na taj način zaštićen od nepovoljnog utjecaja vjetra (Slika 4.).



Slika 4. Pogled na istočno lice zaszeka

Središnji dio obuhvatnog područja je uglavnom ravninski dio visinske razlike 1 do 2 m. Nastao je deponiranjem građevinskog otpada, otpada iz okolnih iskopa te degradiranog materijala flišnog podrijetla. Očekivana debljina slojeva nasutog materijala je 6 do 7 m.

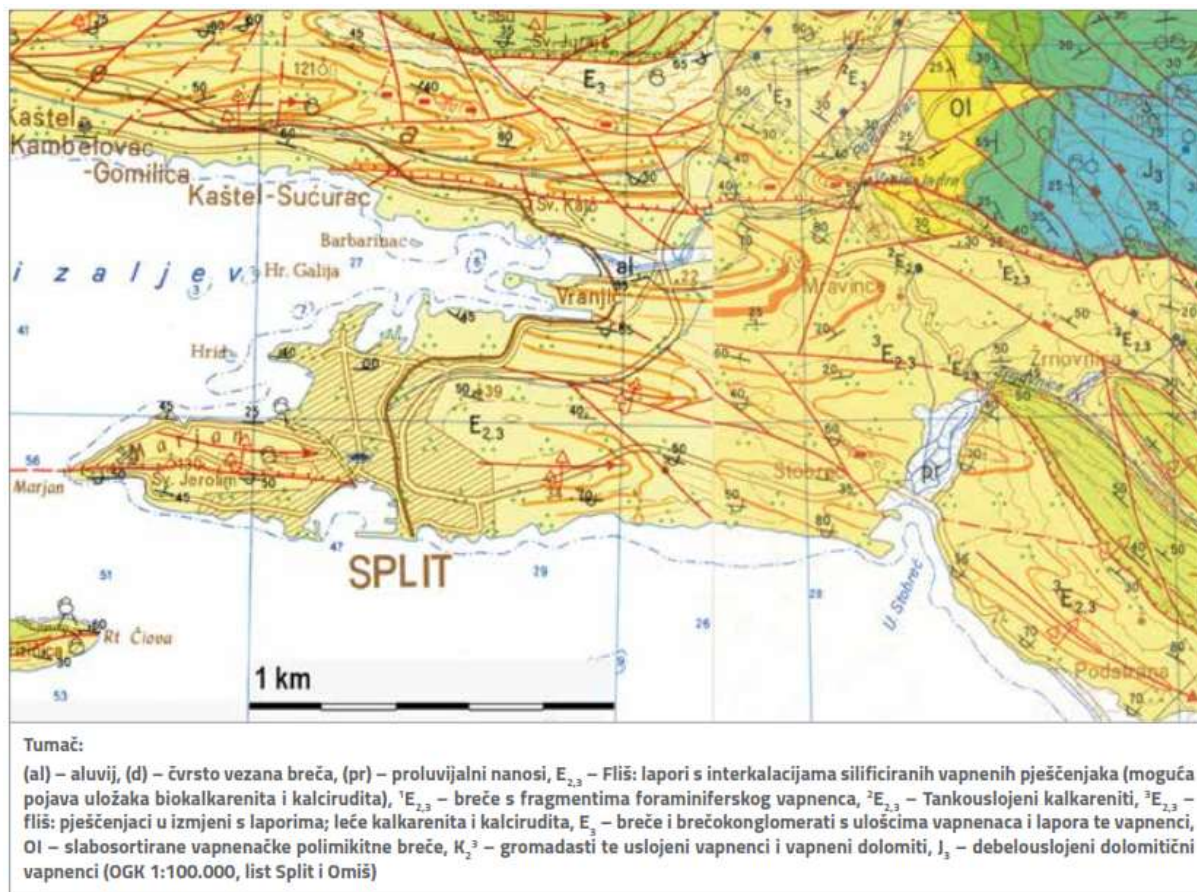
## 2.2. Terenska istraživanja

Terenski istražni radovi izvršeni su sa ciljem utvrđivanja sastava temeljnog tla, svojstava slojeva i određivanje drugih parametara potrebnih za ispravnu provedbu radova na sanaciji klifa s istočne strane. Izvedene su dvije istražne jame na središnjem ravnom dijelu lokacije, dubine 3 m i 1,9 m, sa svrhom utvrđivanja sastava tla. U okviru istražnih radova od strane Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu izvršen je pregled lokacije s utvrđivanjem geoloških elemenata te određivanje vrste materijala i slojeva u jamama. [5]

Na temelju geodetskih snimki terena i saznanja dobivenih na terenu formirani su profili terena - presjeci kroz istočnu i jugoistočnu padinu. U profilima je prikazan položaj naslaga s utvrđenim i pretpostavljenim litološkim granicama, te su poslužili kao osnova za daljnje geotehničke proračune i analize.

### 2.3. Geološke i inženjerskeološke značajke lokacije

Predmetna lokacija nalazi se u Majdanu pokraj Solina. Prema Osnovnoj geološkoj karti i tumaču (Slika 5.), te inženjerskeološkom istraživanju šire okolice, stijenu podloge grade flišne naslage srednjeg do gornjeg eocena ( $E_{2,3}$ ).



Slika 5. Osnovna geološka karta za šire područje grada Splita [6]

Eocenski fliš je heterogena stijenska masa nastala taloženjem tankoslojnih sedimenata od krupnozrnatih i sitnozrnatih stijena različita sastava i veličine zrna. Fliš sačinjavaju meki lapori smeđe, smeđesive i maslinastosive boje, čvrsti vapnenački lapori sive boje sa slojevima glinovitog lapora, laporovitog praha i vapnenačkih pješčenjaka.

Prema genetskoj inženjerskeološkoj klasifikaciji lapori do vapnenački lapori su klasificirani kao slabe do dobro očvrste klastične finozrnate anizotropne stijene. Vapnenački pješčenjaci klasificiraju se kao čvrste dobro očvrste srednje do krupnozrnate stijene s izraženom anizotropijom tako da su otporniji na dezintegracijske i erozijske procese. Zbog otpornosti na navedene procese, lako su uočljivi jer uglavnom konzolno strše u odnosu na laporoviti dio stijene [7, 8].

Ravninski dio lokacije, osim nasutog materijala, čini i degradirani materijal flišnog podrijetla, laporovita glina i komadi vapnovitog lapora. Trajnim procesom rastrošbe litoloških članova (lapora, glinovitih i vapnenačkih lapora) osnovne meke stijene dolazi do osipanja laporovitog materijala i formiranja sipara, kao i odvajanja blokava iz debljih slojeva vapnenačkih pješčenjaka (slika 6.). Slojevi degradiranog i rastrošenog fliša lošijih su fizičko-mehaničkih karakteristika od eocenskog fliša E<sub>2,3</sub> koji izrađuje osnovnu stijensku masu.



Slika 6. Odronjeni blokovi vapnenačkog pješčenjaka

Heterogenost fliša očituje se u brzim izmjenama (stratificiranosti) litotipova različitih fizičko-kemijskih svojstava u vertikalnom i lateralnom smjeru (slika 7.). Iako su u primarnom stanju naslage fliša horizontalne, tektonski pokreti u Zemljinoj kori boraju ih i ukošavaju [9].

Na predmetnoj padini slojevi su generalno nagnuti prema sjeveru/sjeveroistoku pod promjenjivim kutovima od 30-40° do 70-80°, a smjer pružanja slojeva je dinarski smjer pružanja sjeverozapad-jugoistok.

U hidrogeološkom smislu naslage fliša, kao cjelina, su slabopropusne do relativno vodonepropusne sredine. Međutim zbog stratificiranosti litoloških članova u vertikalnom i bočnom smjeru, različita je i propusnost pojedinih članova unutar flišne formacije. Procijeđivanje kroz naslage uglavnom se odvija nezapunjenim pukotinama i na kontaktima slabije propusnih

slojeva matične stijene i propusnih slojeva nasipa i degradiranog fliša, za vrijeme i nakon intenzivnijih oborina.

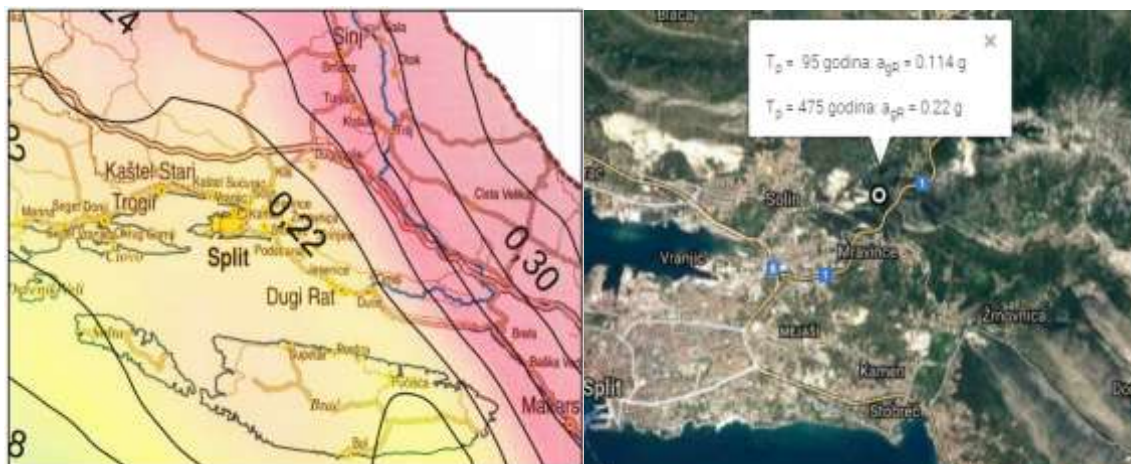


Slika 7. Karakteristike stijenske mase na istočnom zasjeku; heterogene flišne naslage sa slojevima čvrstih vapnenačkih pješčenjaka pri vrhu padine

#### 2.4. Seizmološke značajke lokacije

Podaci o seizmičnosti područja predmetne lokacije nalaze se u „Seizmološkoj karti Republike Hrvatske“ izrađenoj od Geofizičkog zavoda Zagreb. Prema Seizmološkoj karti (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Državna geodetska uprava - Republika Hrvatska - karta potresnih područja) predmetna lokacija nalazi se u području za koje se predviđa maksimalna akceleracija tla u iznosu  $a_{\max}=0,22g$ . (Slika 8.)



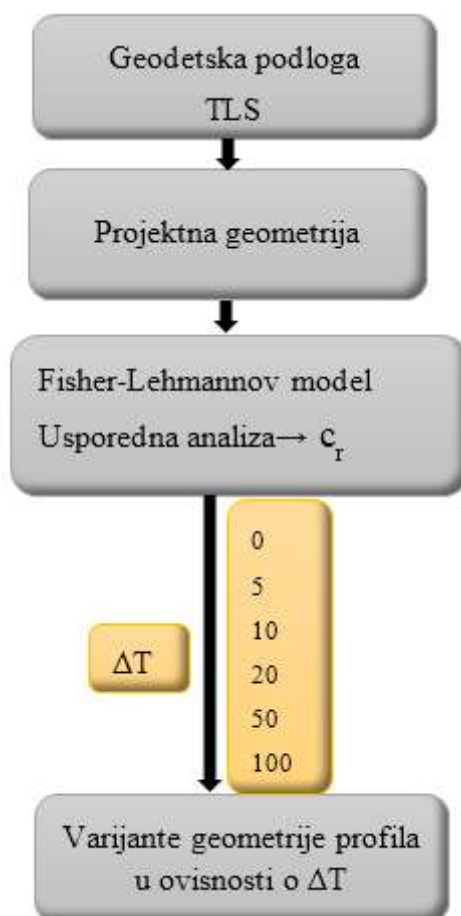


Slika 8. Karta potresnih područja okoline Splita za povratni period od 475 godina

Prema Eurocodu temeljno tlo može se svrstati u razred „A“ (HRN EN 1998-1-1:2012) koji je definiran kao; stijena ili druga geološka formacija, uključujući i najviše 5 m najslabijeg materijala na površini, sa brzinom širenja poprečnih valova  $V_{s,30} \geq 800$  m/s.

### 3. PROMJENA GEOMETRIJE LICA ZASJEKA U VREMENU

Ono što je karakteristično za zasjeka u flišnim naslagama je promjena geometrije lica u vremenu. Posljedica je to procesa rastrošbe i erozije mekih flišnih naslaga. Proces analize i proračuna promjene geometrije lica zasjeka prikazan je na slici 9.. Na osnovu geodetske podloge i terestičkih laserskih snimaka određena je projektna geometrija lica zasjeka. Korištenjem Fisher-Lehmannovog matematičkog modela [10, 11] i na osnovu usporedne analize promjene zasjeka na pilot lokaciji „Žnjan 1“ [12] izrađene su varijante geometrije lica za svaki vremenski korak ( $\Delta T$ ).



Slika 9. Dijagram toka procesa izračuna promjene geometrije lica zasjeka

### 3.1. Meke stijene

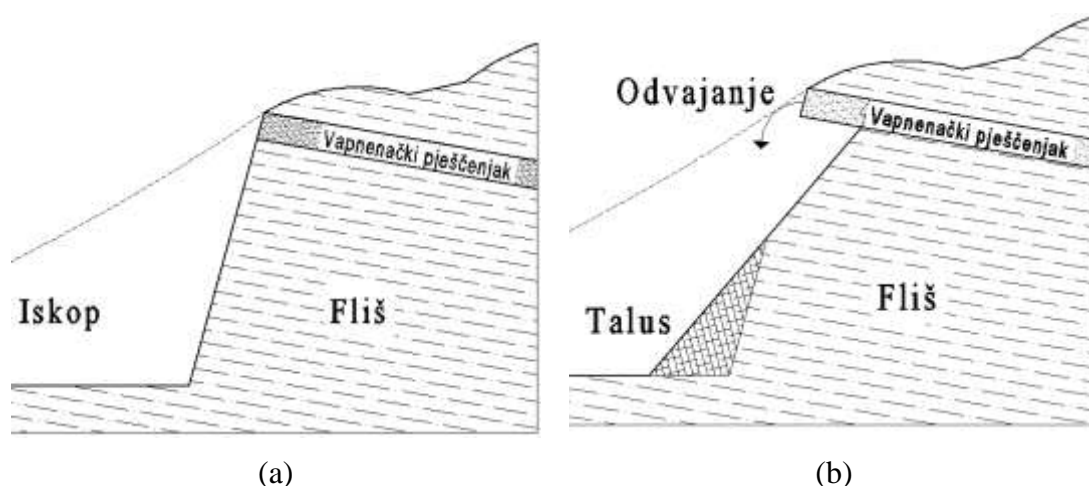
Prema ISSMFE (1985.) meke stijene su oni materijali čija se jednoosna tlačna čvrstoća, određena na uzorku monolita, kreće u rasponu od 0.5 do 25 MPa. Granice navedenog raspona određene su prema vrijednostima čvrstoće materijala korištenih u građevinskoj praksi i vrijednostima materijala proučavanih u mehanici tla. Naziv koji se koristi u literaturi za predmetne materijal "tvrda tla-meke stijene" ukazuje da se meke stijene tretiraju kao rubna grupa geotehničkih materijala čija se svojstva žele ekstrapolirati iz dobro poznatih područja mehanike tla i mehanike stijena, iako je praksa pokazala da su meke stijene samo središnji dio jedinstvene geotehničke skale. [13]

Meke stijene određujemo kao materijale koje u pravilu obilježavaju slabe veze među česticama. Primjere mekih stijene nalazimo u cijelom svijetu. To su siltiti, šejlovi, lapori, tufovi, glinci, laporovite prekonsolidirane gline, zelene stijene, kalkareniti, itd [7]. Pod djelovanjem vanjskih utjecaja slabe veze između čestica lako "pucaju" tako da je podložnost rastrošbi pod vanjskim utjecajem najznačajnije svojstvo mekih stijena.

### 3.2. Diferencijalna erozija i rastrošba zasjeka u flišnoj formaciji

Eocenski fliš u središnjoj Dalmaciji tipičan su primjer heterogene stijenske mase sa slojevima različitih mehaničkih karakteristika [9, 14]. Iako su slojevi flišne formacije nastali sedimentacijom izvorno bili horizontalni, zbog podatnosti tektonskom oblikovanju često se nalaze savijeni i nagnuti pod različitim kutom od 0 do 90 stupnjeva.

Proces rastrošbe i erozije zasjeka homogenih stijenskih masa relativno je predvidljiv i može se opisati matematičkim modelima [15]. Kod heterogenih stijenskih masa proces rastrošbe i erozije zasjeka puno je složeniji, a ponekad i nepredvidljiv. Komponente flišne formacije otpornije na rastrošbu, u ovisnosti o smjeru i nagibu ukliještenog sloja, obično ostaju duže vrijeme na licu zasjeka prevješeni poput konzole. Kad konzola postane dovoljno dugačka, moment savijanja razdvaja blokove. Dolazi do odrona što predstavlja opasnost za prostor ispod pokosa (Slika 10.).



Slika 10. a) Geološki profil Eocenskog fliša sa čvrstim vapnenačkim slojem; b) Razvoj diferencijalne rastrošbe i odvajanje bloka rotacijom [15].

Erodირani flišni materijal kojeg sačinjavaju fragmenti manje otpornih slojeva flišne formacije, nakuplja se u dnu zasjeka stvarajući talus. S obzirom na specifičan geološki profil i relativno brze promjene geometrije lica talus ima značajan utjecaj na trajektorije blokova prilikom odrona. Nagib sipara te svojstvo apsorpcije energije pri udaru bloka o površinu utječu na duljinu puta odronjenog bloka, a time i na korisnu površinu u podnožju zasjeka.

### 3.3. Odnos rastrošbe i erozije

S obzirom da se često pojmovno mješaju, razliku između rastrošbe i erozije najjednostavnije je opisati na način: rastrošba je proces raspadanje stijene, a erozija proces odnošenja usitnjenih komada stijene, s mjesta nastajanja na mjesto gdje se nakupljaju [15].

Rastrošba (trošenje, razgradnja, dezintegracija) je proces koji podrazumijeva promjenu fizikalno mehaničkih svojstava stijene kao posljedicu zajedničkog djelovanja više različitih procesa: sušenja i vlaženja, bubrenja, ljuštenja, hidratacije, smrzavanja i odmrzavanja, grijanja i hlađenja, raspucavanja i mrvljenja.

Kao mjeru podložnosti stijene oslabljanju/raspadanju za vrijeme uporabe objekta, Franklin&Dusseault uvode pojam “*weatherability*” (trošnost) [15]. Ono što je bitno razlikovati pri korištenju ovih pojmova je vremensko trajanje:

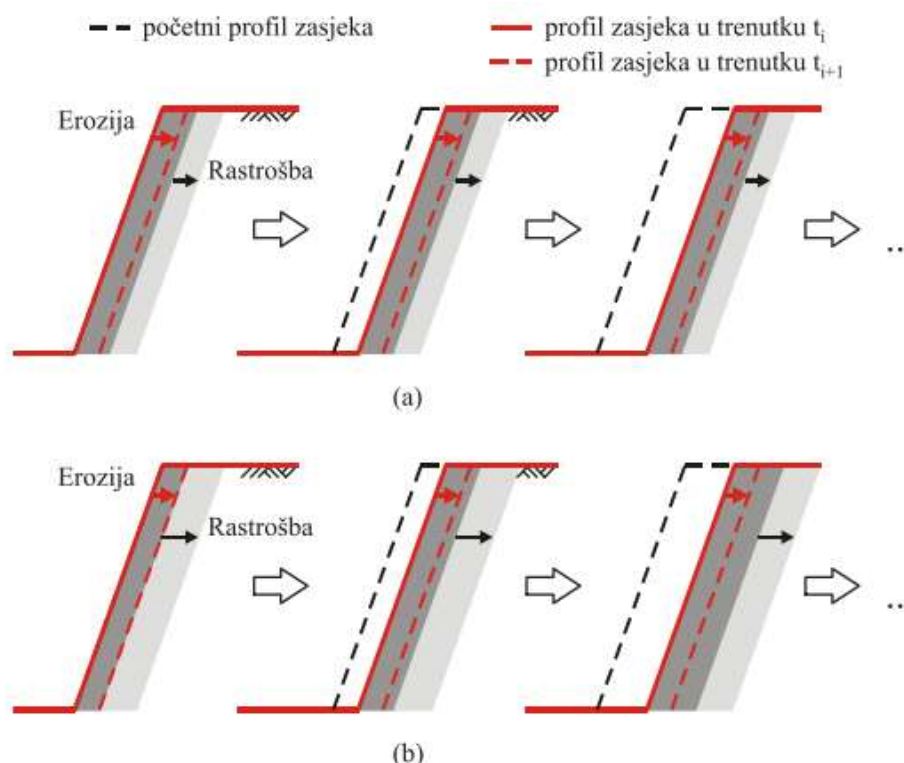
- „inženjerska vremenska skala“ (red veličine nekoliko godina do više desetaka godina)
- „geološka vremenska skala“ (red veličine geoloških razdoblja)

S obzirom da se proces rastrošbe kod mekih stijena odvija u kratkom vremenskom razdoblju, odnosno za vrijeme korištenja građevine može se govoriti o trajnosti materijala unutar „inženjerske vremenske skale“ [7].

Na području Dalmacije, dominantan ali ne i jedini, proces koji uzrokuje degradaciju lapora je ponavljani proces sušenja i vlaženja. Razaranje veza u laporu očituje se raspucavanjem i/ili ljuštenjem stijene u manje komade. U pravilu se odvijaju istovremeno mada je raspucavanje svojstvenije za lapore s više kalcita, a ljuštenje za lapore s više minerala gline. Rasterećenje odnosno oslobađanje naprezanja inducirano uklanjanjem materijala pri iskopu također dovodi do razvoja novih listričnih pukotina. [16, 17]

Sagledavajući djelovanje procesa rastrošbe i erozije na zasjeka u stijenskoj masi te uspoređujući njihov intenzitet, razlikujemo tri osnovna odnosa ovih procesa (Slika 11.):

- Neravnoteža odnosa u korist erozije
- Ravnoteža između erozije i rastrošbe
- Neravnoteža u korist rastrošbe



Slika 11. Vremenski tok promjene profila zasjeka za slučaj: a) ravnoteža erozije i rastrošbe; b) neravnoteže u korist rastrošbe (svjetlo sivo-rastrošeni materijal, tamno sivo-ostatak iz prethodnog intervala) [18]

S obzirom na vrstu materijala i klimatološke značajke Dalmacije, time i predmetnog lokaliteta, za pretpostaviti je da odnos ovih procesa varira u rasponu od ravnoteže erozije i

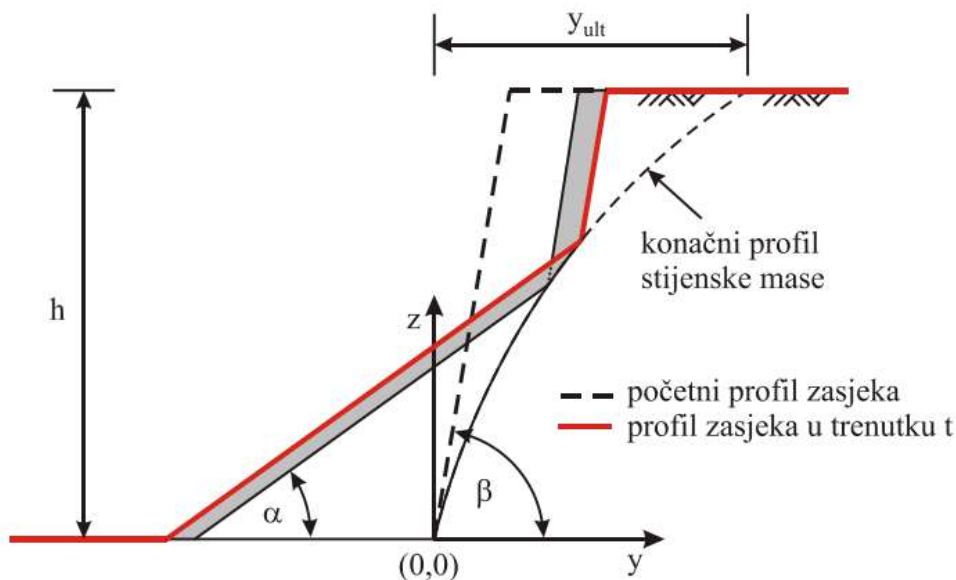
rastrošbe do neravnoteže u korist rastrošbe. Dakle erozija se u pravilu uvijek odvija na već rastrošenom materijalu.

### 3.4. Fisher-Lehmannov matematički model erozije vertikalnog zasjeka

Pretpostavke Fisher-Lehmannovog modela su[19]:

- Kosina je homogena, pokos je ravan, nagiba  $\beta$  koji je dovoljno strm da omogućava transport rastrošenog materijala.
- Teren u podnožju i iza pokosa je vodoravan i proteže se dovoljno daleko.
- U svakom vremenskom koraku rastrošba lica zasjeka se odvija ravnomjerno
- Veći odroni i odvajanja stijenske mase po diskontinuitetima nisu razmotrena.
- Rastošeni materijal nakuplja se u podnožju u obliku talusa konstantnog nagiba  $\alpha$  ( $\alpha < \beta$ )
- Ispod akumuliranog talusa stijena je zaštićena od daljnje rastrošbe dok se istovremeno slobodno lice zasjeka nastavlja degradirati i erodirati. [15]

Uočljivo je da se oblikuje konveksna granica između akumuliranog sipara i intaktne stijene. U konačnici bi se zasjek nagiba  $\beta$  preoblikovao u kosinu nagiba  $\alpha$  koja tangira konveksnu jezgru intaktne stijene kao što je prikazano na slici 12.



Slika 12. Fisher-Lehmannov matematički model erozije vertikalnog zasjeka[12]

S obzirom na navedene pretpostavke, izraz za određivanje konveksne jezgre intaktne stijene poprima oblik:

$$y = k \cdot (l \cdot m) \cdot \ln \left[ \frac{m}{(m - z)} \right] - k \cdot z \quad (1)$$

gdje je:  $m = h/c$  ;  $k = (a - ac - b)/c$  ;  $l = b \cdot h/(a - ac - b)$  :  $a = ctg\alpha$  ;  $b = ctg\beta$  ;  $h$ -visina zasjeka,  $\alpha$  - nagib stabilnog pokosa sipara i  $\beta$  – početni nagib zasjeka. Parametar  $c$  je konstanta potrebna za egzaktnu derivaciju, a koja u osnovi predstavlja mjeru rastresitosti rastrošenog materijala:

$$\frac{\text{zapremina stijene}}{\text{zapremina sipara}} = \frac{1 - c}{c} \quad (2)$$

Intrigantni podaci pri projektiranju su trajanje procesa rastrošbe do ostvarenja konačnog oblika zasjeka i promjene geometrije lica pokosa, odnosno konačni položaj vrha pokosa i nožice sipara. Konačni položaj vrha pokosa može se odrediti uvrštavanjem  $z=h$  u izraz (2) koji time poprima oblik:

$$y_{ult} = (ctg\alpha - ctg\beta) \cdot (1 - c) \cdot \frac{h}{c} \cdot \left[ \frac{1}{c} \cdot \ln(1 - c)^{-1} - 1 \right] + h \cdot ctg\beta \quad (3)$$

Pomak nožice sipara može se odrediti pomoću izraza:

$$y_s = h \cdot ctg\alpha - y_{ult} \quad (4)$$

Promjena geometrije lica zasjeka u vremenu može se opisati sljedećom funkcijom:

$$y(t) = \begin{cases} h \cdot ctg\beta & \text{za } t = 0 \\ h \cdot ctg\beta + R_{y,s} & \text{ako je } 0 < t < (y_{ult} - h \cdot ctg\beta)/R_{y,s} \\ y_{ult} & \text{ako je } t \geq t_{ult} = (y_{ult} - h \cdot ctg\beta)/R_{y,s} \end{cases} \quad (5)$$

Gdje je  $R_{y,s}$  prosječna godišnja erozija.

Parametri lica zasjeka korišteni u proračunu prikazani su u tablici 1.. Kutevi lica zasjeka i visina zasjeka određeni su upotrebom rezultata TLS-a na predmetnoj lokaciji.

Tablica 1. Parametri geometrije lica zasjeka

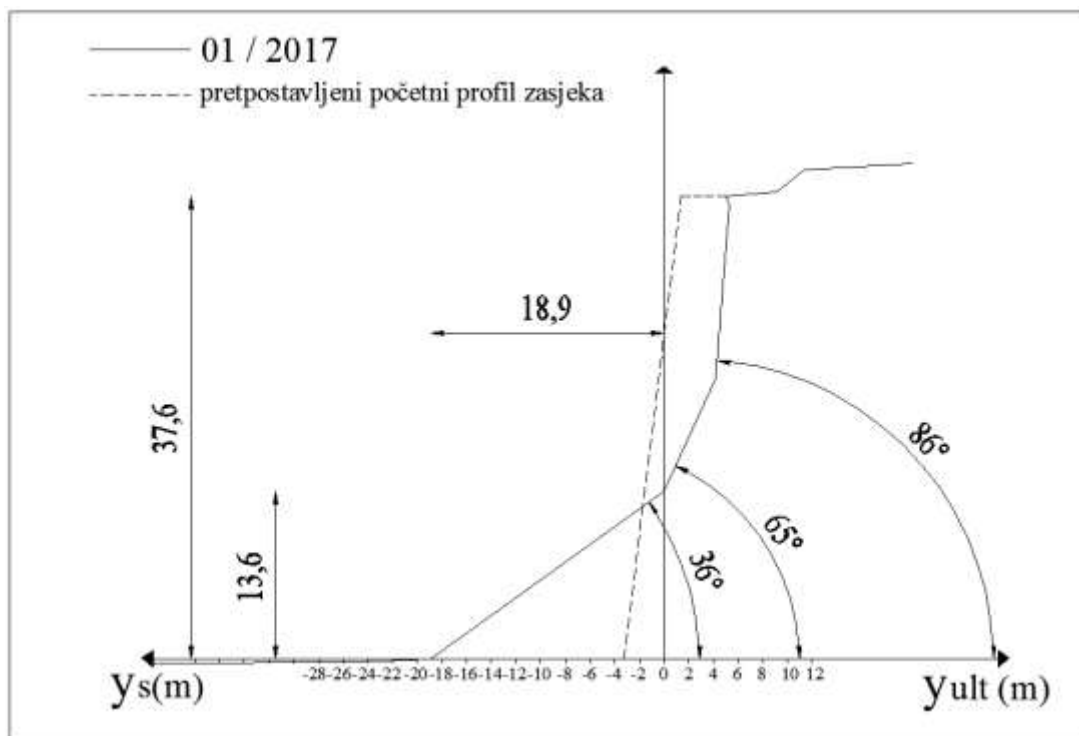
Parametar	Simbol	Iznos	Mjerna jedinica
Nagib sipara	$\alpha$	36	( $^{\circ}$ )
Nagib pokosa 1	$\beta$	86	( $^{\circ}$ )
Nagib pokosa 2	$\beta$	65	( $^{\circ}$ )
Visina zasjeka	h	37,6	( m )
1 - (zapremina stijene/ zapremina sipara)	c	0,4	bezdimenzionalan
Prosječna godišnja erozija	$R_{y,s}$	5	( cm/god )

Može se primjetiti da, osim početne geometrije zasjeka, utjecaj na oblikovanje konačne geometrije zasjeka ima i parametar rastresitosti rastrošenog materijala za čije određivanje je provedeno terensko opažanje. Terenskim opažanjem i upotrebom rezultata terestičkog laserskog skenera na reprezentativnom zasjeku zabilježene su prosječne godišnje erozije od 5 cm/god za zasjeka na kopnu, te do 10 cm/god za obalne klifove. Jednostavnim proračunom za prosječnu godišnju eroziju određena je i vrijednost parametra  $c=0,4$  [15].

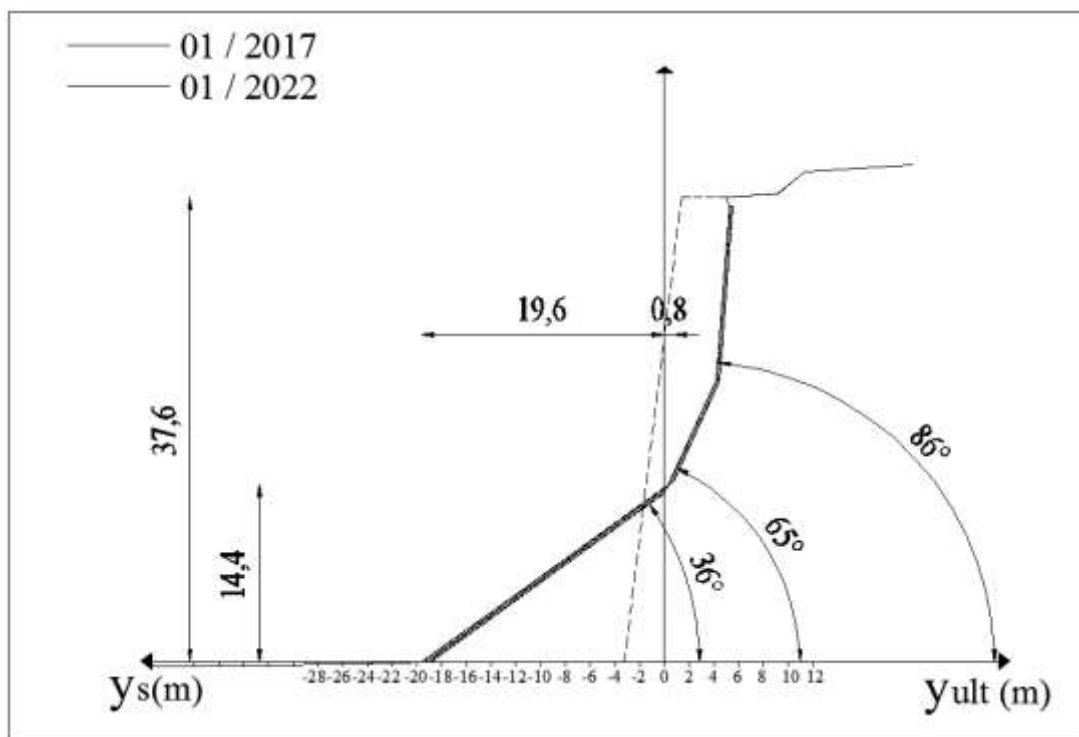
### 3.5. Grafički prikaz promjene geometrije lica zasjeka u vremenu

Na slikama 13., 14, 15, 16., 17., 18. i 19. prikazana je prognoza promjene geometrije zasjeka, temeljem Fisher-Lehmannov matematičkog modela erozije vertikalnog zasjeka te parametara geometrije lica iz tablice 1., za periode od  $\Delta T=5$ god.,  $\Delta T=10$ god.,  $\Delta T=20$ god.,  $\Delta T=50$ god.,  $\Delta T=100$ god., u odnosu na stanje zabilježeno 2017. godine.

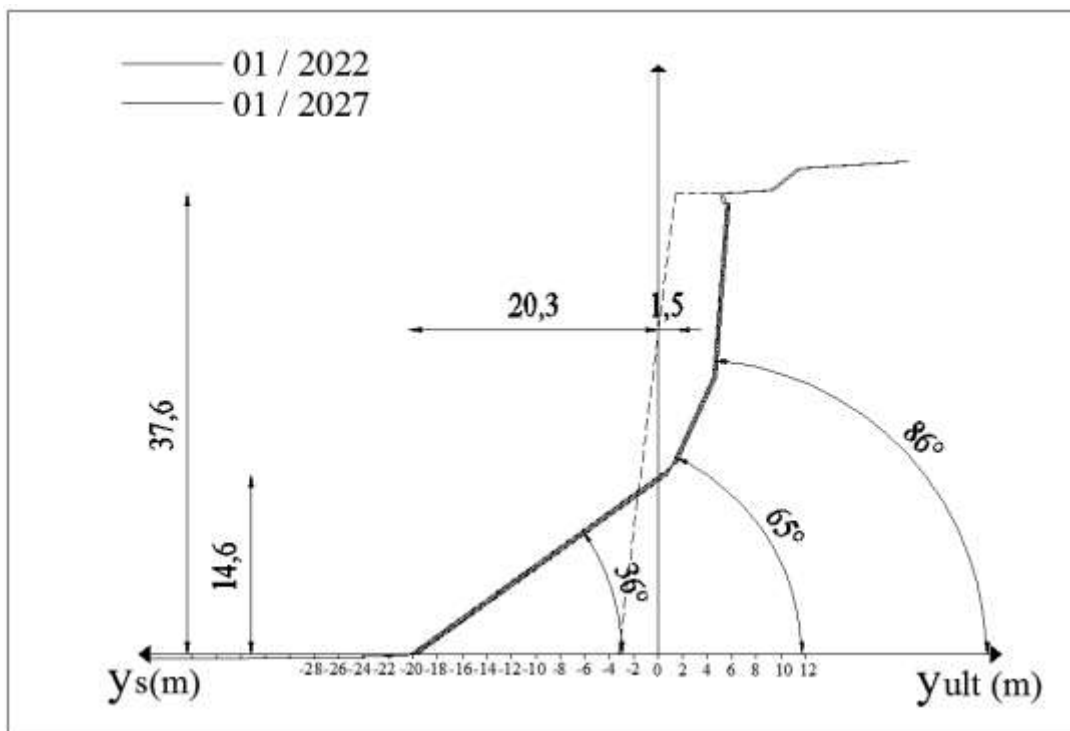




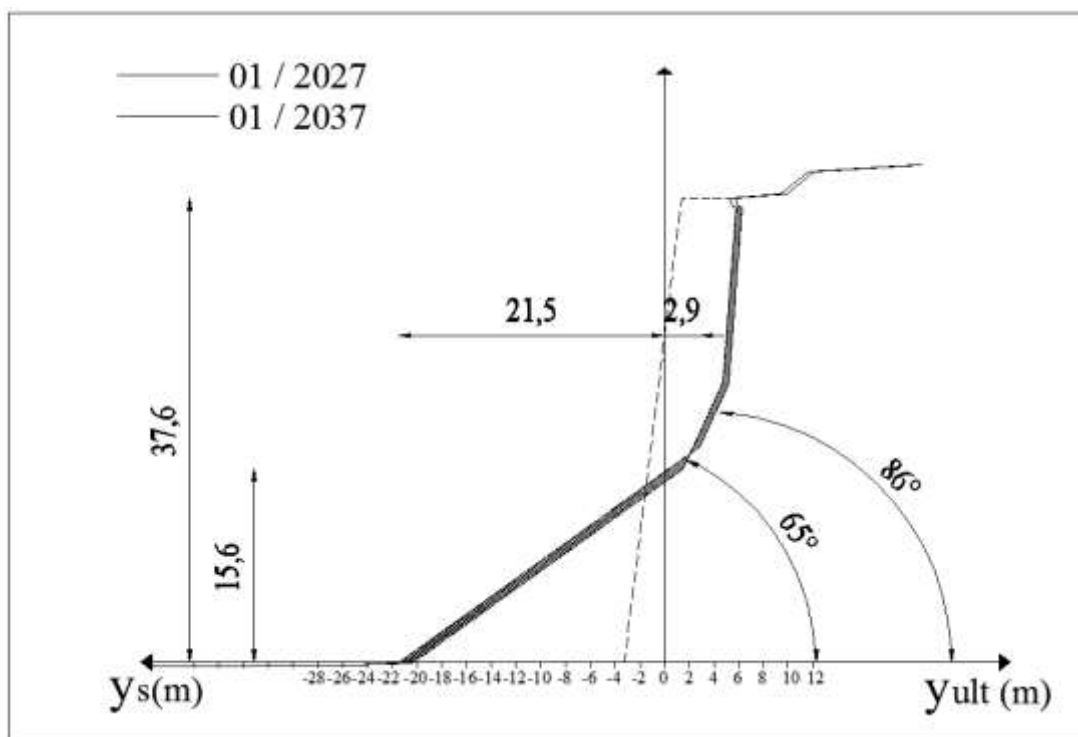
Slika 13. Trenutno lice zasjeka,  $\Delta T=0$  god.



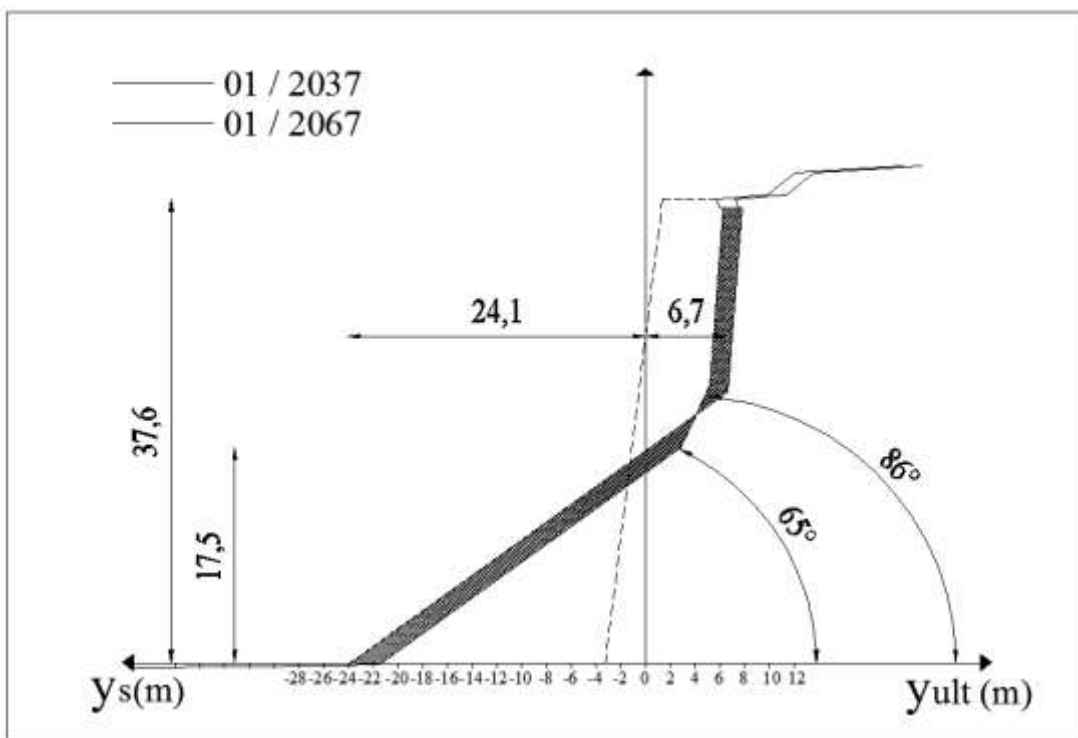
Slika 14. Lice zasjeka za  $\Delta T=5$  god.



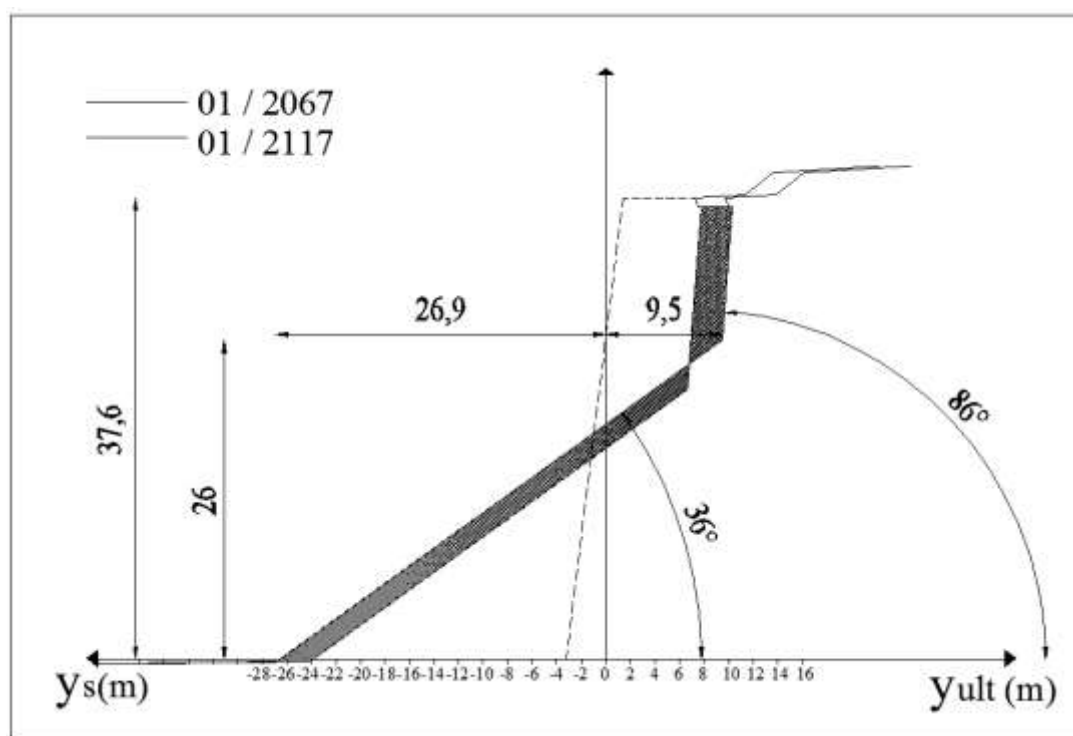
Slika 15. Lice zasjeka za  $\Delta T=10$  god.



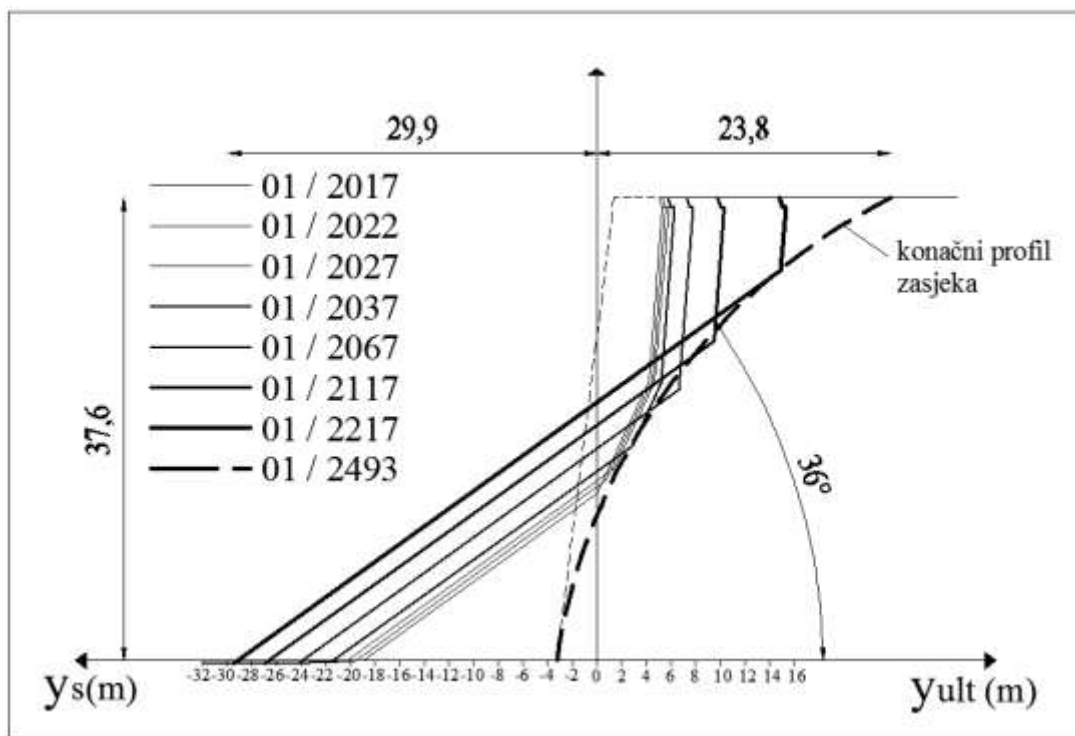
Slika 16. Lice zasjeka za  $\Delta T=20$  god.



Slika 17. Lice zasjeka za  $\Delta T=50$  god.



Slika 18. Lice zasjeka za  $\Delta T=100$  god.



Slika 19. Promjena geometrije lica zasjeka u vremenu

U tablici 2. prikazani su rezultati promjene geometrije lica zasjeka u vremenu.

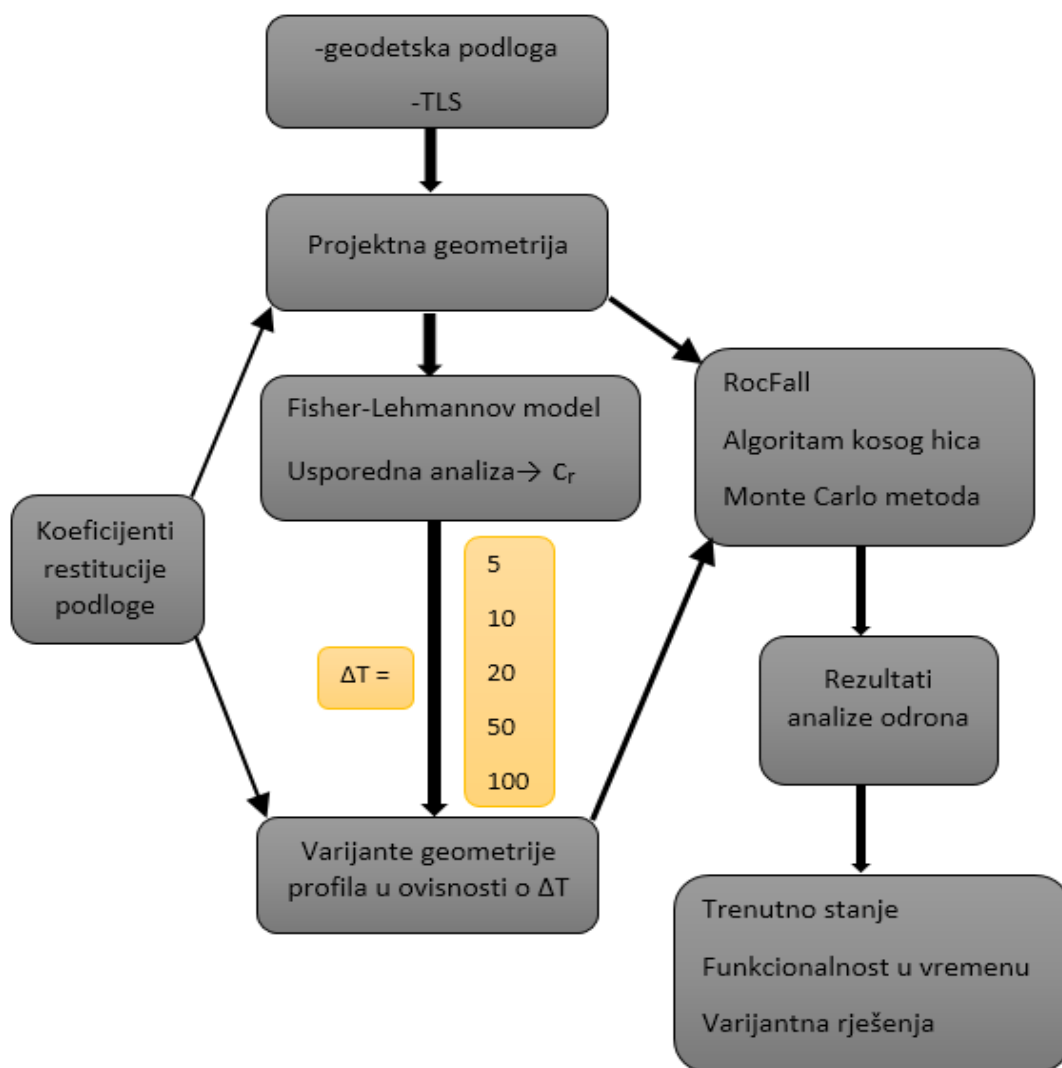
Tablica 2. Prikaz rezultata promjene geometrije lica zasjeka u vremenu.

Godina:	$\Delta T$ (god)	$Y_s$ (m) (pomak nožice sipara)	$Y_{ULT}$ (m) (položaj vrha zasjeka)	$Y_{UK}$ (m) (ukupna širina sipara)
2017	0	18,9	0,0	18,9
2022	5	19,6	0,8	20,4
2027	10	20,3	1,5	21,8
2037	20	21,5	2,9	24,4
2067	50	24,1	6,7	30,8
2117	100	26,9	9,5	36,4
2227	200	29,5	14,9	44,4

Prema poračunu promjene geometrije lica zasjeka, promatrani profil bi svoj konačni oblik trebao ostvariti za 470 godina. Ukupna širina pokosa sipara i konveksne jezgre intaktne stijene bila bi oko 54 metra.

## 4. ANALIZA ODRONA

Korištenjem RocFall računalnog programa izvršena je analiza odrona za geometriju zasjeka karakterističnog profila visine cca 38 m na istočnom dijelu predmetne lokacije. Proces iznalaženja rješenja prikazan je u dijagram toka na slici 20.. Za svaki vremenski korak prikazano je: promjena geometrije zasjeka pod utjecajem rastrošbe, trajektorije odronjenih blokova, distribucija završne točke puta svakog pojedinačnog bloka, ukupna kinetička energija blokova na padini te distribucija ukupne kinetičke energije bloka prije udara u samu barijeru sa kumulativnom funkcijom energije.



Slika 20. Dijagram toka analize odrona

## 4.2. Odroni - definicija i faktori utjecaja

Odron se definira kao trenutno odvajanje dijelova stijenskih blokova ili dijela stijenske mase od kamene kosine, sa malo ili bez posmičnih pomaka, zbog klimatskih, bioloških i antropogenih čimbenika [20].

Kao takvi predstavljaju veliku opasnost po ljudsku sigurnost posebice u područjima s izrazitom raznovršnošću litostratigrafskog sastava tla, različitim reljefnim obilježjima, visokim stupnjem seizmičke aktivnosti, nepovoljnim klimatskim uvjetima te velikim antropogenim utjecajem na oblikovanje reljefa.

Potrebno je razlikovati odrone od klizanje stijenske mase. U stijenskoj masi puno je češća pojava odrona nego pojava globalne nestabilnosti stijenskog pokosa tj. potpunog sloma kroz stijensku masu. Uglavnom se radi o pojavi erozijske nestabilnosti, osipavanju sitnih odlomaka stijene ili lokalnoj nestabilnosti pri kojoj dolazi od odrona većeg bloka stijenske mase.

Uzroci odrona stijenske mase su različiti. Diskontinuiteti stijenske mase, utjecaj procjeđivanja vode, porni tlak, seizmička aktivnost, rastrošba i nagle klimatske promjene samo su neki od uzročnika odrona.

Antropogeni faktori očituju se kroz građevinske radove kao što je zasijecanje stijenske mase ili nasipavanje, pri čemu dolazi do promjene stanja naprezanja u stijenskoj masi i povećanja nestabilnosti. Čak i kontrolirano miniranje stijenske mase, neovisno o kvaliteti izvedbe, dovodi do promjene stanja naprezanja, usitnjavanje stijene i proširenja pukotina, a time i povećavanja lokalne i erozijske nestabilnosti. Ljudsko djelovanje očituje se i kroz uklanjanje vegetacije što također utječe na erozijsku i lokalnu stabilnost zasjeka.

Klimatski faktori su: povećanje pornog tlaka pri infiltraciji oborina, erozija rastrošenog materijala tijekom kiša većeg intenziteta, vlaženje i sušenje te smrzavanje i odmrzavanje.

Biološki faktori su: mrvljenje i kemijska dezintegracija stijenske mase opisani u prethodnom poglavlju, širenje pukotina uslijed širenja korijenja.

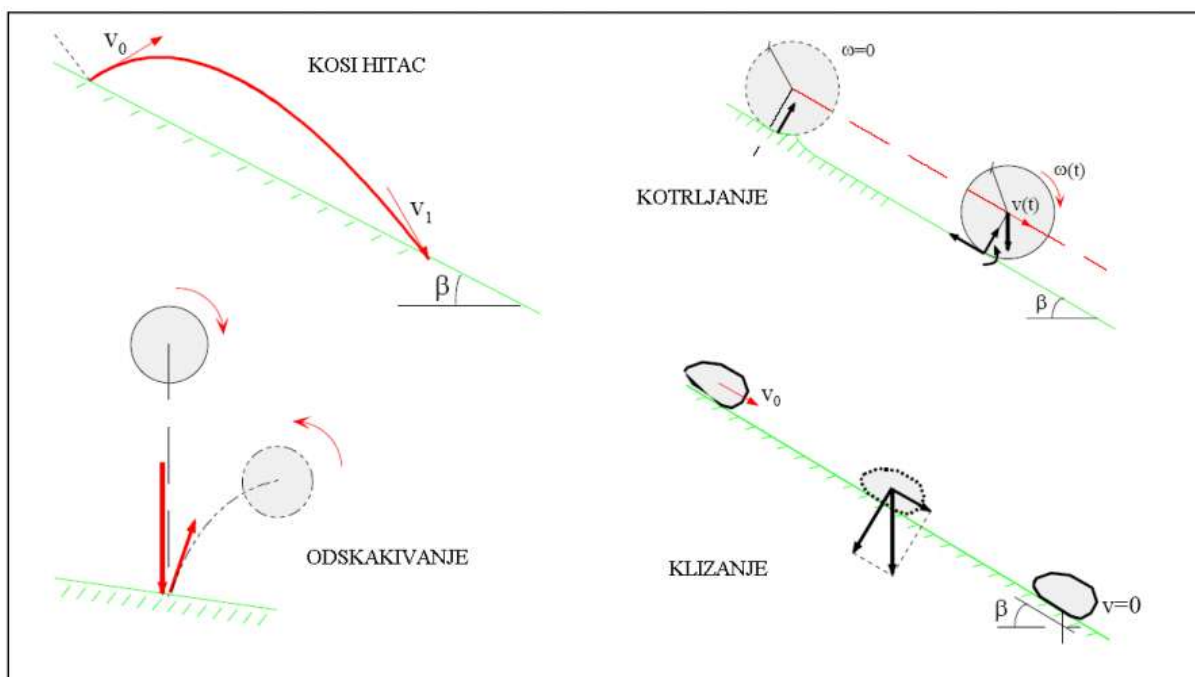
Na predmetnoj lokaciji glavni čimbenik koji uzrokuje odrone je diferencijalna rastrošba flišnih naslaga zasjeka. Komponente flišne formacije poput vapnenačkog pješčenjaka koje su otpornije na rastrošbu, ostaju na licu pokosa kao konzolne istake. Kada konzola dosegne dovoljnu duljinu, moment savijanja razdvaja blok od ostatka sloja pješčenjaka i dolazi do odrona.

Opasnost od odrona u nekim slučajevima je lako uočljiva, međutim najopasnije situacije odrona događaju se kada se blok stijenske mase trenutno oslobodi sa naizgled čvrste površine. To

se može dogoditi kada se sile, koje djeluju okomito na ravninu diskontinuiteta (izolira blok od drugih diskontinuiteta), promijene zbog pornog pritiska u diskontinuitetu ili smanjenja posmične čvrstoće tih ravnina (uzrokovano dugoročnim propadanjem zbog utjecaja vremenskih prilika). Oslobođanje „ključnih blokova“ ponekad može ubrzati odrone značajnih razmjera ili u ekstremnim slučajevima, slomove pokosa velikih razmjera.

Dimenzije odronjenih blokova ovise o prostornom rasporedu diskontinuiteta, a mehanizam gibanja bloka o orijentaciji diskontinuiteta. Duljina puta koji će prijeći blok ovisi o njegovoj veličini i obliku, geometriji kosine te o kompoziciji i sastavu terena.

Mehanizmi gibanja blokova po pokosu mogu biti: kosi hitac (*falling*), odskakivanje (*bouncing*), klizanje (*sliding*) ili kotrljanje (*rolling*) (Slika 21.).



Slika 21. Mehanizmi gibanja blokova po kosini [20]

Očito je kako je najvažniji faktor koji kontrolira trajektoriju odronjenog bloka geometrija pokosa. Geometrijski oblici pokosa poput prevjesa i istaka imaju djelovanje „ski-skakaonice“ na gibanje odronjenog bloka, dajući mu veliku horizontalnu komponentu brzine uzrokujući njegov odskok daleko od nožice pokosa.

### 4.3. Koeficijenti restitucije podloge

Svojstvo usporavanja površinskog materijala izraženo je preko koeficijenta restitucije čija vrijednost ovisi o vrsti materijala koji sačinjava površinu udara odronjenog bloka. Čiste površine tvrde stijene imaju visok, a tla i rastrošene stijene nizak koeficijent restitucije.

Vrijednosti koje se koriste u analizama odrona za koeficijent normalne restitucije ( $R_N$ ) u rasponu su od 0.3 do 0.5, a vrijednosti za koeficijent tangencijalne restitucije ( $R_T$ ) u rasponu od 0.7 do 0.95. Područja prekrivena vegetacijom i mekana tla nalaze se u donjem dijelu raspona, a stijena, beton i asfalt u gornjem dijelu raspona.

Koeficijente restitucije moguće je odrediti povratnim analizama. Terenski podaci za određivanje povratne analize sadrže krajnju točku bloka, masu bloka, početnu točku (izvorni položaj bloka) i nekoliko pozicija udara (tragovi ili udubljenja duž profila pokosa). Empirijske vrijednosti za koeficijente restitucije određene su podešavanjem koeficijenata restitucije u računalnom programu, sve dok program ne reproducira iste lokacije udara i krajnjih točaka koje su uočene na terenu.

Svi pristupi proračuna odrona polaze od toga da dolazi do gubitka energije padajućeg bloka zbog tangencijalnog i normalnog koeficijenta restitucije. Tangencijalni koeficijent je u smjeru paralelno sa kosinom, a normalni okomito na ravninu kosine.

Za potrebe izračuna putanje potencijalno nestabilnih blokova, a koristeći konzervativne procjene za tla usporedivih geotehničkih karakteristika, odabrani su parametri restitucije na temelju podataka iz dostupne literature prikazani na tablici 3..

Tablica 3. Koeficijenti restitucije podloge

Parametar/Podloga	Fliš	Talus	Plato
Koeficijent normalne restitucije - $R_N$	0.5	0.3	0.25
Koeficijent tangencijalne restitucije - $R_T$	0.9	0.6	0.55
Dinamički otpor trenja podloge	0.5	0.5	0.4
Otpor podloge kotrljanju	0.4	0.6	0.5



Površine prekrivene rastrošenim materijalom ili šljunkom znatno apsorbiraju energiju udara odronjenog bloka i mogu ga u potpunosti zaustaviti. Čiste površine tvrde stijene ne usporavaju značajnije brzinu kretanja odronjenog kamena.

#### 4.4. Mjere zaštite od odrona

U svrhu zaštite pješačke zone od potencijalnih odrona predviđena je zaštitna barijera od gabiona visine 2 m koja će se postaviti sa odmakom od 5 m od nožice sipara. Iako su danas najučestalije mjere zaštite od odrona elastične barijere, iz više razloga odlučeno je kako je gabionska zaštita bolja opcija za predmetnu lokaciju. Osim što je ekonomičnije i estetski prihvatljivije rješenje, gabionska barijera predstavlja fizičku i psihološku granicu koja će spriječiti korisnike rekreativne zone da se kreću van zaštitne zone.

#### 4.5. RocFall

RocFall je računalni program statističke analize koji upotrebom Monte-Carlo metode obavlja vjerojatnosne simulacije odrona i može se koristiti za projektiranje barijera i testiranje njihove učinkovitosti. [21]

Na temelju ulaznih podataka (geometrije pokosa, karakteristike materijala pokosa-koeficijenti restitucije, veličine i oblika bloka, početne pozicije i početne brzine bloka) proračunava moguće trajektorije blokova i kao izlazne podatke daje brzinu, poziciju i kinetičku energiju bloka duž profila promatranog pokosa.

Grafički podaci za maksimalnu brzinu, visinu odskoka i kinetičku enegiju odronjenog bloka duž profila pokosa, koriste se pri odlučivanju o poziciji sustava zaštite i karakteristikama sustava zaštite. RocFall navedene izlazne podatke pruža u obliku histograma koji prikazuje raspodjelu brzine, kinetičke energije i odskočne visine blokova u odnosu na bilo koju lokaciju duž profila pokosa.

##### 4.5.1. Analiza vjerojatnosti

Korištenje probabilističkih simulacija odrona u kombinaciji sa pravilnim statističkim analizama pokazalo se kao učinkovit i prihvatljiv način za rješavanje nesigurnosti oko ulaznih

parametara i osjetljivosti proračuna na te parametre. Iz tog razloga razvili su se računalni programi koji izvode veliki broj analiza i kao izlaz daju probabilističke rezultate.

U slučaju kad koeficijent restitucije ili neki drugi parametar nije poznat, ali se može odrediti očekivani raspon vrijednosti, nasumičnim odabirom vrijednosti iz očekivanog raspona može se izvesti veliki broj analiza i na temelju korištenog raspona ulaznih podataka stvoriti raspodjela probabilističkih rezultata.

#### **4.5.2. Slučajne varijable**

Za izradu probabilističkih simulacija, odnosno analize vjerojatnosti, moguće je određivanje ulaznih parametara ili kao konstantnih vrijednosti ili kao slučajnih varijabli.

Početna pozicija i masa bloka, pozicija svake svake karakteristične točke profila pokosa, koeficijent restitucije i kut trenja (za svaki segment pokosa) mogu biti definirani kao slučajne varijable. Parametar kojem se ne može dodijeliti distribucija je pozicija barijere te se ona unaprijed definira od strane projektanta.

Distribucije se izvode odvojeno i svaka je neovisna jedna o drugoj. Na taj način omogućava se izvođenje analize osjetljivosti svakog pojedinog ulaznog parametra što olakšava iznalazak najefikasnijeg i najekonomičnijeg sustava zaštite od odrona.

#### **4.5.3. Algoritmi**

Računalni program RocFall koristi dva algoritma: Algoritam kosog hitca i Algoritam klizanja. Algoritam kosog hitca se koristi za proračunavanje kretanja bloka, dok blok putuje kroz zrak, odskače iz jedne točke pokosa na drugu, a algoritam klizanja se koristi za proračunavanje kretanja bloka dok je blok u kontaktu s licem pokosa.

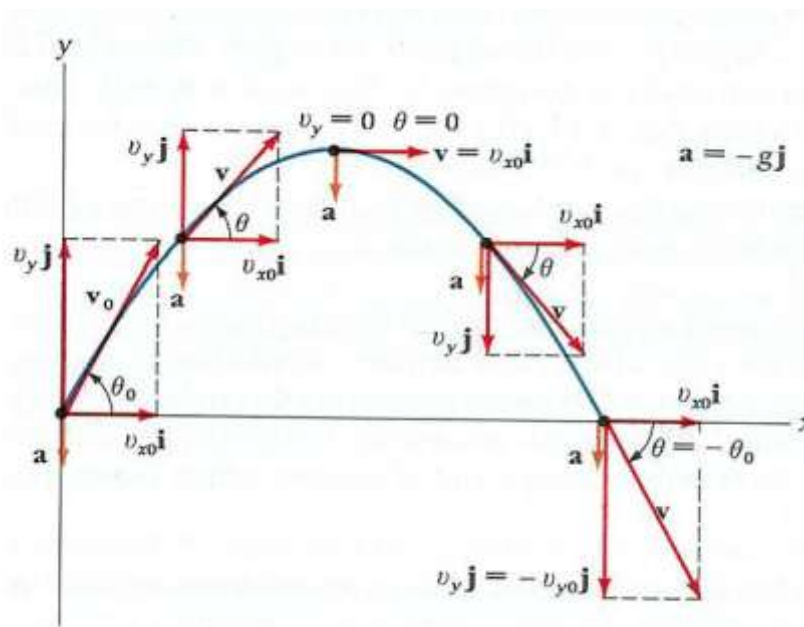
Većina simulacije se provodi u algoritmu kosog hitca jer brzina bloka mora biti vrlo niska da bi se kretanje bloka prestalo računati s algoritmom kosog hitca.

#### **4.5.4. Algoritam kosog hitca**

Algoritam kosog hitca (slika 22.) pretpostavlja da blok ima neku brzinu koja će ga pokretati, kroz zrak, iz sadašnje pozicije na novu poziciju gdje će blok udariti u pokos. Svrha algoritma kosog hitca je pronaći lokaciju sjecišta parabole putanje bloka i pokosa.

Nakon što se pronade točka sjecišta, proračunava se brzina nakon udara koristeći koeficijente restitucije.

Ako se, nakon udara o podlogu, blok kreće brže od definirane minimalne brzine ( $v_{min}$ ) proces počinje ponovno i traži se novo sjecište putanje bloka i pokosa.



Slika 22. Kosi hitac [20]

Minimalna brzina ( $v_{min}$ ) definira prijelaz između stanja „kosog hica“ i stanja u kojem se blok kreće presporo da bi se smatrao „kosim hicem“ i umjesto toga se kotrlja, kliže ili zaustavlja. Rezultati simulacije i vrijeme potrebno za proračun simulacije nisu osobito osjetljivi na promjene minimalne brzine.

Za određivanje putanje bloka, tj. sjecišta njegove putanje i pokosa koriste se parametarski oblici jednadžbi (parabola - putanja bloka i pravac - segment pokosa).

#### 4.6. Ulazni parametri za analizu odrona u RocFall-u

Konkretno vrijednosti ulaznih parametara korištenih za analizu odrona u RocFall-u prikazane su u tablicama 4., 5., 6., i 7..

- **Koeficijenti restitucije podloge**

Tablica 4. Koeficijenti restitucije podloge

Materijal	Boja	Normalni koeficijent restitucije	Tangencijalni koeficijent restitucije	Dinamički koeficijent trenja	Koeficijena trenja kotrljanja
Fliš		0.5	0.9	0.5	0.4
Talus		0.3	0.6	0.5	0.6
Plato		0.25	0.55	0.4	0.5

- **Početno ubrzanje i rotacija blokova**

Tablica 5. Početno ubrzanje i rotacija blokova

Naziv izvora	Broj blokova	Tip Blokova	Horizontna brzina (m/s)	Vertikalna brzina (m/s)	Rotacijska brzina (rad/s)	Početna rotacija
Izvor 1	500	Grupa 1	0.2	0.0	0.0	Srednja: 0 Rel. Min.:0 Rel. Max.:360

- **Masa i oblik blokova**

Tablica 6. Masa i oblik blokova

Naziv bloka	Boja	Masa (kg)	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Oblici
Grupa 1		2500	2700	Sfera Elipsa <sup>4</sup> (1:1) Elipsa <sup>4</sup> (5:6) Elipsa <sup>4</sup> (2:3) Elipsa <sup>6</sup> (2:3)

- **Parametri zaštitne barijere**

Tablica 7. Parametri zaštitne barijere

Naziv barijere	Visina (m)	Nagib (°)	Kapacitet (kJ)	Boja	Izduljenje (m)
Barijera 1	2	90	500		<b>0.5</b>

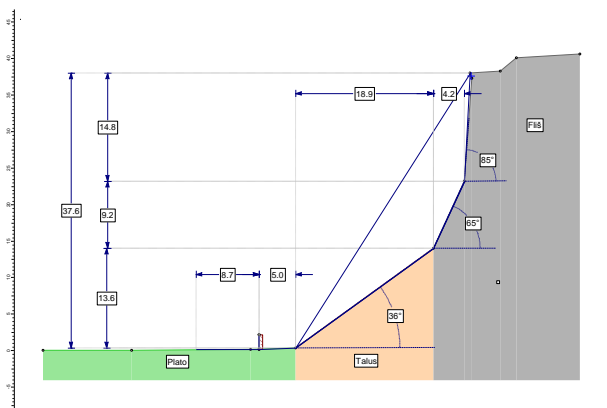
#### 4.7. Rezultati RocFall-a

Proračun je izvršen za geometriju zasjeka karakterističnog profila visine cca 38 m na istočnom dijelu predmetne lokacije. Prikazani rezultati poredani su u kronološki niz u ovisnosti o vremenskom koraku.

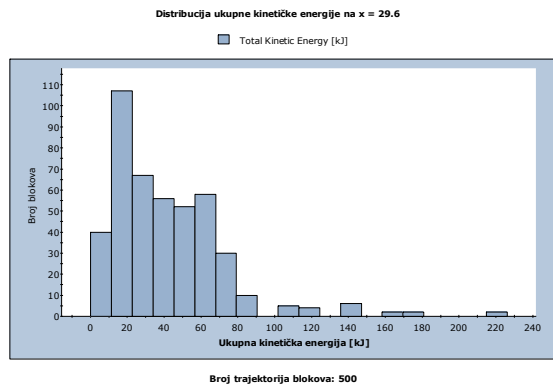
Za svaki  $\Delta T$  prikazano je: promjena geometrije zasjeka pod utjecajem rastrošbe, trajektorije odronjenih blokova, distribucija završne točke puta svakog pojedinačnog bloka, ukupna kinetička energija blokova na padini te distribucija ukupne kinetičke energije bloka prije udara u samu barijeru sa kumulativnom funkcijom energije.

U nastavku je prikazana promjena geometrije zasjeka pod utjecajem rastrošbe, trajektorije odronjenih blokova sa barijerom i bez, distribucija završne točke puta svakog pojedinačnog bloka sa barijerom i bez te distribucija ukupne kinetičke energije bloka prije udara u samu barijeru za periode  $\Delta T=0$  ( Slika 23.),  $\Delta T=5$  ( Slika 24.),  $\Delta T=10$  ( Slika 25.),  $\Delta T=20$  ( Slika 26.),  $\Delta T=50$  ( Slika 27.),  $\Delta T=100$  ( Slika 28.).

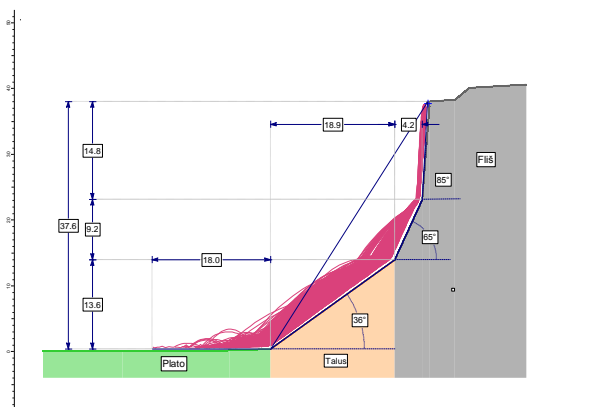
4.7.1.  $\Delta T=0$  godina - trenutno stanje



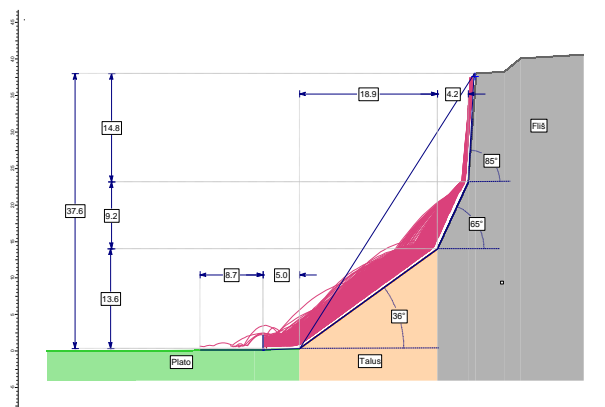
(a) Geometrija zasjeka sa barijerom h=2 m.



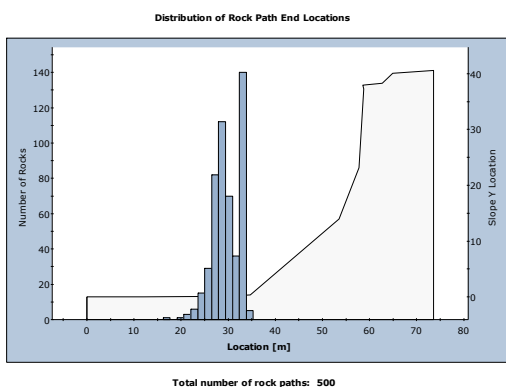
(b) Kinetička energija prije udara u barijeru.



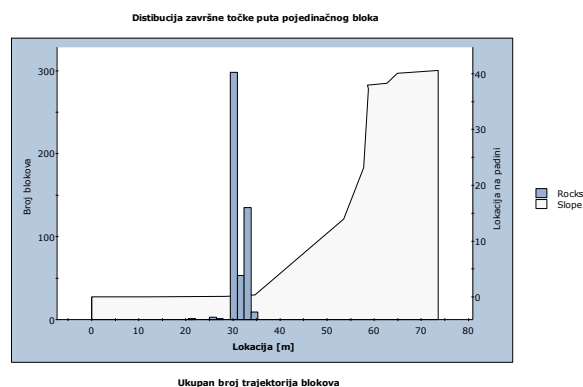
(c) Trajektorije blokova bez barijere.



(d) Trajektorije blokova sa barijerom.



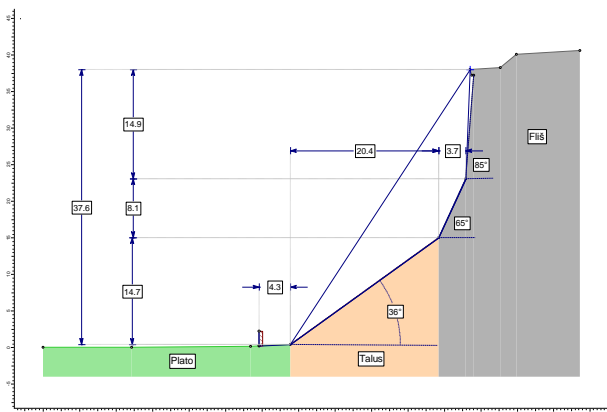
(e) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka bez barijere.



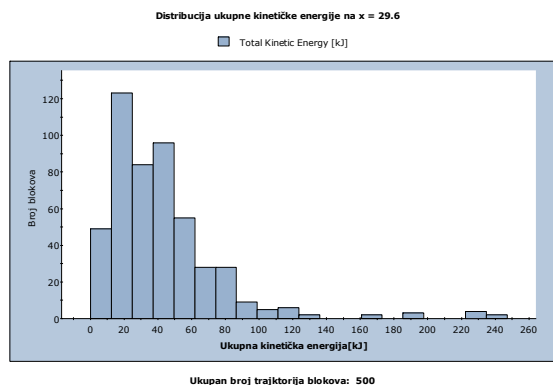
(f) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka sa barijerom h=2m.

Slika 23. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=0$  god.(trenutno stanje)

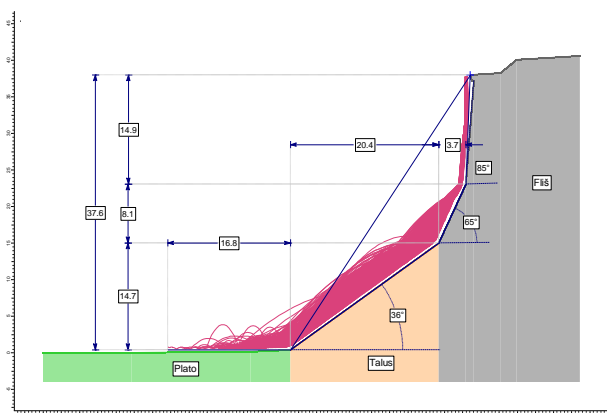
4.7.2.  $\Delta T=5$  godina



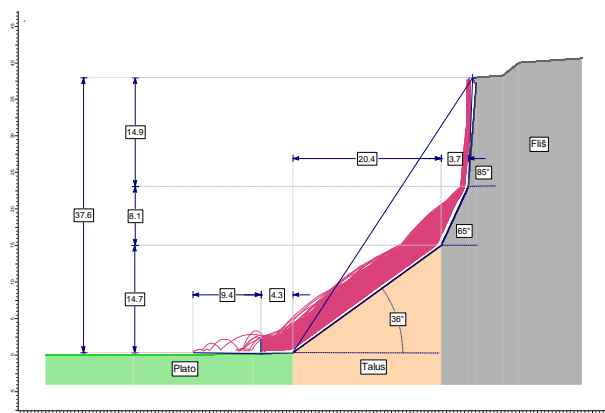
(a) Geometrija zasjeka sa barijerom h=2 m.



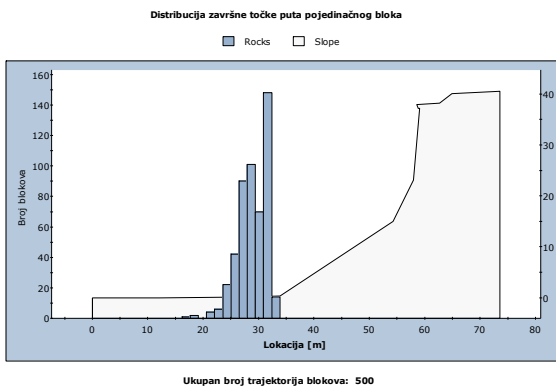
(b) Kinetička energija prije udara u barijeru.



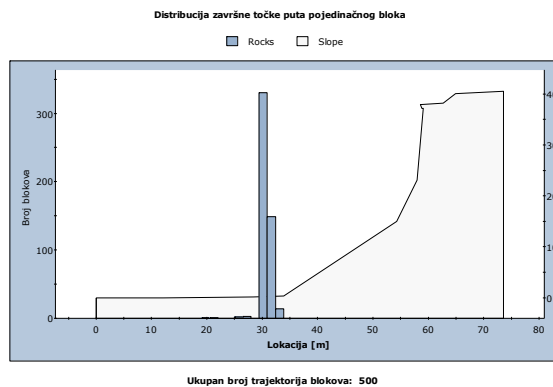
(c) Trajektorije blokova bez barijere.



(d) Trajektorije blokova sa barijerom h=2 m.



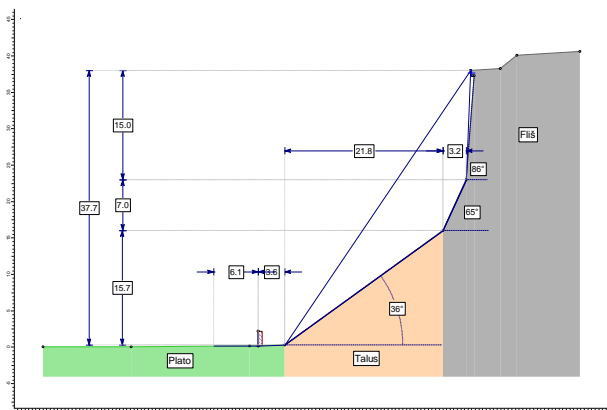
(e) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka bez barijere.



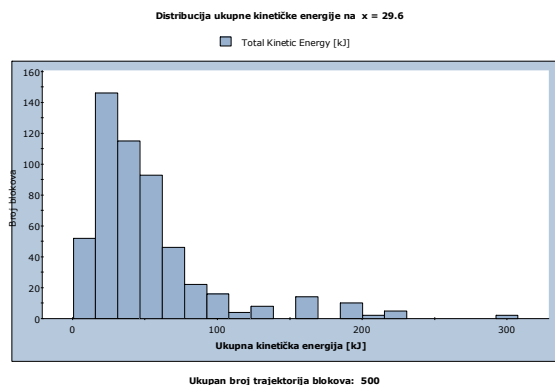
(f) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka sa barijerom h=2m.

Slika 24. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=5$  god.

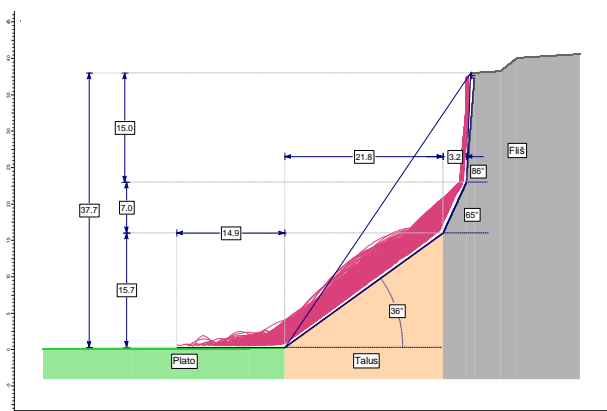
4.7.3.  $\Delta T=10$  godina



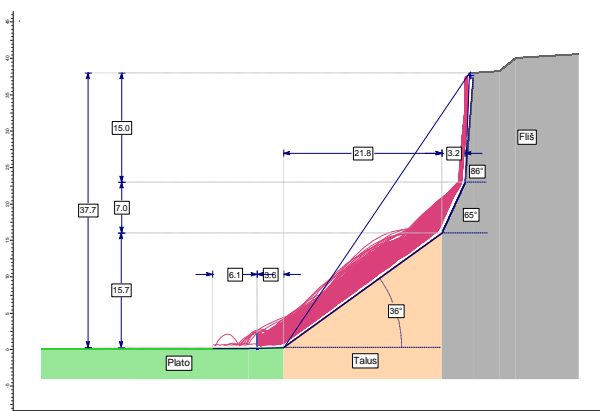
(a) Geometrija zasjeka sa barijerom h=2 m



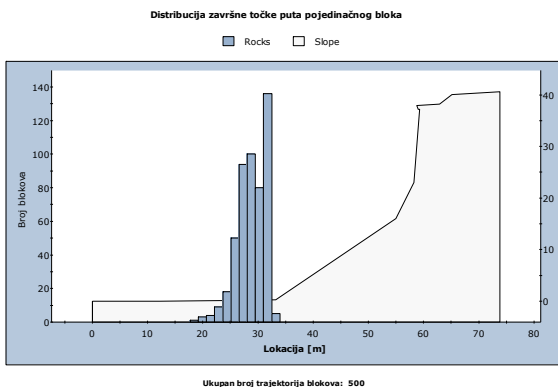
(b) Kinetička energija prije udara u barijeru.



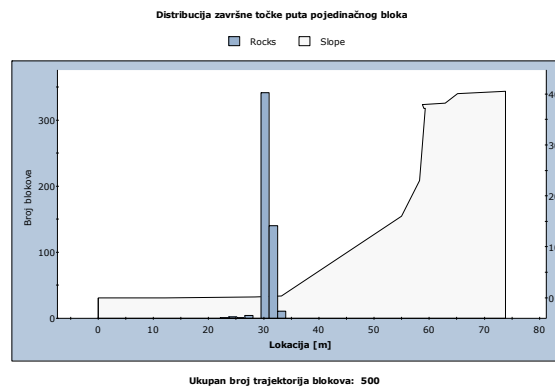
(c) Trajektorije blokova bez barijere.



(d) Trajektorije blokova sa barijerom h=2 m.



(e) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka bez barijere.

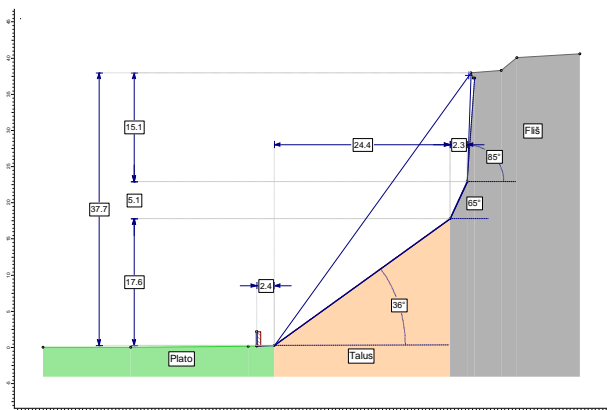


(f) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka sa barijerom h=2m..

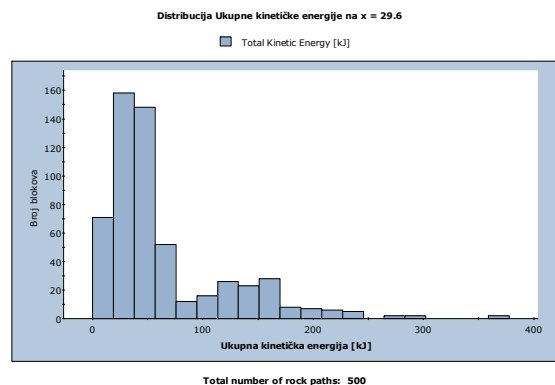
Slika 25. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=10$  god.



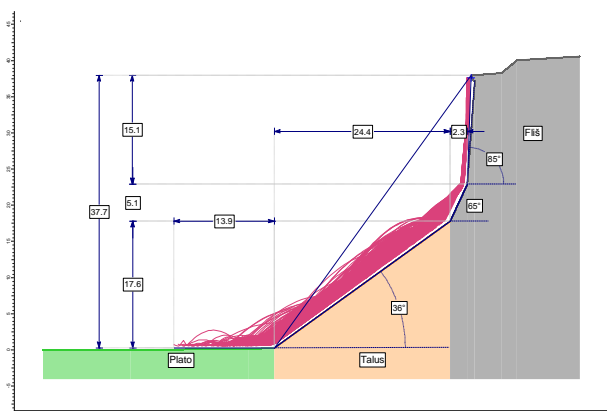
4.7.4.  $\Delta T=20$  godina



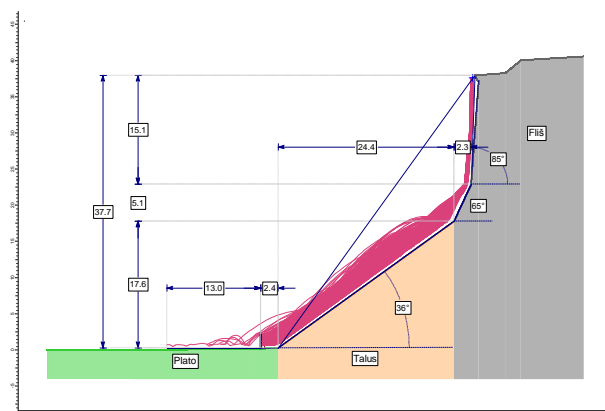
(a) Geometrija zasjeka sa barijerom h=2 m.



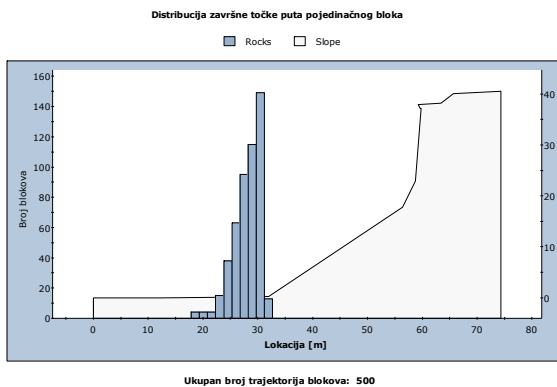
(b) Kinetička energija prije udara u barijeru.



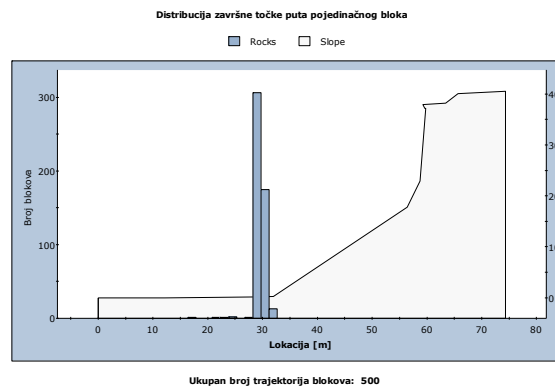
(c) Trajektorije blokova bez barijere.



(d) Trajektorije blokova sa barijerom h=2 m.



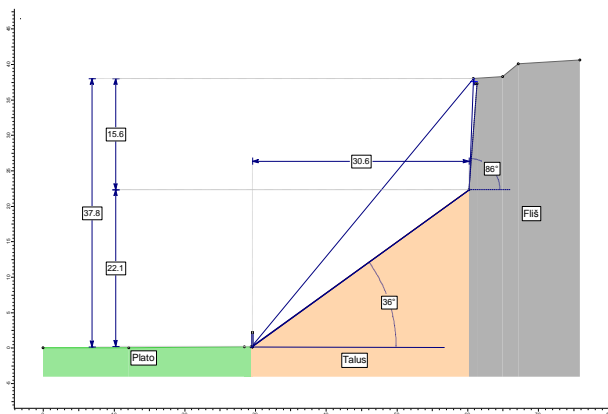
(e) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka bez barijere.



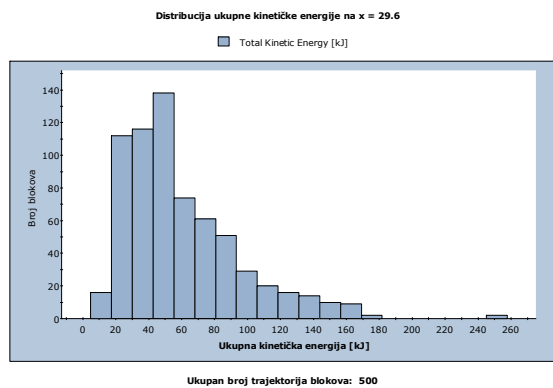
(f) Distribucija završne točke putapojedinačnog bloka sa barijerom h=2m.

Slika 26. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=20$  god.

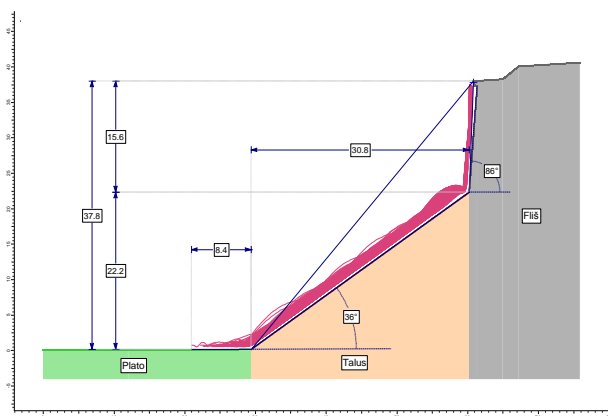
4.7.5.  $\Delta T=50$  godina



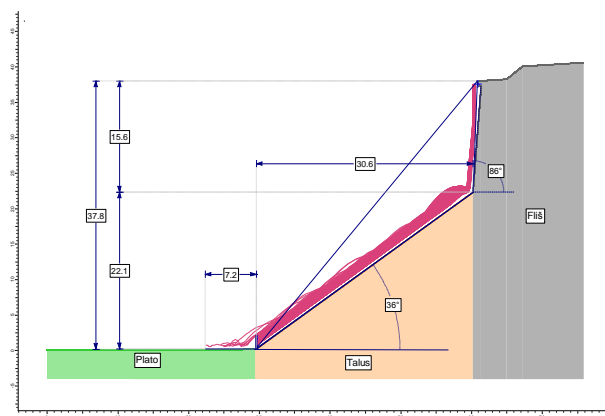
(a) Geometrija zasjeka sa barijerom h=2 m.



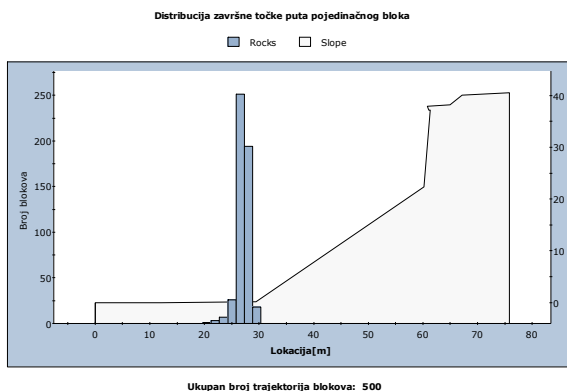
(b) Kinetička energija prije udara u barijeru.



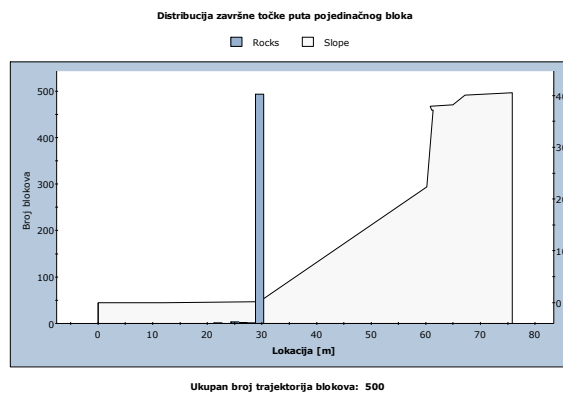
(c) Trajektorije blokova bez barijere.



(d) Trajektorije blokova sa barijerom h=2 m.



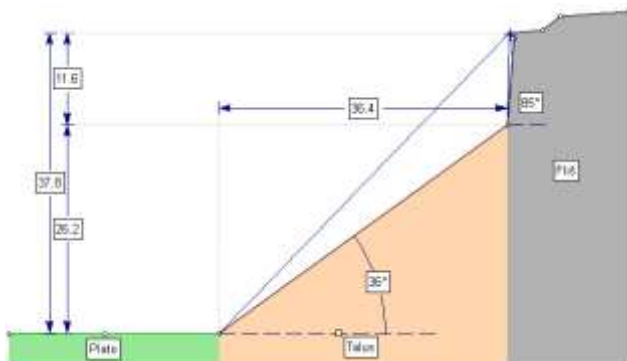
(e) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka bez barijere.



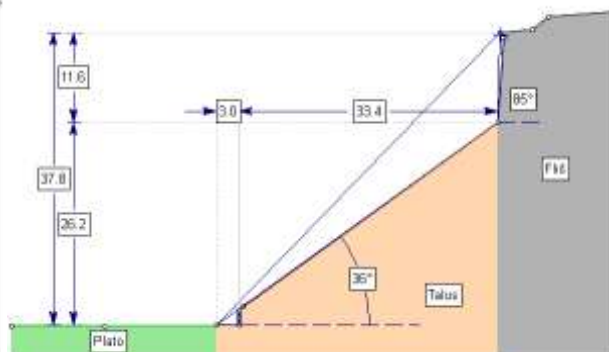
(f) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka sa barijerom h=2m..

Slika 27. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=50$  god.

4.7.6.  $\Delta T=100$  godina



(a) Geometrija zasjeka bez barijere.



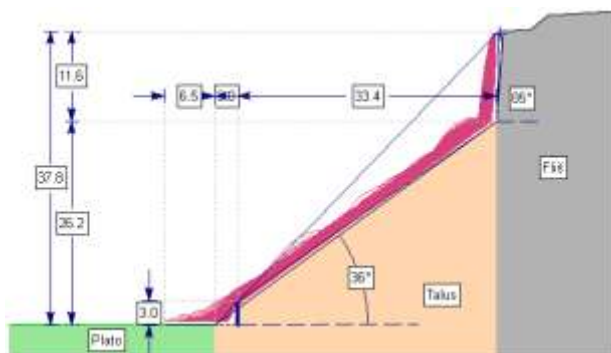
(b) Geometrija zasjeka sa barijerom h=2 m.



(c) Trajektorije blokova bez barijere.



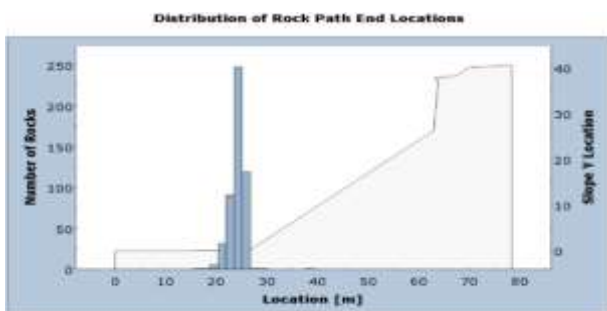
(d) Trajektorije blokova sa barijerom h=2 m.



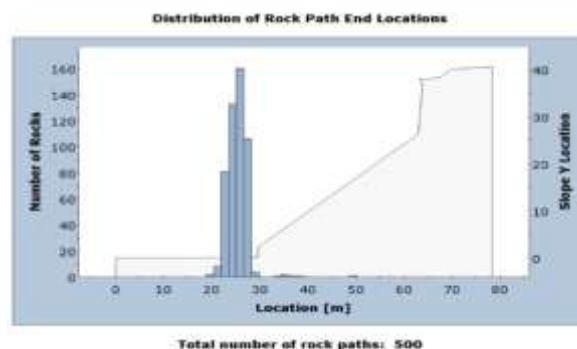
(e) Trajektorije blokova sa barijerom h=3 m.



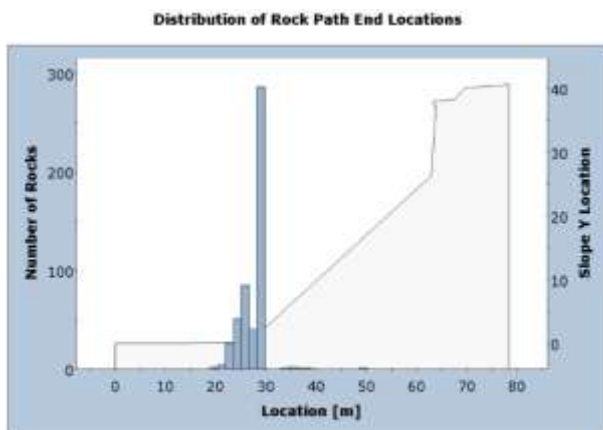
(f) Trajektorije blokova sa barijerom h=4 m.



(g) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka bez barijere.

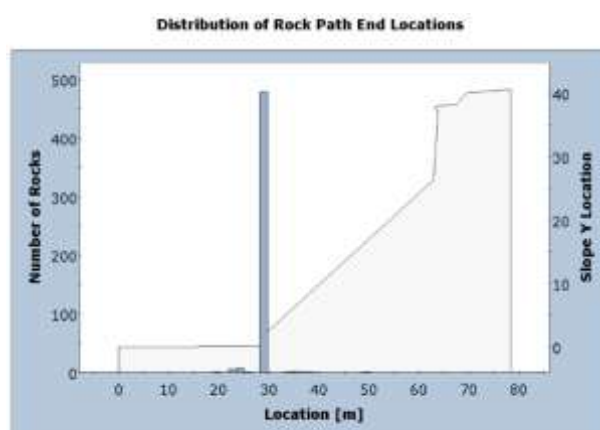


(h) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka sa barijerom h=2 m.



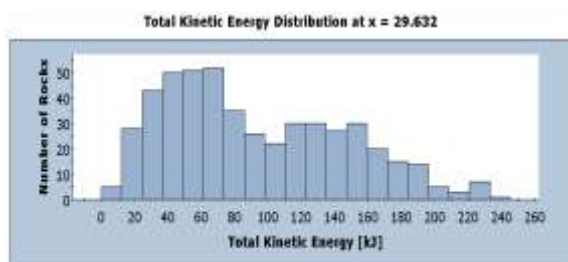
Total number of rock paths: 500

(i) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka sa barijerom h=3 m.



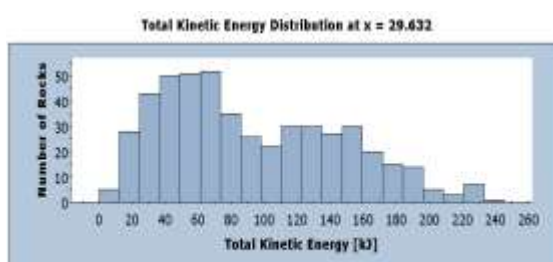
Total number of rock paths: 500

(j) Distribucija završne točke puta pojedinačnog bloka sa barijerom h=4 m.



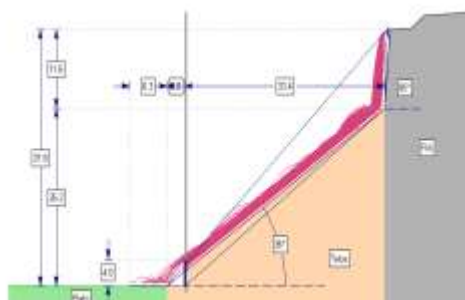
Total number of rock paths: 500

(k) Ukupna kinetička energija prije udara u barijeru h=3 m.



Total number of rock paths: 500

(l) Ukupna kinetička energija prije udara u barijeru h=4 m.



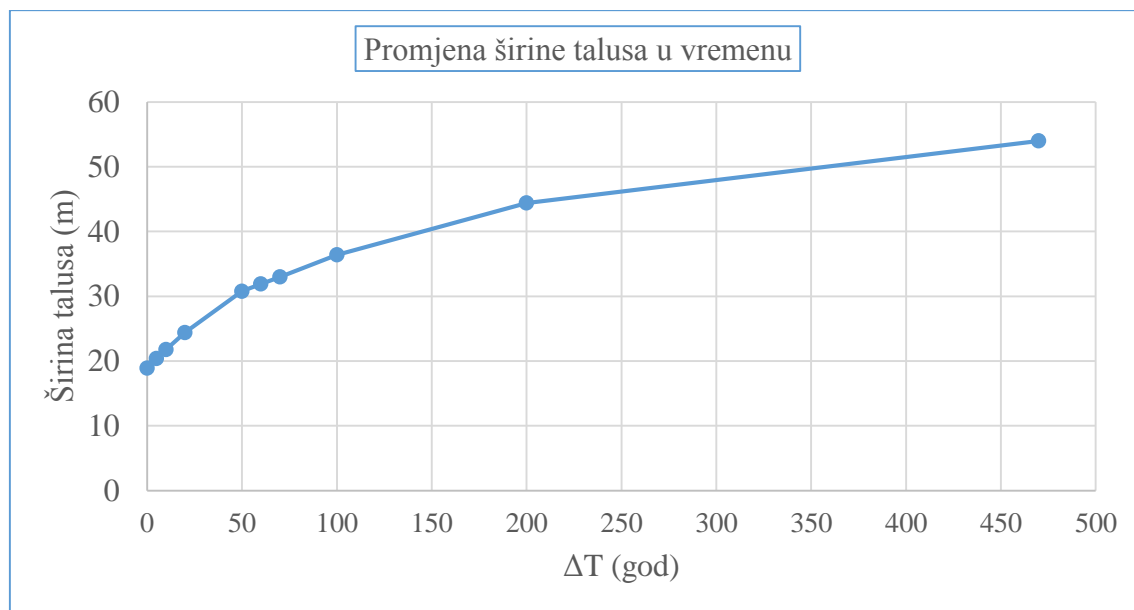
Slika 28. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=100$  god

#### 4.8. Tablični i dijagramski prikaz rezultata RocFall-a

Tablica 8. Prikaz rezultata analize odrona

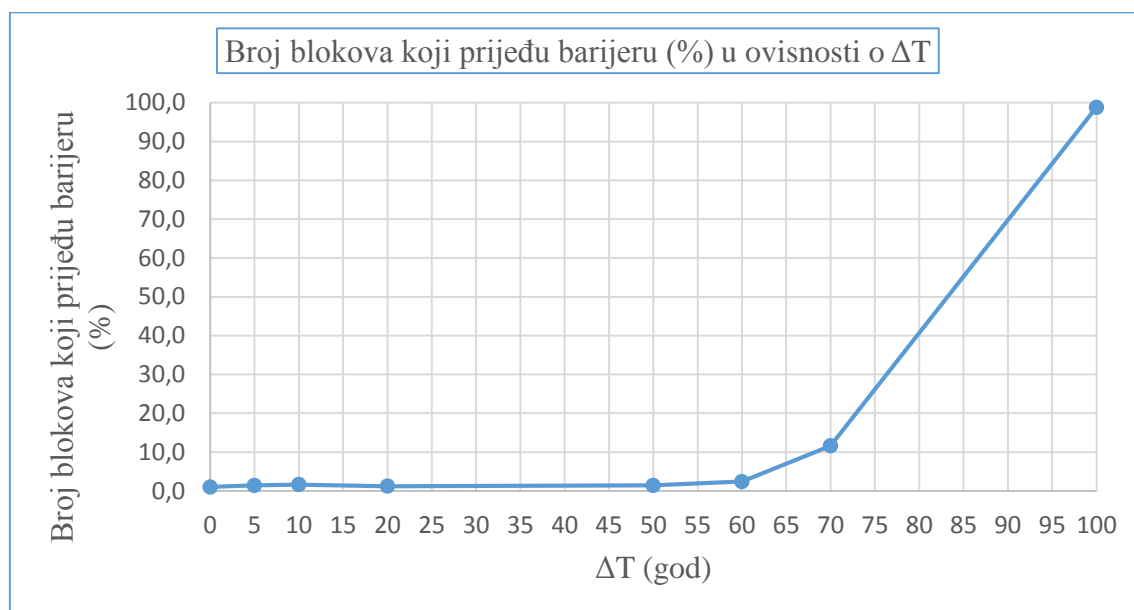
Datum:	$\Delta T$ (god)	Visina barijere (m)	Broj blokova koji prijeđu barijeru (od 500)	Broj blokova koji prijeđu barijeru (%)	Krajnja točka puta bloka bez barijere (m)	Krajnja točka puta bloka sa barijerom (100%)(m)	Krajnja točka puta bloka sa barijerom (95%) (m)
2017	0	2	5	1,0	18,0	8,7	barijera
2022	5	2	7	1,4	16,8	9,4	barijera
2027	10	2	8	1,6	14,9	6,1	barijera
2037	20	2	6	1,2	13,9	13,0	barijera
2067	50	2	7	1,4	8,4	7,4	barijera
2077	60	2	12	2,4	9,4	8,5	barijera
2087	70	2	58	11,6	8,7	9,8	4,3
2117	100	2	494	98,8	10,0	9,5	7
2117	100	3	208	41,6	10,0	9,6	6,3
2117	100	4	15	3,0	10,0	9,3	barijera

U tablici 8. prikazani su rezultati broja blokova koji prijeđu definiranu zaštitnu barijeru sa krajnjim točkama puta za 100% i 95% odronjenih blokova. Iz prikazanog se vidi kako barijera visine 2m za projektirani vijek korištenja platoa od 50 godina zadovoljava u pogledu osiguranja pješačke zone od odrona, dok za  $\Delta T=100$  godina apsolutno ne zadovoljava. Kako je raspon između ova dva vremenska koraka jako velik, postavlja se pitanje određivanja preciznijeg vremenskog raspona u kojem postavljena barijera više neće zadovoljavati tražene sigurnosne uvjete te ju je potrebno sanirati. Analizom promjene geometrije lica zasjeka i analizom odrona za  $\Delta T=60$  godina utvrđeno je da barijera visine 2 m ne zadovoljava traženi faktor sigurnosti.



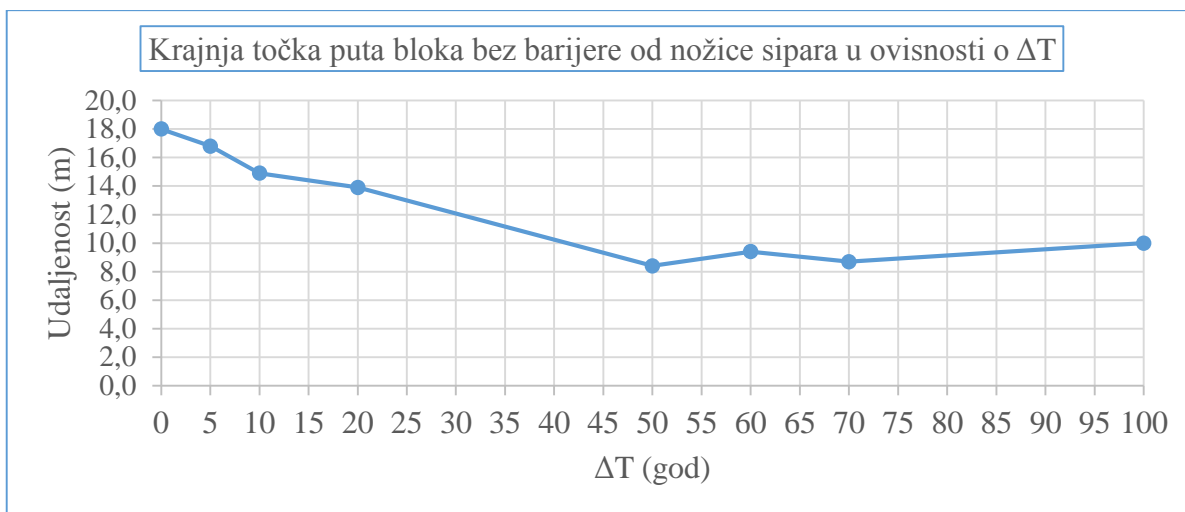
Slika 29. Promjena širine sipara u ovisnosti o  $\Delta T$ .

Proračunom degradacije flišne stijene i promjene geometrije lica zasjeke u vremenu, promatrani profil bi svoj konačni oblik trebao ostvariti za oko 470 godina. Ukupna širina pokosa sipara i konveksne jezgre osnovne stijene bila bi oko 54 metra (Slika 29.).



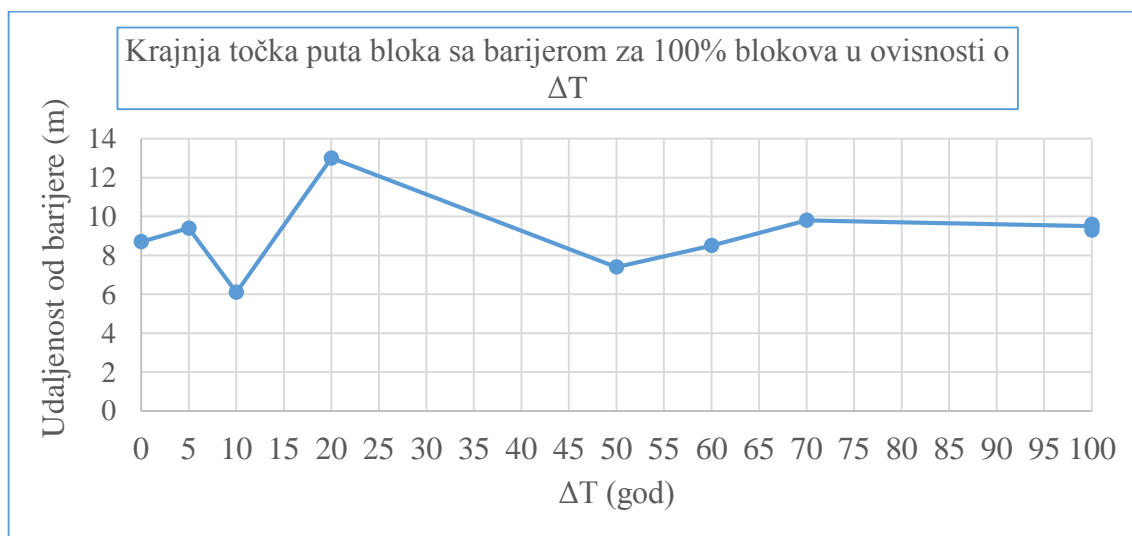
Slika 30. Postotak blokova koji prijeđu barijeru u ovisnosti o  $\Delta T$ .

Dijagramom na slici 30. prikazano je kako je zaštitnom barijerom visine 2m prikupljeno više od 95% potencijalnih blokova čime je ispunjen traženi faktor sigurnosti za projektirani vijek od 50 godina. Razvidno je kako predviđena barijera neće ispunjavati traženi koeficijent sigurnosti u vremenskom intervalu od 60 do 70 godina od trenutnog stanja.

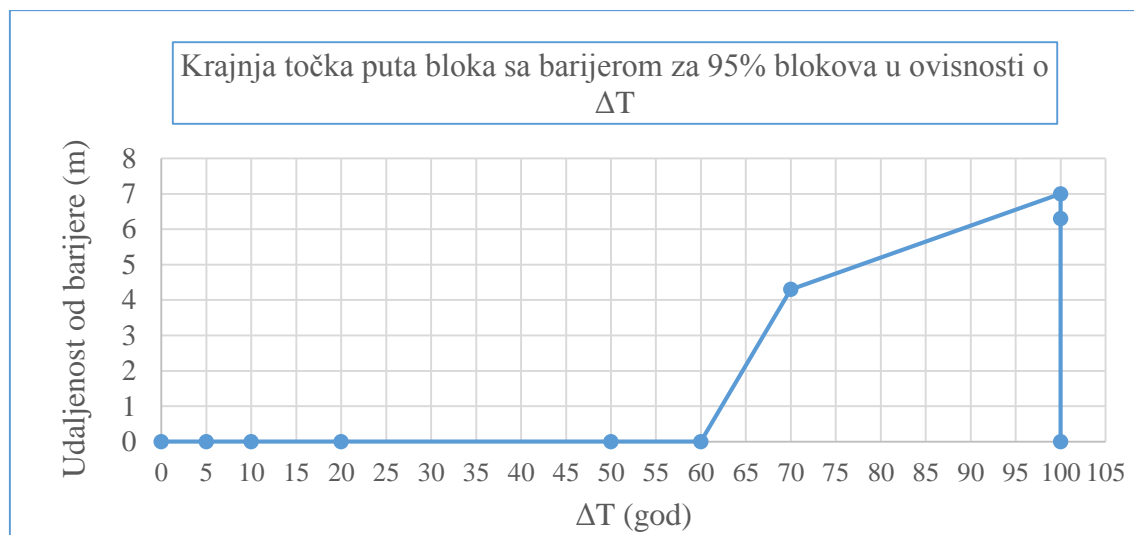


Slika 31. Prikaz krajnje točke puta blokova bez barijere od nožice sipara u ovisnosti o  $\Delta T$

Povoljan učinak talusnog materijala prilikom odrona rezultira skraćanjem puta blokova (Slika 31.). Apsorbcijom energije blokova pri udara o površinu talusa značajno se smanjuje odskočna brzina blokova, a time i udaljenost krajnje točke puta. Na slici 32. prikazana je krajnja točka puta za ukupan broj blokova u ovisnosti o  $\Delta T$ .



Slika 32. Prikaz krajnje točke puta za 100% blokova sa barijerom u ovisnosti o  $\Delta T$



Slika 33. Prikaz krajnje točke puta za 95% blokova sa barijerom u ovisnosti o  $\Delta T$

Ispunjenje traženog kriterija sigurnosti prikazan je dijagramom na slici 33.. Za projektirani vijek od 50 godina krajnja točka 95% potencijalnih blokova je zaštitna barijera.



#### 4.9. Odabir zaštitne barijere

Prethodnom analizom odrona utvđene su vrijednosti ukupne kinetičke energije projektnog bloka prilikom udara u barijeru prikazane na tablici 9..

Tablica 9. Vrijednosti kinetičke energije prilikom udara bloka o barijeru

Datum:	$\Delta T$ (god)	Maksimalna energija udara za 95% blokova [kJ]	Srednja vrijednost energije udara [kJ]	Minimalna vrijednost energije udara [kJ]	Maksimalna energija udara za 100% blokova [kJ]
2017	0	62,8	27,0	0,1	191,9
2022	5	65,4	27,4	0,2	208,5
2027	10	133,5	34,4	0,1	264,4
2037	20	135,7	42,4	0,1	286,1
2067	50	138,6	70,6	1,6	229,1

Budući da je vrijednost kinetičke energije odronjenih blokova, prije udara u barijeru, višestruko manja od klasičnih sustava za prikupljanje odronjenih blokova ( minimalne vrijednosti su 500 kJ), odabrana je zaštitna barijera ukupne visine 2 m izrađena od dva reda gabiona.

Maksimalne dopuštene vrijednosti energije bloka prilikom udara u ogradu, za barijere izrađene od gabiona, određene su prema:

Wyllie, D.C. (2015): Rock Fall Engineering. CRC Press. [22]

Odabrane dopuštene vrijednosti iznose:

- $E_f=450$  kJ (granična otpornost, za maksimalnu zabilježenu vrijednost)
- $E_d=150$  kJ (proračunska otpornost, za maksimalnu energiju 95% blokova)

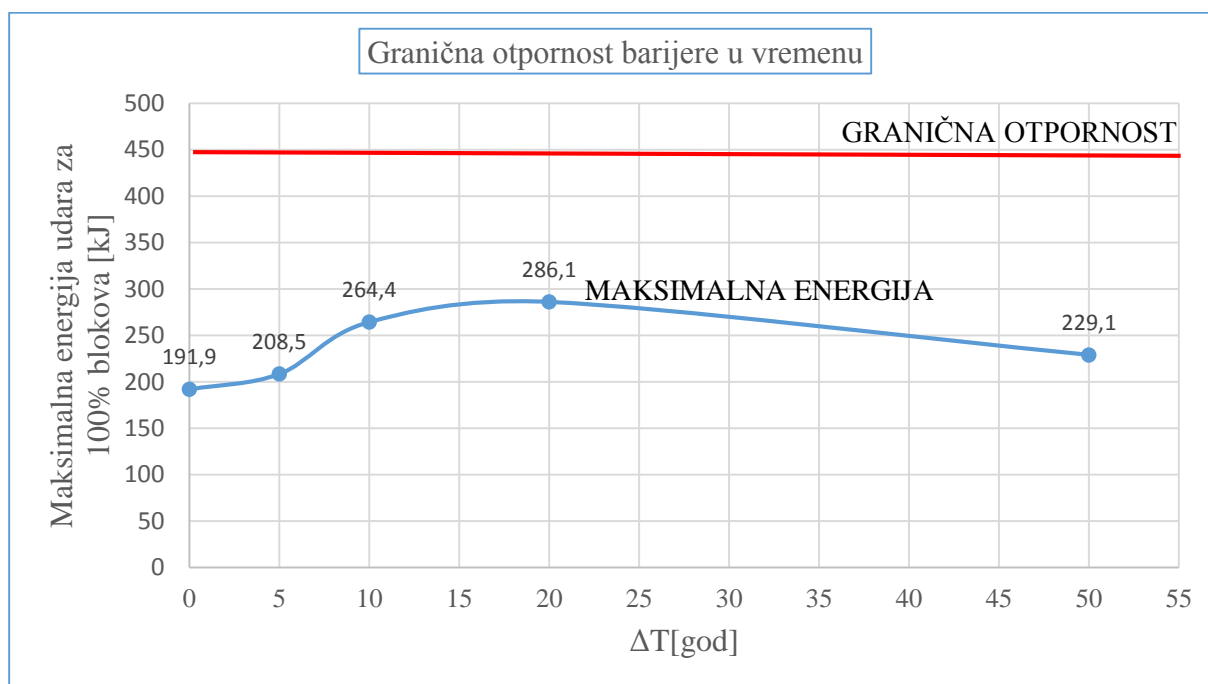
Odabrana je preporučena vrijednost faktora sigurnosti  $F_s=3$  ( $E_d=E_f/F_s$ ).

#### Kontrola granične otpornosti:

U tablici 10. te na slici 34. prikazane su vrijednosti maksimalnih energija udara za ukupan broj blokova u ovisnosti o  $\Delta T$ .

Tablica 10. Vrijednosti maksimalne energije udara za 100% blokova

Datum:	$\Delta T$ (god)	Maksimalna energija udara za 100% blokova [kJ]		Granična otpornost [kJ]
2017	0	191,9	<	450
2022	5	208,5	<	450
2027	10	264,4	<	450
2037	20	286,1	<	450
2067	50	229,1	<	450

Slika 34. Maksimalna energija udara u barijeru za 100% blokova u ovisnosti o  $\Delta T$ 

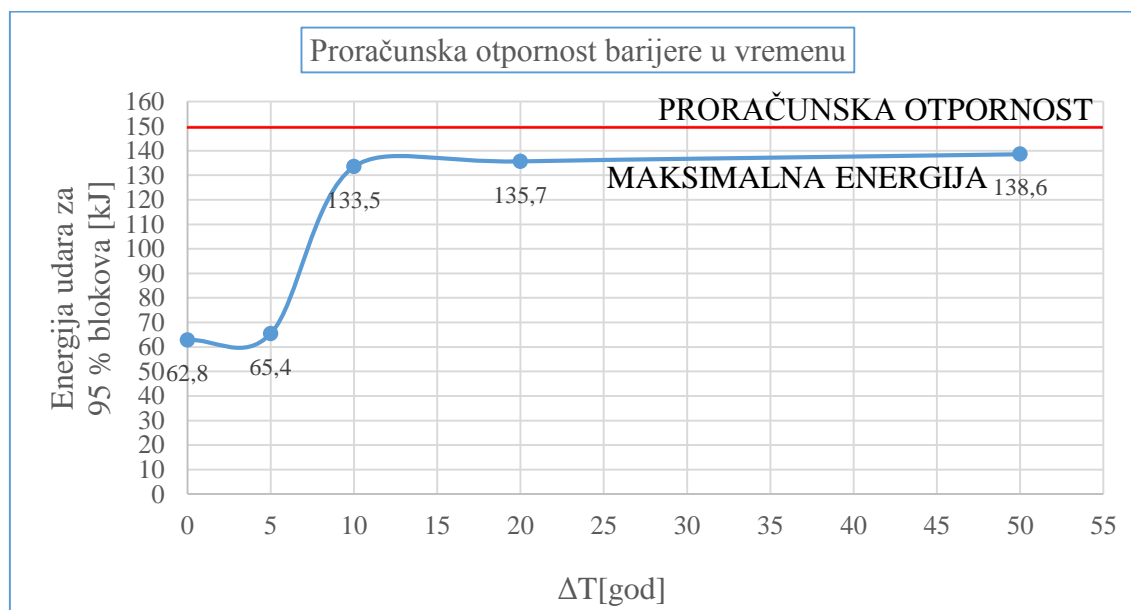
- Granična otpornost je zadovoljena za maksimalnu zabilježenu vrijednost.

### Kontrola proračunske otpornosti:

U tablici 11. te na slici 35. prikazane su vrijednosti maksimalnih energija udara za 95 % ukupnog broja blokova u ovisnosti o  $\Delta T$ .

Tablica 11. Energija udara o barijeru za 95% blokova u ovisnosti o  $\Delta T$

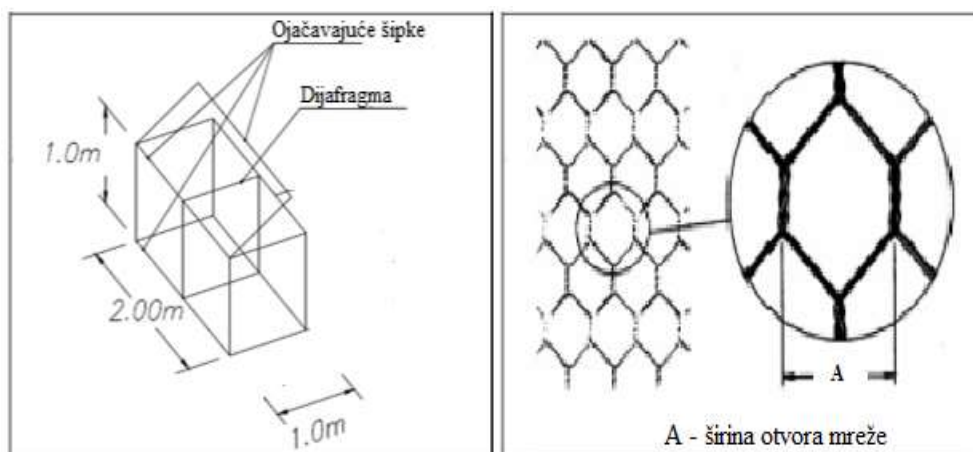
Datum:	$\Delta T$ (god)	Maksimalna energija udara za 95% blokova [kJ]		Proračunska otpornost [kJ]
2017	0	62,8	<	150
2022	5	65,4	<	150
2027	10	133,5	<	150
2037	20	135,7	<	150
2067	50	138,6	<	150



Slika 35. Maksimalna energija udara u barijeru za 95% blokova u ovisnosti o  $\Delta T$

- Proračunska otpornost zadovoljena je za maksimalnu energiju udara 95% blokova.

Kao što je i predviđeno za analizu odrona u svrhu zaštite pješačke zone od potencijalnih odrona odabrana je zaštitna barijera od gabiona visine 2m na udaljenosti 5m od nožice sipara.



Slika 36. Skica gabionskog zida (a) sa detaljem heksagonalne čelične mreže (b) [23]

Gabionske košare izrađene su od čeličnog omotača ( žičane ili polimerne mreže) te kamene ispune(Slika 36.a). Žičane mreže su pocinčane radi trajnosti i zaštite od korozije. Veličine oka mreže i promjer žice ovise o veličini kamene ispune(Slika 36.b). Gabionska barijera je puno ekonomičnije rješenje od elastičnih barijera. Ne zahtjeva specijaliziranu radnu snagu, a kao materijal za ispunu gabionskih mreža koristi se lomljeni vapnenac ili vapnenački pješčenjak. Može se koristiti i lokalni kameni materijal koji ima potrebnu kakvoću za ovu vrstu radova. Ispunu je potrebno slagati u formi suhozida (Slika 37.) kako bi fragmenti bili međusobno uglavljeni čime se osigurava maksimalna gustoća i posljedično maksimalni posmični otpor u trenutku udara. Estetski gledano zaštitna barijera od gabiona primjerenija je predmetnoj lokaciji.

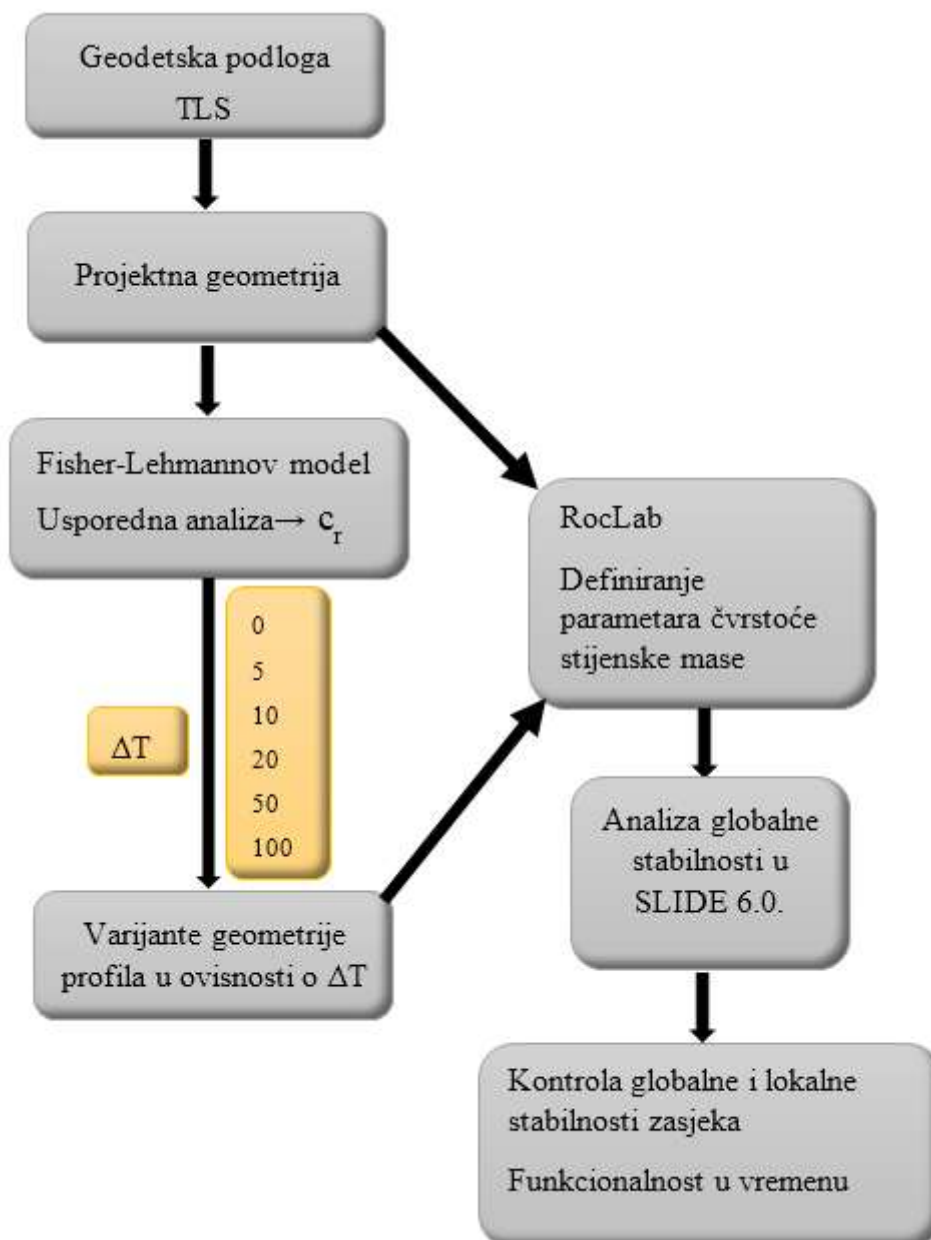


Slika 37. Primjer slaganja gabioske konstrukcije [23]

## 5. ANALIZA GLOBALNE STABILNOSTI KOSINE

### 5.1. Općenito

Korištenjem Rocscience Slide 6.0. računalnog programa izvršena je analiza globalne stabilnosti za geometriju zasjeka karakterističnog profila visine cca 38 m na istočnom dijelu predmetne lokacije. Proces iznalaženja rješenja prikazan je u dijagram toka na slici 38.



Slika 38. Dijagram toka analize stabilnosti zasjeka

Općenito pri kontroli globalne stabilnosti kosina moguće je koristiti dva pristupa. Za prvi pristup potreban je kartirani prikaz sustava pukotina u stijenskoj masi te se na taj način analiziraju potencijalne nestabilnosti po pukotinama. Drugi pristup stijensku masu promatra kao kvazihomogenu sredinu s parametrima čvrstoće ovisnim o vrsti i stanju stijenske mase te normalnom naprezanja. S obzirom na položaj i smjer pružanja međuslojnih pukotina na predmetnom zasjeku, strukturni lom po pukotini nije izgledan događaj. Kontrola i analiza globalne stabilnosti kosine provedena je u računalnom programu Rocscience Slide 6.0..

Proračuni kontrole globalne stabilnosti kosine izvršeni su na temelju raspoloživih podataka o geometriji kosine i stijenskoj masi koja sačinjava zasjek. Proračuni su izvršeni prema normi HRN EN 1997-1:2012/NA (Eurokod 7 - Geotehničko projektiranje, nacionalni aneks) i prema navednoj normi korišten je proračunski pristup 3. Seizmički proračun izvršen je prema normi HRN EN 1998-5:2011 (Eurokod 8 – Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija; temelji, potporne konstrukcije i geotehnička pitanja).

Kontrolu globalne stabilnosti proveli smo za svaku prognozu promjene geometrije zasjeka. U ovisnosti od  $\Delta T$  korigiramo geometriju predmetnog zasjeka, time i granice geotehničkih sredina, osnovne stijene i talusa na dnu zasjeka. Parametri geotehničkih sredina, kut unutarnjeg trenja i kohezija, ostaju nepromijenjeni.

## 5.2. Proračunski pristup

Za proračun stabilnosti kosine zasjeka prema normi HRN EN 1997-1:2012/NA (Eurokod 7) korišten je proračunski pristup PP3. Proračunske vrijednosti materijala za analizu graničnog stanja nosivosti izvede se iz karakterističnih vrijednosti uz primjenu parcijalnih koeficijenta sa tablice 12..

Tablica 12. Parcijalni koeficijenti za PP3

Parametar	Koeficijent	PP3
Parcijalni koeficijenti opterećenja $\gamma_r$		
Stalno nepovoljno djelovanje	$\gamma_G$	1.0
Promjenjivo nepovoljno djelovanje	$\gamma_Q$	1.3
Stalno povoljno djelovanje	$\gamma_G$	1.0
Promjenjivo povoljno djelovanje	$\gamma_Q$	0.0
Izvanredno djelovanje	$\gamma_A$	1.0
Parcijalni koeficijenti materijala $\gamma_m$		
$\tan \varphi'$	$\gamma_{\tan \varphi'}$	1.25
Efektivna kohezija $c'$	$\gamma_c$	1.25
Jedinična težina tla $\gamma$	$\gamma_Y$	1.0

## 5.3. Definiranje parametara čvrstoće osnovne stijenske mase GSI

U proračunima stabilnosti u kojima se stijena tretira kao kvazihomogena sredina, za definiranje parametara čvrstoće stijenske mase koriste se [19]:

- Rezultati laboratorijskih ispitivanja provedenih u skladu s ISRM (ISRM 1979 i 1985)
- Definirani indeks GSI na osnovu ulaznih podataka iz odgovarajućih tablica (Hoek i dr. 1992, Hoek i dr. 1995, Bienawski 1979)
- Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase (Hoek 1983, Hoek i Brown 1980 i 1988, Hoek i dr. 1992, Hoek i dr. 1995)

Na temelju rezultata dobivenih istražnim radovima određuje se vrijednost geološkog indeks čvrstoće GSI, prema dijelu geomehaničke klasifikacije RMR sistem (Bienawski 1989), koja uzima stanje podzemne vode kao „potpuno suho“, a ne uzima u obzir utjecaj pružanja i nagiba diskontinuiteta.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \left( \frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (6)$$

Konstante stijenske mase  $m_b$ ,  $s$  i  $a$  određuju se na osnovu geološkog indeksa čvrstoće GSI.

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad (7)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad (8)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (9)$$

Konstante stijenske mase  $m_b$  i  $s$  za poremećenu stijenu (miniranje i slobodne bočne deformacije prozrokovane iskopom) izračunavaju se preko koeficijenta  $D$ .

Klasifikacija parametara i pripadajuća vrijednost bodova (RMR) za GSI izvršena je prema pregledu zasjeka i prikazana u tablici 13.

Tablica 13. Geomehanička klasifikacija (RMR, eng. "rock mass rating")

Parametar	Područje vrijednosti	Broj bodova
Jednoosna tlačna čvrstoća	20 Mpa	2
Indeks kakvoće jezgre	<25%	3
Razmak diskontinuiteta	<0.06 cm	5
Stanje diskontinuiteta:		
duljina	> 20m	0
zijeve	0.1-1.0 mm	4
hrapavost	blago hrapave	3
ispuna	tvrda < 5mm	5
rastrošenost	srednje rastrošeni	3
Uvjeti stanja podzemne vode	Vlažno/suho	12

Za promatranu stijensku masu RMR= 37 bodova

$$GSI=RMR-5=37-5=32$$

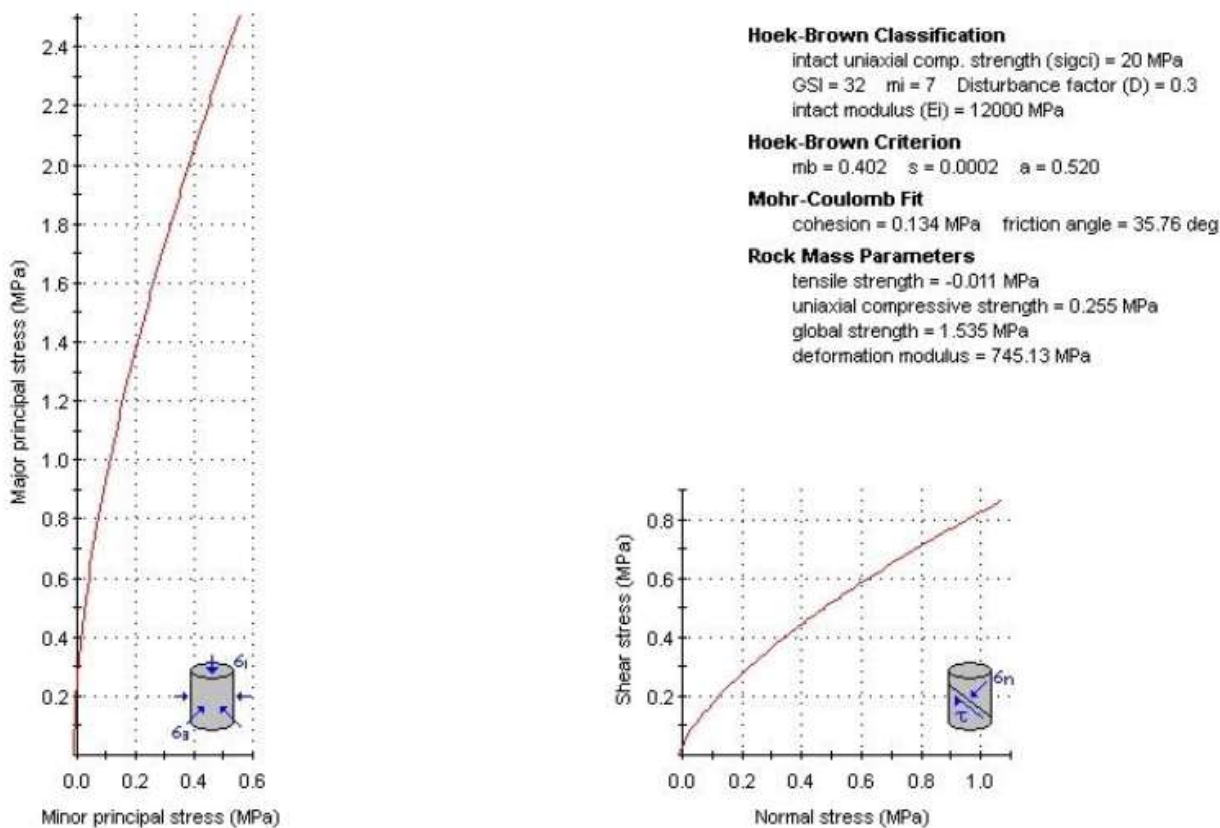
Proračn parametara stijenske mase proveden je programskim paketom RocLab, a rezultati su prikazani u tablici 14.



Tablica 14. Proračun parametara stijenske mase u RocLab-u

Hoek Brown clasification	
$\sigma_{ci}$	20 MPa
GSI	32
$m_i$	7
D	0.3
$E_i$	3500 MPa
Hoek Brown criterion	
$m_b$	0.402
s	2.2e-5
a	0.519
Failure Envelope Range	
Application	Slopes
$\sigma_{3,max}$	0.555 MPa
Unit weight	0.024 MN/m <sup>3</sup>
Slope height	20 m
Mohr-Coulomb fit	
c	0.134 MPa
$\phi$	35.76°
Rock mass parameters	
$\sigma_{gt}$	-0.011 MPa
$\sigma_{gc}$	0.255 MPa
$\sigma_{gcm}$	1.535 MPa
E <sub>m</sub>	745.13 MPa

Na slici 39. prikazani su rezultati proračuna parametara stijenske mase u RocLabu.



Slika 39. Rezultati proračuna parametara stijenske mase u RocLab-u ( $\sigma$ - $\tau$  dijagram)

#### 5.4. Definiranje parametara talusa GS2

Kao posljedica rastrošbe osnovne stijene u podnožju kosine stvara se zona nasutog materijala. Za potrebe proračuna stabilizacije kosine, odabrani su parametri kohezije i unutarnjeg trenja sloja:

$$c=5 \text{ kPa,}$$

$$\varphi=30^\circ,$$

$$\gamma=18 \text{ kN/m}^3$$

Na predmetnom zasjeku uočene su dvije geotehničke sredine s kojima se ulazi u proračun. To je područje osnovne stijene (geotehnička sredina 1 – GS1) i područje rastrošene, degradirane stijenske mase (geotehnička sredina 2 – GS2). Parametri kohezije i kuta unutarnjeg trenja za te dvije zone prikazani su u tablici 15.:

Tablica 15. Parametri stijenske mase

Geotehnička sredina	Karakteristične vrijednosti		Projektne vrijednosti	
	GS1(Osnovna stijenska masa)	$\varphi_k$ [°]	35	$\varphi_d=\arctg(\tg \varphi_k/1.25)$
$C_k$ [kPa]		130	$C_d=C_k/1.25$	104
GS2 (Talus-degradirani fliš)	$\varphi_k$ [°]	30	$\varphi_d=\arctg(\tg \varphi_k/1.25)$	24.79
	$C_k$ [kPa]	5	$C_d=C_k/1.25$	4

## 5.5. Projektna opterećenja

Projektna opterećenja korištena u proračunu su:

- Vlastita težina
- Potresno opterećenje

Podaci o seizmičnosti područja predmetne lokacije nalaze se u „Seizmološkoj karti Repblike Hrvatske“ izrađenoj od Geofizičkog zavoda Zagreb. Prema Seizmološkoj karti (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Državna geodetska uprava - Republika Hrvatska - karta potresnih područja) predmetna lokacija nalazi se u području za koje se predviđa maksimalna horizontalna akceleracija tla u iznosu  $a_{\max}=0,22g$ .

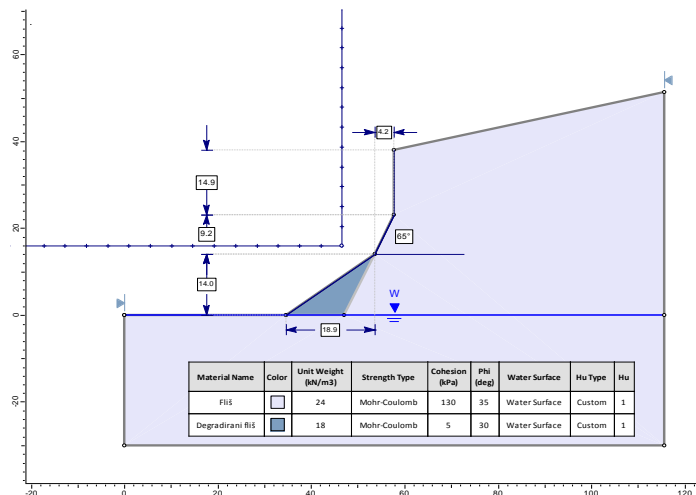
Kombinacije opterećenja korištene u proračunu:

- Osnovna
- Seizmička : Vlastita težina + potresno djelovanje (mjerodavno)

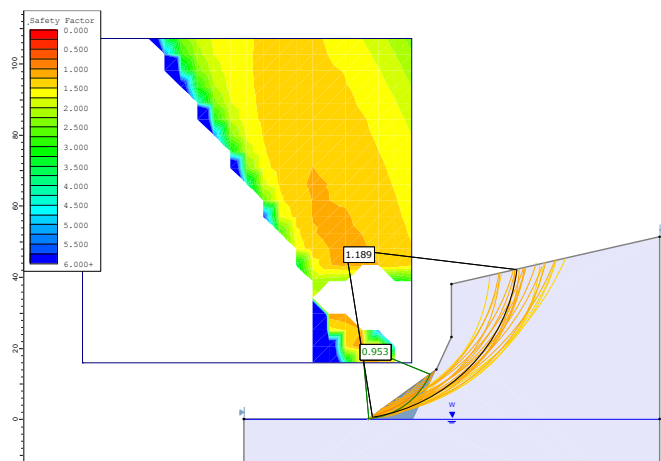
## 5.6. Rezultati analize globalne sigurnosti zasjeka

U nastavku su prikazani rezultati analize globalne sigurnosti zasjeka za periode  $\Delta T=0$ -trenutno stanje ( Slika 40.),  $\Delta T=5$  ( Slika 41.),  $\Delta T=10$  ( Slika 42.),  $\Delta T=20$  ( Slika 43.),  $\Delta T=50$  ( Slika 44.),  $\Delta T=100$  ( Slika 45.).

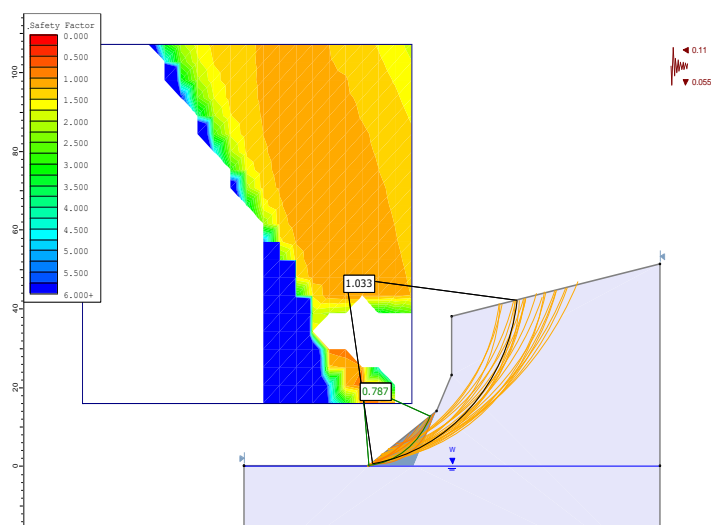
5.6.1.  $\Delta T=0$  godina



(a) Geometrija zaszeka.



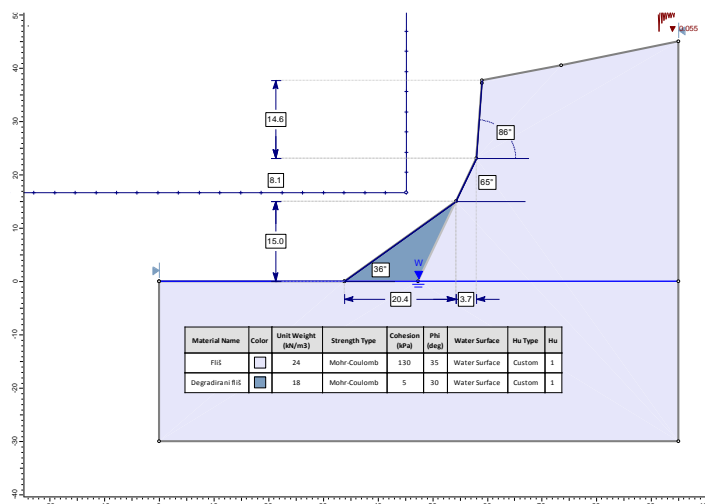
(b) Osnovna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,19 > F_{s,min}=1,0$ . Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.



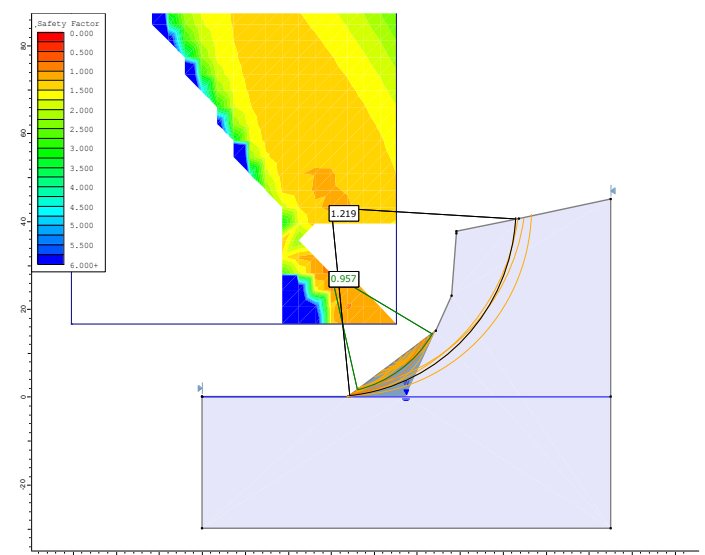
(c) Potresna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,03 > F_{s,min}=1,0$ . Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.

Slika 40. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=0$  god.

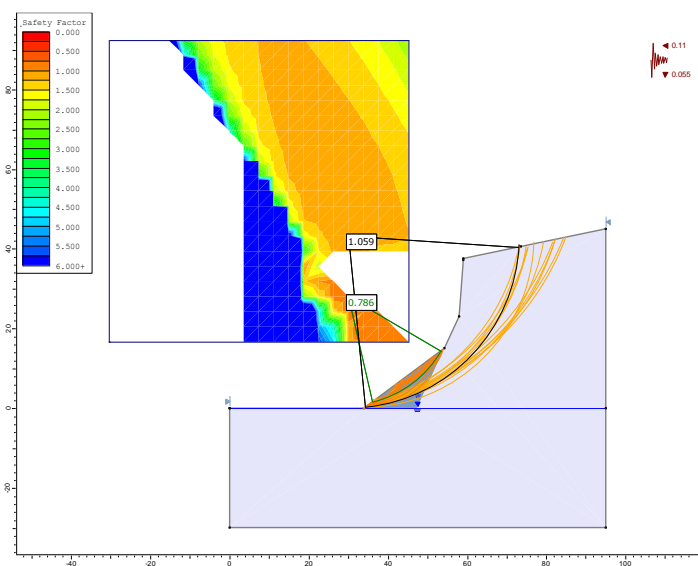
5.6.2.  $\Delta T=5$  godina



(a) Geometrija zasjeka.



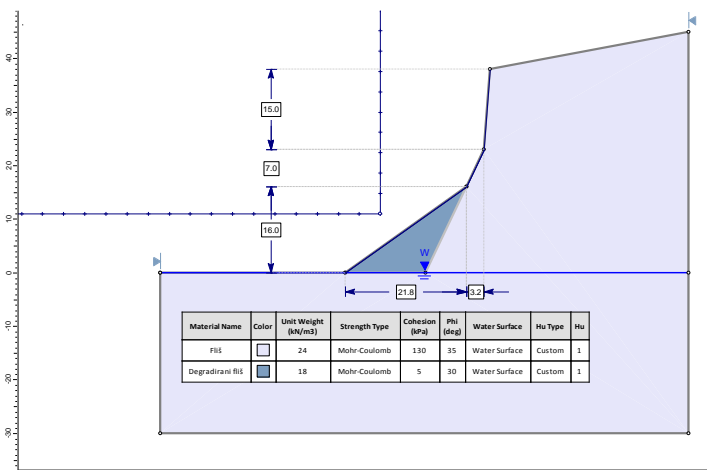
(b) Osnovna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,219 > F_{s,min}=1,0$ .  
Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.



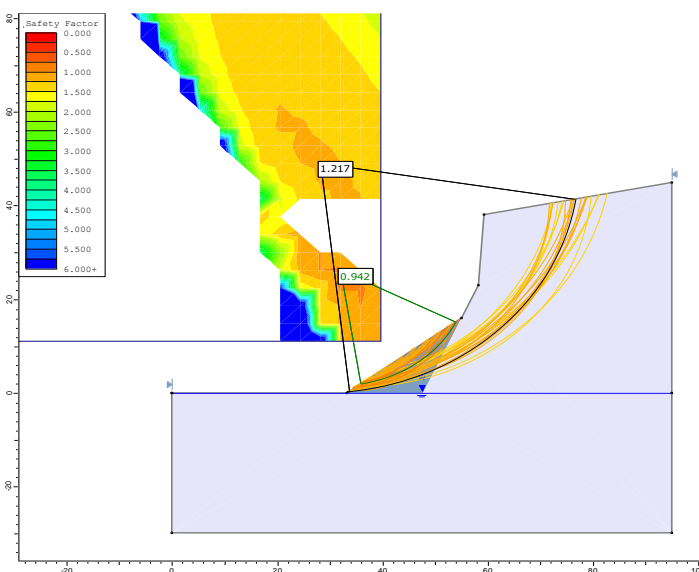
(c) Potresna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,059 > F_{s,min}=1,0$ .  
Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.

Slika 41. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=5$  god.

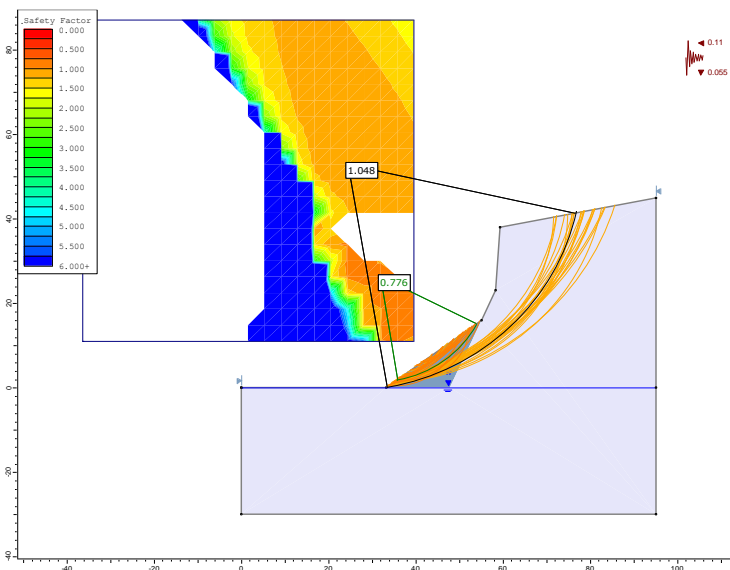
5.6.3.  $\Delta T=10$  godina



(a) Geometrija zasjeka.



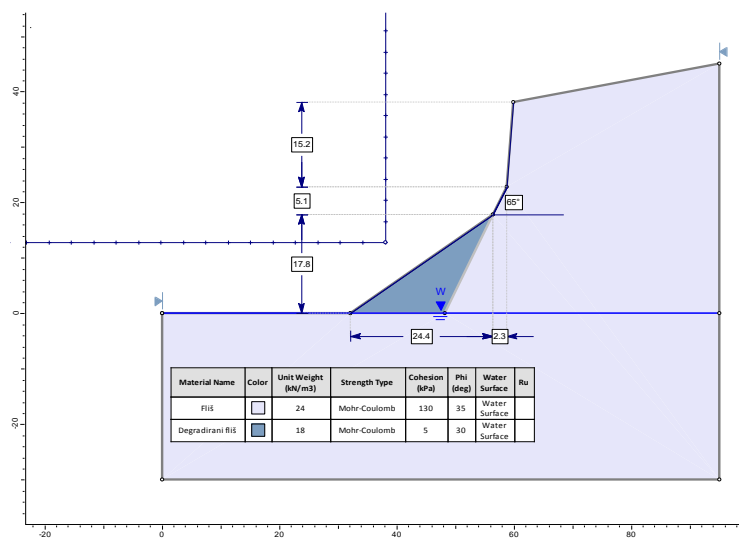
(b) Osnovna kombinacija opterećenja.  
 $F_s=1,217 > F_{s,min}=1,0$ .  
 Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.



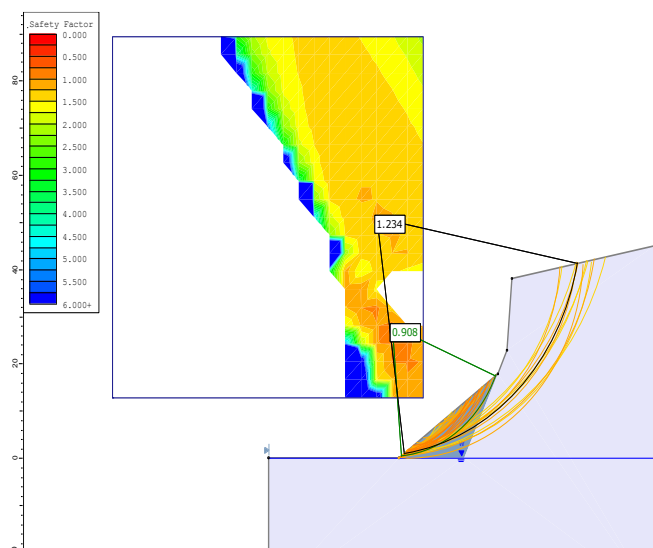
(c) Potresna kombinacija opterećenja.  
 $F_s=1,059 > F_{s,min}=1,0$ .  
 Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.

Slika 42. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=10$  god.

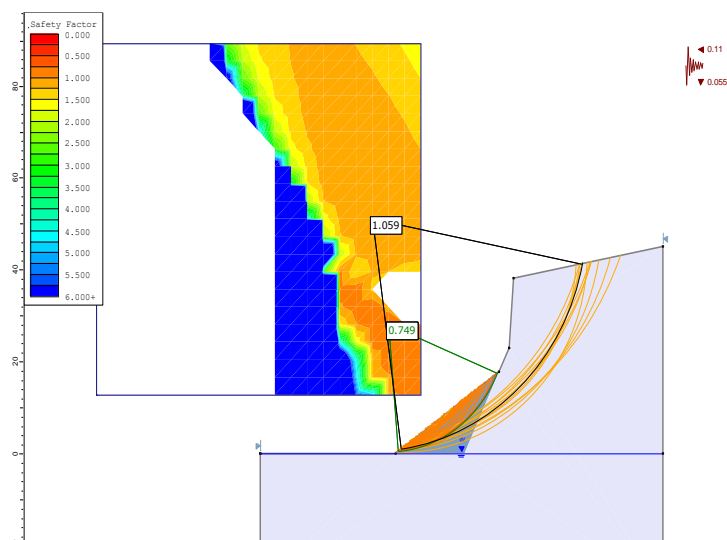
5.6.4.  $\Delta T=20$  godina



(a) Geometrija zasjeka.



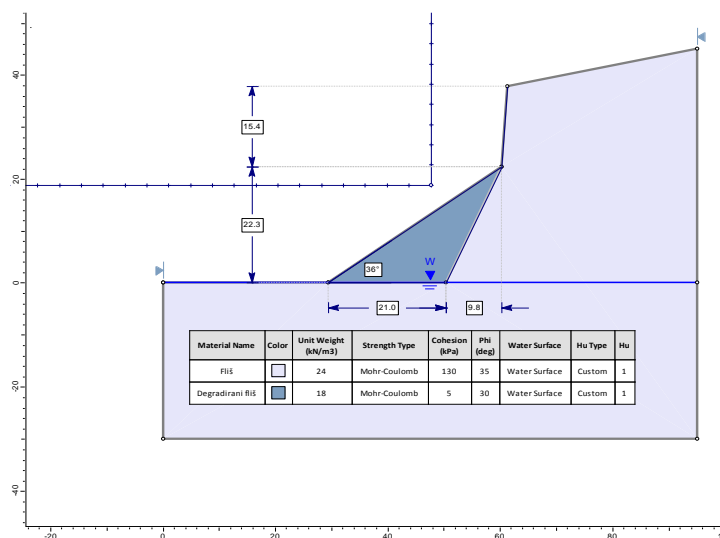
(b) Osnovna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,234 > F_{s,min}=1,0$ . Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.



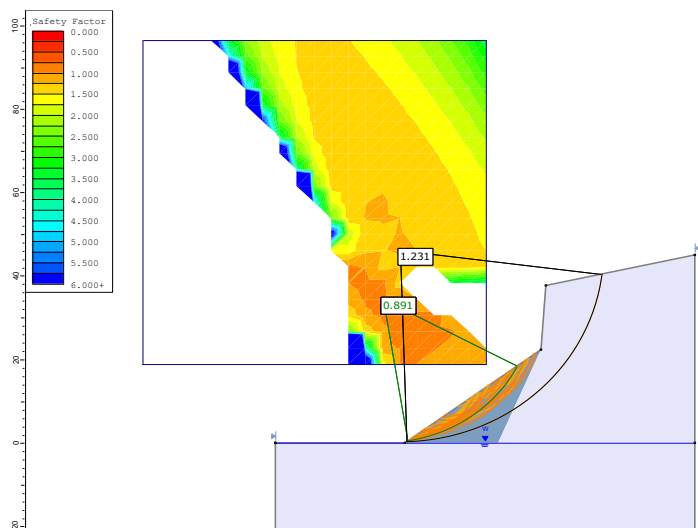
(c) Potresna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,059 > F_{s,min}=1,0$ . Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.

Slika 43. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=20$  god.

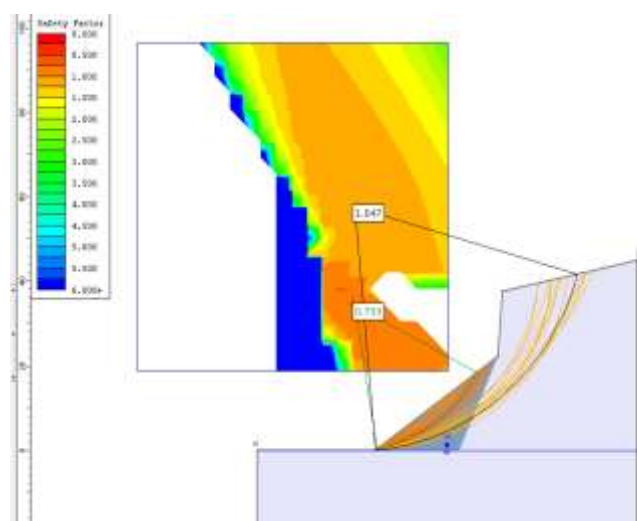
5.6.5.  $\Delta T=50$  godina



(a) Geometrija zasjeka.



(b) Osnovna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,231 > F_{s,min}=1,0$ . Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.

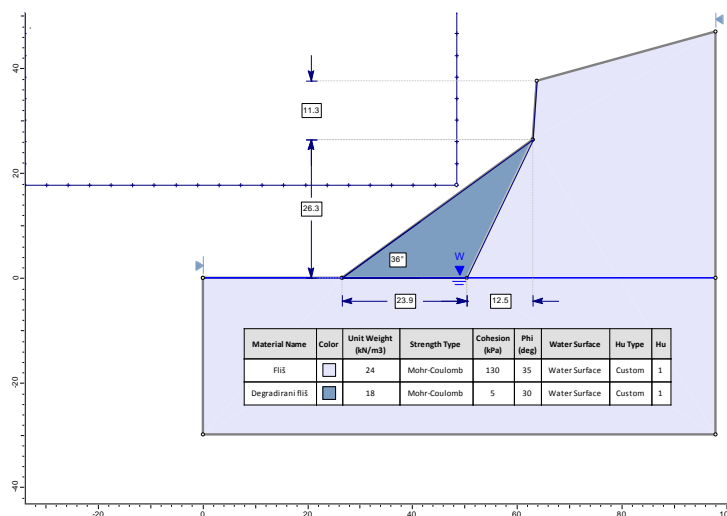


(c) Potresna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,047 > F_{s,min}=1,0$ . Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.

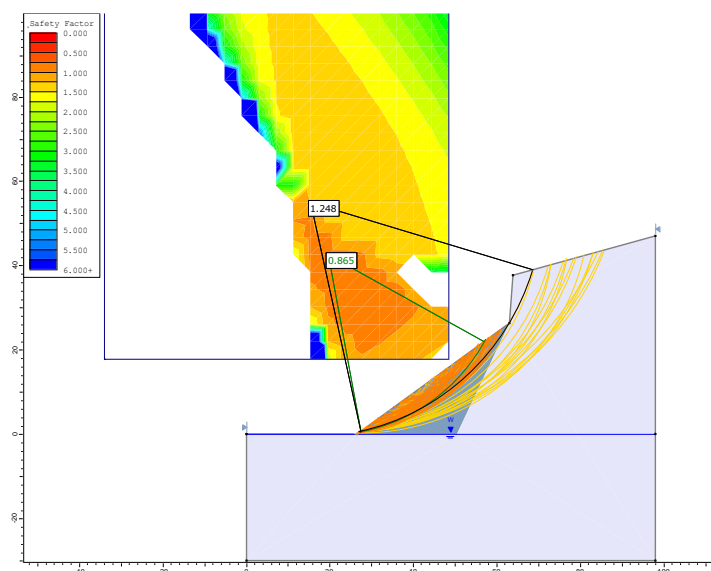
Slika 44. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=50$  god.



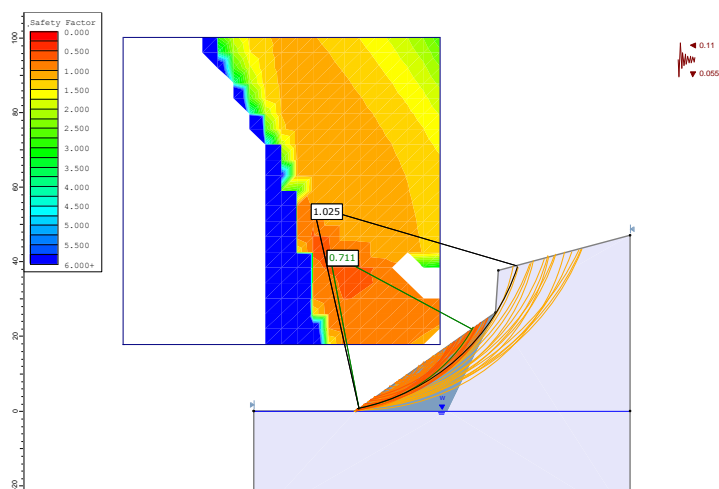
5.6.5.  $\Delta T=100$  godina



(a) Geometrija zasjeka.



(b) Osnovna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,248 > F_{s,min}=1,0$ . Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.



(c) Potresna kombinacija opterećenja.  $F_s=1,025 > F_{s,min}=1,0$ . Zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.

Slika 45. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=100$  god.

## 5.7 Diskusija

Proračun globalne sigurnosti kosine za osnovno i mjerodavno potresno opterećenje prikazani su u tablici 16..

Tablica 16. Rezultati kontrole stabilnosti kosine

Datum:	$\Delta T$ (god)	$F_{s,min}$	$F_s$ (osnovna stijenska masa) OSNOVNA KOMBINACIJA OPTEREĆENJA	$F_s$ (degradirani fliš - talus) OSNOVNA KOMBINACIJA OPTEREĆENJA	$F_s$ (osnovna stijenska masa) POTRESNA KOMBINACIJA OPTEREĆENJA	$F_s$ (degradirani fliš - talus) POTRESNA KOMBINACIJA OPTEREĆENJA
2017	0	1.0	1.19	0.95	1.03	0.79
2022	5	1.0	1.22	0.96	1.06	0.79
2027	10	1.0	1.22	0.94	1.05	0.78
2037	20	1.0	1.23	0.91	1.06	0.75
2067	50	1.0	1.23	0.89	1.05	0.73
2117	100	1.0	1.25	0.87	1.03	0.71

Globalni faktor sigurnosti za GS1 (osnovnu stijensku masu) zadovoljava globalni uvjet stabilnosti za svaki  $\Delta T$  za osnovnu i mjerodavnu potresnu kombinaciju opterećenja. Degradirani flišni materijal koji čini GS2 ne zadovoljava globalni faktor sigurnosti te je lokalno moguća pojava manjih površinskih klizišta u izvanrednim situacijama poput potresa. Zbog kontinuirane degradacija osnovne stijene, a time i stalnog povećavanja talusa u podnožju kosine ne postoji mogućnost trajnog osiguranja od pojave klizišta u GS2. Budući da talusna kosina ne zadovoljava faktor sigurnosti prema važećim normama, gabionskom barijerom potrebno je trajno spriječiti pristup van zone obuhvata.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu upotrebom Fisher-Lehmannovog matematičkog modela i usporedne analize erozije zasjeka na pilot lokaciji „Žnjan 1“ dana je prognoza promjene geometrije lica zasjeka u ovinosti o  $\Delta T$ . Za svaki vremenski korak, odnosno promjenu morfologije zasjeka izvedena je analiza odrona i kontrola globalne stabilnosti zasjeka.

Kao mjera zaštite od odrona odabrana je zaštitna barijera od gabiona visine 2 m koja se izvodi na 5 m udaljenosti od nožice sipara. Analizom potencijalne opasnosti od odrona u računalnom programu RocFall utvrđeno je da odabrana visina barijere zadovoljava parametre sigurnosti za projektirani vijek korištenja platoa od 50 godina. Za usporednu analizu koristili su se izlazni rezultati kao što su: trajektorije blokova, distribucija završnih točaka puta blokova, krajnje točke puta za 100% i 95% blokova te analiza rezultata ukupne kinetičke energije na udaru u barijeru.

U vremenskom rasponu između  $\Delta T=50$  godina i  $\Delta T=60$  godina, sipar erodiranog flišnog materijala ispunit će prostor do zaštitne barijere u visini od 30 do 40 cm unutrašnje strane gabiona te gabion visine 2 m više neće zadovoljavati parametre sigurnosti u pogledu zaštite od potencijalnog odrona. Stoga nakon 50 godina korištenja platoa potrebna je sanacija/rekonstrukcija zaštitne barijere od gabiona u vidu podizanja visine zaštitne barijere ili u vidu pomicanju trase barijere od nožice talusa. Iako se na prvi pogled najjednostavnijim čini uklanjanje dijela sipara iza barijere, na taj način zanemaruje se povoljan učinak talusnog materijala prilikom odrona. Degradirani fliš u obliku sipara apsorbira energiju odronjenih blokova pri udaru, značajno im smanjujući brzinu i odskočnu visinu (bouncing efekt). Iz tog razloga talusni materijal na dnu zasjeka nije preporučljivo ukloniti bez dodatne analize, kojom bi se ubuhvatio utjecaj uklanjanja sipara na promjenu koeficijenta restitucije.

## 7. LITERATURA

- [1] Žižić D., (2015.): Povijest industrije cementa u Dalmaciji : 150 godina suživota, Split: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, 2015.
- [2] WEB: Wikipedia, <https://bs.wikipedia.org/wiki/Vranjic>, Ivan T..
- [3] Eremut, A., Bartulović, H., Žižić, D. (2015): Revitalization of ex marlstone quarry in Majdan. Tusculum, Vol.8 No.1.
- [4] WEB: Google Maps, <https://www.google.com/maps/>.
- [5] Mišćević P., Vlastelica G., Štambuk Cvitanović N., (2017); Glavni geotehnički projekt uređenja napuštenog tupinoloma u Majdanu, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split.
- [6] Vlastelica G., Mišćević P., Pavić N.,(2016.): Mjerenje posmične čvrstoće meke stijene u uvjetima laboratorijski stimulirane rastrošbe, Građevinar 68/12, 955-965.
- [7] Mišćević P., (2015.): Inženjerska mehanika stijena, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split.
- [8] Vlastelica, G., Mišćević, P., Fukuoka, H. (2016): Monitoring of vertical cuts in soft rock mass, defining erosion rates and modelling time- dependent geometrical development of the slope. Proceedings of the Int Sym of the ISRM RMRE: From the Past to the Future, Ürgüp, Turkey, 29-31 August, 2016. Ulusay, R. et al. (eds.), London: Taylor & Francis Group, pp 1249-1254.
- [9] Toševski A., Grgec D., Padovan D. (2012): Osnovno o genezi, sastavu i trošenju eocenskog fliša hrvatskog obalnog pojasa. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. Vol. 25 str. 47-62 Zagreb.
- [10] Fisher O. (1866): On the disintegration of a chalk cliff, Geological Magazine.
- [11] Lehmann O. (1933): Morphologische Theorie der Verwitterung von Steinschlagwänden. Vierteljahrsschrift der Naturforschende Gesellschaft in Zurich.
- [12] Vlastelica G., Mišćević P., Biloš T., (2015): Opažanje i modeliranje erozije zasjeka u mekoj stijeni , Split, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split.
- [13] Mišćević P., Vlastelica G. (2011): Durability Characterization of Marls from the Region of Dalmatia, Croatia. Geotechnical and Geological Engineering: 29(5): 771-781.
- [14] Vlastelica, G., Pikelj, K., Kordić, B. "Erosional processes acting on coastal cliffs in the Split urban zone, Croatia", Revue Paralia, 4, pp. 79–84, 2017.

- [15] Vlastelica G., (2015): Utjecaj rastrošbe na trajnost zasjeka u mekoj stijeni, Doktorski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split.
- [16] Mišćević P., Vlastelica G.: Shear strength of artificially weathered marl. Proc. Reg. Sym. on Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering – Eurock 2010, Lausanne, Switzerland, 119-122. Leiden: CRC Press/Balkema, 2010.
- [17] Mišćević P., Vlastelica G.: Shear strength of weathered soft rock – proposal of test method additions. Proc. Reg. Sym. on Rock Eng. in Diff. Gr. Cond. – Eurock 2009, Cavtat, Croatia, 303-308. Leiden: CRC Press/Balkema, 2009.
- [18] Determining input parameters for a rockfall analysis, Article prepared for Roc News Fall 2003.
- [19] Vlastelica G., Mišćević P., Štambuk Cvitanović N., Glibota A. (2018.); Geomechanical aspects of remediation of quarries in the flysch: Case study of abandoned quarry in Majdan, Croatia. Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split.
- [20] Barić M., (2014): Kinematička analiza stabilnosti blokova stijenske mase na kosini., Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split.
- [21] WEB: RocFall Tutorial, <https://www.rocscience.com/rockfall/RocFallTutorial.pdf>
- [22] Wyllie, D.C. (2015): Rock Fall Engineering. CRC Press.
- [23] Mišćević, P., Vlastelica, G., Babić, M. (2018): Proračun gabionskog zida s armiranim zasipom na primjeru potporne konstrukcije za potrebe odmorišta „Vidikovac“ na otoku Braču. Građevinski fakultet, Sveučilište u Mostaru 8 (15), 29-39.
- [24] Mišćević P., Vlastelica G., (2012.): Stabilnost u vremenu kosine iskopane u laporu, Građevinar, 64/6, 451-461.
- [25] Peng B. (2000): Rockfall Trajectory Analysis - Parameter Determination and Application. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [26] Arbanas Ž., Grošić M., Udovič D., Mihalić S., (2012.): Rockfall Hazard Analyses and Rockfall Protection along the Adriatic Coast of Croatia, Građevinar, 6/3, 344-355.
- [27] Vlastelica, G., Mišćević, P., Štambuk Cvitanović, N. 2018. Durability of soft rocks in Eocene flysch formation (Dalmatia, Croatia), Engineering. Geology 245, 207-217.

[28] Huisman, M. (2006.): Assessment of rock mass decay in artificial slopes. Technische Universiteit Delft . Phd thesis

[29] Hutchinson, J.N. (1998.): A small-scale field check on the Fisher–Lehmann and Bakker–Le Heux cliff degradation models. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 913–926.

Norme:

HRN EN 1997-1:2012/NA ( Eurokod 7 - Geotehničko projektiranje, nacionalni aneks)

HRN EN 1998-5:2011 (Eurokod 8 – Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija; temelji, potporne konstrukcije i geotehnička pitanja)

Popis slika:

Slika 1. Pogled prema južnim padinama Kozjaka[24]

Slika 2. Karta položaja splitskih, vranjičkih, stobrečkih i rogozničkih tupinoloma[1]

Slika 3. Napušteni tupinolom Majdan (izvor: Google Maps)

Slika 4. Pogled na istočno lice zasjeka

Slika 5. Osnovna geološka karta za šire područje grada Splita[8]

Slika 6. Odronjeni blokovi vapnenačkog pješčenjaka

Slika 7. Karakteristike stijenske mase na istočnom zasjeku; heterogene flišne naslage sa slojevima čvrstih vapnenačkih pješčenjaka pri vrhu padine

Slika 8. Karta potresnih područja okoline Splita za povratni period od 475 godina

Slika 9. Dijagram toka procesa izračuna promjene geometrije lica zasjeka

Slika 10. a) Geološki profil Eocenskog fliša sa čvrstim vapnenačkim slojem;

b) Razvoj diferencijalne rastrošbe i odvajanje bloka rotacijom[5].

Slika 11. Vremenski tok promjene profila zasjeka za slučaj: a) ravnoteža erozije i rastrošbe; b) neravnoteže u korist rastrošbe [10]

Slika 12. Fisher-Lehmannov matematički model erozije vertikalnog zasjeka

Slika 13. Trenutno lice zasjeka,  $\Delta T=0$  god.

Slika 14. Lice zasjeka za  $\Delta T=5$  god.

Slika 15. Lice zasjeka za  $\Delta T=10$  god.

Slika 16. Lice zasjeka za  $\Delta T=20$  god.

Slika 17. Lice zasjeka za  $\Delta T=50$  god.

Slika 18. Lice zasjeka za  $\Delta T=100$  god.

Slika 19. Promjena geometrije lica zasjeka u vremenu

Slika 20. Dijagram toka analize odrona

Slika 21. Mehanizmi gibanja blokova po kosini

Slika 22. Kosi hitac

Slika 23. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=0$  god.(trenutno stanje)

- Slika 24. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=5$  god.
- Slika 25. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=10$  god.
- Slika 26. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=20$  god.
- Slika 27. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=50$  god.
- Slika 28. Grafički prikaz rezultata za  $\Delta T=100$  god.
- Slika 29. Promjena širine sipara u ovisnosti o  $\Delta T$ .
- Slika 30. Postotak blokova koji prijeđu barijeru u ovisnosti o  $\Delta T$ .
- Slika 31. Prikaz krajnje točke puta blokova bez barijere od nožice sipara u ovisnosti o  $\Delta T$
- Slika 32. Prikaz krajnje točke puta za 100% blokova sa barijerom u ovisnosti o  $\Delta T$
- Slika 33. Prikaz krajnje točke puta za 95% blokova sa barijerom u ovisnosti o  $\Delta T$
- Slika 34. Maksimalna energija udara u barijeru za 100% blokova u ovisnosti o  $\Delta T$
- Slika 35. Maksimalna energija udara u barijeru za 95% blokova u ovisnosti o  $\Delta T$
- Slika 36. Skica gabionskog zida (a) sa detaljem heksagonalne čelične mreže (b) [22]
- Slika 37. Primjer slaganja gabioske konstrukcije [22]
- Slika 38. Dijagram toka analize stabilnosti zasjeka
- Slika 39. Rezultati proračuna parametara stijenske mase u RocLab-u ( $\sigma$ - $\tau$  dijagram)
- Slika 40. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=0$  god.
- Slika 41. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=5$  god.
- Slika 42. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=10$  god.
- Slika 43. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=20$  god.
- Slika 44. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=50$  god.
- Slika 45. Analiza globalne sigurnosti kosine za  $\Delta T=100$  god.



Popis tablica:

Tablica 1. Parametri geometrije lica zasjeka

Tablica 2. Prikaz rezultata promjene geometrije lica zasjeka u vremenu.

Tablica 3. Koeficijenti restitucije podloge

Tablica 4. Koeficijenti restitucije podloge

Tablica 5. Početno ubrzanje i rotacija blokova

Tablica 6. Masa i oblik blokova

Tablica 7. Parametri zaštitne barijere

Tablica 8. Prikaz rezultata analize odrona

Tablica 9. Vrijednosti kinetičke energije prilikom udara bloka o barijeru

Tablica 10. Vrijednosti maksimalne energije udara za 100% blokova

Tablica 11. Energija udara o barijeru za 95% blokova u ovisnosti o  $\Delta T$

Tablica 12. Parcijalni koeficijenti za PP3

Tablica 13. Geomehanička klasifikacija (RMR, eng. "rock mass rating")

Tablica 14. Proračun parametara stijenske mase u RocLab-u

Tablica 15. Parametri stijenske mase

Tablica 16. Rezultati kontrole stabilnosti kosine

## 8. PRILOZI

### 7.1. Učinak barijere za $\Delta T=0$ godina – trenutno stanje

# Barrier Report

## Barrier Entity Properties

<b>Barrier Name</b>	Barrier 1
<b>Capacity</b>	Infinite
<b>Height</b>	2.00m
<b>Hits</b>	231 / 500 rocks

## Impact Statistics

Based on actual values for all impacted rocks.

	95% Percentile	Mean	Minimum	Maximum
Impact Along Height	1.40m	0.82m	0.44m	1.94m
Translational Velocity	7.09m/s	4.20m/s	0.30m/s	12.39m/s
Translation Energy	62.77kJ	27.00kJ	0.11kJ	191.85kJ

## Barrier Design

<b>Name</b>	RMC 050 ICAT/2
<b>Manufacturer</b>	Maccaferri
<b>Certification</b>	ETAG 027
<b>Rated Capacity</b>	500.0kJ
<b>Min Height</b>	3.0m
<b>Max Height</b>	3.5m

The modeled barrier height of 2.00m is smaller than barrier standard minimum height 3.00m. For non standard heights, please contact the producer.

Tested Values	Capacity	Elongation	Residual Height
MEL	534kJ	3.4m	60.5%
SEL	186kJ	2.70 m	74.7 %

## Verification per UNI 11211:4

Based on selected percentile for height and velocity of impacted rocks and supplied parameters.

Design Parameters			
Design Procedure		MEL	

Barrier Parameters			
Capacity	C	534.00	kJ
Maximum Elongation		3.40	m
Residual Height		60.5	%

Input Parameters				
Rock Mass	M	1000.00	kg	
Rock Density		2700.00	kg/m <sup>3</sup>	
Rock Volume		0.370	m <sup>3</sup>	
Avg. Rock Radius	R	0.446	m	
Separation Distance		0.00	m	
Free Border	f <sub>min</sub>	0.00	m	

Model Output				
Impact Along Height	H <sub>t</sub>	1.40	m	95 <sup>th</sup> percentile
Impact Velocity	V <sub>t</sub>	7.09	m/s	95 <sup>th</sup> percentile

Safety Coefficients				
Quality of topographic survey	Y <sub>dp</sub>	1.00		
Precision of block survey	Y <sub>vol</sub>	1.00		
Evaluation of the unit weight of rock	Y <sub>γ</sub>	1.00		
Reliability of rockfall simulation	Y <sub>Tr</sub>	1.00		
Impact energy	Y <sub>R</sub>	1.00		
Barrier capacity	Y <sub>E</sub>	1.00		
Barrier deformation	Y <sub>d</sub>	1.00		
Radius of block	Y <sub>Rb</sub>	1.00		

Design Parameters				
Design Mass	M <sub>d</sub>	1000.00	kg	M Y <sub>vol</sub> Y <sub>γ</sub>
Design Velocity	V <sub>d</sub>	7.09	m/s	V <sub>t</sub> Y <sub>Tr</sub> Y <sub>dp</sub>
Design Energy	E <sub>d</sub>	25.11	kJ	(0.5 M <sub>d</sub> V <sub>d</sub> <sup>2</sup> ) Y <sub>R</sub>
Design Impact Along Height	H <sub>d</sub>	2.34	m	H <sub>t</sub> Y <sub>Tr</sub> Y <sub>dp</sub> + R Y <sub>Rb</sub> + f <sub>min</sub>
Design Barrier Deformation	D <sub>d</sub>	3.40	m	D Y <sub>d</sub>
Design Barrier Height		2.00	m	H <sub>total</sub>
Design Barrier Capacity		534.00	kJ	E <sub>barrier</sub> / Y <sub>E</sub>

Verification		
Energy	25.11 <= 534.00	Valid
Height	2.34 > 2.00	Invalid
Elongation	3.40 > 0.00	Invalid

Residual Height				
Barrier Height		1.2	m	

## 7.2. Učinak barijere za $\Delta T=5$ godina

# Barrier Report

### Barrier Entity Properties

Barrier Name: Barrier 1  
 Capacity: Infinite  
 Height: 2.00m  
 Hits: 264 / 500 rocks

### Impact Statistics

Based on actual values for all impacted rocks.

	95% Percentile	Mean	Minimum	Maximum
Impact Along Height	1.68m	0.89m	0.46m	1.99m
Translational Velocity	7.15m/s	4.21m/s	0.34m/s	13.83m/s
Translation Energy	65.36kJ	27.35kJ	0.16kJ	208.48kJ

### Barrier Design

Name: RMC 050 ICAT/2  
 Manufacturer: Maccaferri  
 Certification: ETAG 027  
 Rated Capacity: 500.0kJ  
 Min Height: 3.0m  
 Max Height: 3.5m

The modeled barrier height of 2.00m is smaller than barrier standard minimum height 3.00m. For non standard heights, please contact the producer.

Tested Values	Capacity	Elongation	Residual Height
MEL	534kJ	3.4m	60.5%
SEL	186kJ	2.70 m	74.7 %

### Verification per UNI 11211:4

Based on selected percentile for height and velocity of impacted rocks and supplied parameters.

Design Parameters			
Design Procedure		MEL	

Barrier Parameters			
Capacity	C	534.00	kJ
Maximum Elongation		3.40	m
Residual Height		60.5	%

Input Parameters				
Rock Mass	M	1000.00	kg	
Rock Density		2700.00	kg/m <sup>3</sup>	
Rock Volume		0.370	m <sup>3</sup>	
Avg. Rock Radius	R	0.446	m	
Separation Distance		0.00	m	
Free Border	f <sub>min</sub>	0.00	m	

Model Output				
Impact Along Height	H <sub>t</sub>	1.68	m	95 <sup>th</sup> percentile
Impact Velocity	V <sub>t</sub>	7.15	m/s	95 <sup>th</sup> percentile

Safety Coefficients				
Quality of topographic survey	Y <sub>dp</sub>	1.00		
Precision of block survey	Y <sub>vol</sub>	1.00		
Evaluation of the unit weight of rock	Y <sub>γ</sub>	1.00		
Reliability of rockfall simulation	Y <sub>Tr</sub>	1.00		
Impact energy	Y <sub>R</sub>	1.00		
Barrier capacity	Y <sub>E</sub>	1.00		
Barrier deformation	Y <sub>d</sub>	1.00		
Radius of block	Y <sub>Rb</sub>	1.00		

Design Parameters				
Design Mass	M <sub>d</sub>	1000.00	kg	M Y <sub>vol</sub> Y <sub>γ</sub>
Design Velocity	V <sub>d</sub>	7.15	m/s	V <sub>t</sub> Y <sub>tr</sub> Y <sub>dp</sub>
Design Energy	E <sub>d</sub>	25.59	kJ	(0.5 M <sub>d</sub> V <sub>d</sub> <sup>2</sup> ) Y <sub>R</sub>
Design Impact Along Height	H <sub>d</sub>	2.63	m	H <sub>t</sub> Y <sub>tr</sub> Y <sub>dp</sub> + R Y <sub>Rb</sub> + f <sub>min</sub>
Design Barrier Deformation	D <sub>d</sub>	3.40	m	D Y <sub>d</sub>
Design Barrier Height		2.00	m	H <sub>total</sub>
Design Barrier Capacity		534.00	kJ	E <sub>barrier</sub> / Y <sub>E</sub>

Verification		
Energy	25.59 <= 534.00	Valid
Height	2.63 > 2.00	Invalid
Elongation	3.40 > 0.00	Invalid

Residual Height				
Barrier Height		1.2	m	

### 7.3. Učinak barijere za ΔT=10 godina

## Barrier Report

### Barrier Entity Properties

**Barrier Name:** Barrier 1  
**Capacity:** Infinite  
**Height:** 2.00m  
**Hits:** 278 / 500 rocks

### Impact Statistics

Based on actual values for all impacted rocks.

	95% Percentile	Mean	Minimum	Maximum
Impact Along Height	1.50m	0.86m	0.45m	2.00m
Translational Velocity	10.34m/s	4.68m/s	0.31m/s	14.54m/s
Translation Energy	133.52kJ	34.41kJ	0.12kJ	264.39kJ

### Barrier Design

**Name:** RMC 050 ICAT/2  
**Manufacturer:** Maccaferri  
**Certification:** ETAG 027  
**Rated Capacity:** 500.0kJ  
**Min Height:** 3.0m  
**Max Height:** 3.5m

The modeled barrier height of 2.00m is smaller than barrier standard minimum height 3.00m. For non standard heights, please contact the producer.

Tested Values	Capacity	Elongation	Residual Height
MEL	534kJ	3.4m	60.5%
SEL	186kJ	2.70 m	74.7 %

### Verification per UNI 11211:4

Based on selected percentile for height and velocity of impacted rocks and supplied parameters.

Design Parameters			
Design Procedure		MEL	

Barrier Parameters			
Capacity	C	534.00	kJ
Maximum Elongation		3.40	m
Residual Height		60.5	%

Input Parameters				
Rock Mass	M	1000.00	kg	
Rock Density		2700.00	kg/m <sup>3</sup>	
Rock Volume		0.370	m <sup>3</sup>	
Avg. Rock Radius	R	0.446	m	
Separation Distance		0.00	m	
Free Border	f <sub>min</sub>	0.00	m	

Model Output				
Impact Along Height	H <sub>t</sub>	1.50	m	95 <sup>th</sup> percentile
Impact Velocity	V <sub>t</sub>	10.34	m/s	95 <sup>th</sup> percentile

Safety Coefficients				
Quality of topographic survey	Y <sub>dp</sub>	1.00		
Precision of block survey	Y <sub>vol</sub>	1.00		
Evaluation of the unit weight of rock	Y <sub>Y</sub>	1.00		
Reliability of rockfall simulation	Y <sub>Tr</sub>	1.00		
Impact energy	Y <sub>R</sub>	1.00		
Barrier capacity	Y <sub>E</sub>	1.00		
Barrier deformation	Y <sub>d</sub>	1.00		
Radius of block	Y <sub>Rb</sub>	1.00		

Design Parameters				
Design Mass	M <sub>d</sub>	1000.00	kg	M Y <sub>vol</sub> Y <sub>Y</sub>
Design Velocity	V <sub>d</sub>	10.34	m/s	V <sub>t</sub> Y <sub>tr</sub> Y <sub>dp</sub>
Design Energy	E <sub>d</sub>	53.41	kJ	(0.5 M <sub>d</sub> V <sub>d</sub> <sup>2</sup> ) Y <sub>R</sub>
Design Impact Along Height	H <sub>d</sub>	2.45	m	H <sub>t</sub> Y <sub>tr</sub> Y <sub>dp</sub> + R Y <sub>Rb</sub> + f <sub>min</sub>
Design Barrier Deformation	D <sub>d</sub>	3.40	m	D Y <sub>d</sub>
Design Barrier Height		2.00	m	H <sub>total</sub>
Design Barrier Capacity		534.00	kJ	E <sub>barrier</sub> / Y <sub>E</sub>

Verification		
Energy	53.41 <= 534.00	Valid
Height	2.45 > 2.00	Invalid
Elongation	3.40 > 0.00	Invalid

Residual Height				
Barrier Height		1.2	m	

## 7.4. Učinak barijere za $\Delta T=20$ godina

# Barrier Report

### Barrier Entity Properties

Barrier Name: Barrier 1  
 Capacity: Infinite  
 Height: 2.00m  
 Hits: 299 / 500 rocks

### Impact Statistics

Based on actual values for all impacted rocks.

	95% Percentile	Mean	Minimum	Maximum
Impact Along Height	1.50m	0.88m	0.46m	1.97m
Translational Velocity	10.42m/s	5.07m/s	0.32m/s	15.13m/s
Translation Energy	135.70kJ	42.38kJ	0.13kJ	286.09kJ

### Barrier Design

Name: RMC 050 ICAT/2  
 Manufacturer: Maccaferri  
 Certification: ETAG 027  
 Rated Capacity: 500.0kJ  
 Min Height: 3.0m  
 Max Height: 3.5m

The modeled barrier height of 2.00m is smaller than barrier standard minimum height 3.00m. For non standard heights, please contact the producer.

Tested Values	Capacity	Elongation	Residual Height
MEL	534kJ	3.4m	60.5%
SEL	186kJ	2.70 m	74.7 %

### Verification per UNI 11211:4

Based on selected percentile for height and velocity of impacted rocks and supplied parameters.

Design Parameters			
Design Procedure		MEL	

Barrier Parameters			
Capacity	C	534.00	kJ
Maximum Elongation		3.40	m
Residual Height		60.5	%



Input Parameters				
Rock Mass	M	1000.00	kg	
Rock Density		2700.00	kg/m <sup>3</sup>	
Rock Volume		0.370	m <sup>3</sup>	
Avg. Rock Radius	R	0.446	m	
Separation Distance		0.00	m	
Free Border	f <sub>min</sub>	0.00	m	

Model Output				
Impact Along Height	H <sub>t</sub>	1.50	m	95 <sup>th</sup> percentile
Impact Velocity	V <sub>t</sub>	10.42	m/s	95 <sup>th</sup> percentile

Safety Coefficients				
Quality of topographic survey	Y <sub>dp</sub>	1.00		
Precision of block survey	Y <sub>vol</sub>	1.00		
Evaluation of the unit weight of rock	Y <sub>Y</sub>	1.00		
Reliability of rockfall simulation	Y <sub>Tr</sub>	1.00		
Impact energy	Y <sub>R</sub>	1.00		
Barrier capacity	Y <sub>E</sub>	1.00		
Barrier deformation	Y <sub>d</sub>	1.00		
Radius of block	Y <sub>Rb</sub>	1.00		

Design Parameters				
Design Mass	M <sub>d</sub>	1000.00	kg	M Y <sub>vol</sub> Y <sub>Y</sub>
Design Velocity	V <sub>d</sub>	10.42	m/s	V <sub>t</sub> Y <sub>tr</sub> Y <sub>dp</sub>
Design Energy	E <sub>d</sub>	54.28	kJ	(0.5 M <sub>d</sub> V <sub>d</sub> <sup>2</sup> ) Y <sub>R</sub>
Design Impact Along Height	H <sub>d</sub>	2.45	m	H <sub>t</sub> Y <sub>tr</sub> Y <sub>dp</sub> + R Y <sub>Rb</sub> + f <sub>min</sub>
Design Barrier Deformation	D <sub>d</sub>	3.40	m	D Y <sub>d</sub>
Design Barrier Height		2.00	m	H <sub>total</sub>
Design Barrier Capacity		534.00	kJ	E <sub>barrier</sub> / Y <sub>E</sub>

Verification		
Energy	54.28 <= 534.00	Valid
Height	2.45 > 2.00	Invalid
Elongation	3.40 > 0.00	Invalid

Residual Height				
Barrier Height		1.2	m	

## 7.5. Učinak barijere za $\Delta T=50$ godina

# Barrier Report

### Barrier Entity Properties

**Barrier Name** Barrier 1  
**Capacity** Infinite  
**Height** 2.00m  
**Hits** 493 / 500 rocks

### Impact Statistics

Based on actual values for all impacted rocks.

	95% Percentile	Mean	Minimum	Maximum
Impact Along Height	1.59m	0.98m	0.63m	1.98m
Translational Velocity	10.53m/s	7.04m/s	1.13m/s	13.54m/s
Translation Energy	138.56kJ	70.57kJ	1.60kJ	229.11kJ

### Barrier Design

**Name** RMC 050 ICAT/2  
**Manufacturer** Maccaferri  
**Certification** ETAG 027  
**Rated Capacity** 500.0kJ  
**Min Height** 3.0m  
**Max Height** 3.5m

The modeled barrier height of 2.00m is smaller than barrier standard minimum height 3.00m. For non standard heights, please contact the producer.

Tested Values	Capacity	Elongation	Residual Height
MEL	534kJ	3.4m	60.5%
SEL	186kJ	2.70 m	74.7 %

### Verification per UNI 11211:4

Based on selected percentile for height and velocity of impacted rocks and supplied parameters.

Design Parameters			
Design Procedure		MEL	

Barrier Parameters			
Capacity	C	534.00	kJ
Maximum Elongation		3.40	m
Residual Height		60.5	%

Input Parameters				
Rock Mass	M	1000.00	kg	
Rock Density		2700.00	kg/m <sup>3</sup>	
Rock Volume		0.370	m <sup>3</sup>	
Avg. Rock Radius	R	0.446	m	
Separation Distance		0.00	m	
Free Border	f <sub>min</sub>	0.00	m	

Model Output				
Impact Along Height	H <sub>t</sub>	1.59	m	95 <sup>th</sup> percentile
Impact Velocity	V <sub>t</sub>	10.53	m/s	95 <sup>th</sup> percentile

Safety Coefficients				
Quality of topographic survey	Y <sub>dp</sub>	1.00		
Precision of block survey	Y <sub>vol</sub>	1.00		
Evaluation of the unit weight of rock	Y <sub>γ</sub>	1.00		
Reliability of rockfall simulation	Y <sub>Tr</sub>	1.00		
Impact energy	Y <sub>R</sub>	1.00		
Barrier capacity	Y <sub>E</sub>	1.00		
Barrier deformation	Y <sub>d</sub>	1.00		
Radius of block	Y <sub>Rb</sub>	1.00		

Design Parameters				
Design Mass	M <sub>d</sub>	1000.00	kg	M Y <sub>vol</sub> Y <sub>γ</sub>
Design Velocity	V <sub>d</sub>	10.53	m/s	V <sub>t</sub> Y <sub>Tr</sub> Y <sub>dp</sub>
Design Energy	E <sub>d</sub>	55.42	kJ	(0.5 M <sub>d</sub> V <sub>d</sub> <sup>2</sup> ) Y <sub>R</sub>
Design Impact Along Height	H <sub>d</sub>	2.54	m	H <sub>t</sub> Y <sub>Tr</sub> Y <sub>dp</sub> + R Y <sub>Rb</sub> + f <sub>min</sub>
Design Barrier Deformation	D <sub>d</sub>	3.40	m	D Y <sub>d</sub>
Design Barrier Height		2.00	m	H <sub>total</sub>
Design Barrier Capacity		534.00	kJ	E <sub>barrier</sub> / Y <sub>E</sub>

Verification		
Energy	55.42 <= 534.00	Valid
Height	2.54 > 2.00	Invalid
Elongation	3.40 > 0.00	Invalid

Residual Height				
Barrier Height		1.2	m	

## 7.5. Podaci o analizi odrona u RocFall-u

### *RocFall Analysis Information*

#### *Project Summary*

---

File Name start\_sa bar.fal6

File Version 6.008

Date Created 22.1.2018., 16:24:39

#### *Project Settings*

---

##### General Settings:

Engine	Rigid Body
Units	Metric (m, kg, kJ)
Rock Throw Mode	Number of rocks controlled by seeder
Use Tangential CRSP Damping	Yes

##### Engine Conditions:

Maximum time per rock	3s
Maximum steps per rock	10000
Normal velocity cutoff	0.1m/s
Stopped velocity cutoff	0.1m/s
Maximum timestep	0.01s
Switch Velocity	-1e-009m/s

##### Random Number Generation:

Sampling Method	Monte-Carlo
Random Seed	Pseudo-random seed: 12345234

### ***Slope Geometry***

---

Vertex	X	Y	X Std.Dev.	Y Std.Dev.
1	0	0		
2	12.1131	0		
3	28.4331	0.134		
4	34.6341	0.367		
5	53.5141	13.966		
6	57.7341	23.126		
7	58.8131	37.2323		
8	58.5319	37.9648		
9	62.6821	38.257		
10	64.9071	40.056		
11	73.5901	40.5979		

### ***Slope Material Assignment***

---

Material	From Vertex	To Vertex
Plato	1	4
Talus	4	5
Fliš	5	11

## Material Properties

### Fliš

#### "Fliš" Properties

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.5	None			
Tangential Restitution	0.9	None			
Dynamic Friction	0.5	None			
Rolling Friction	0.4	None			

#### "Fliš" Advanced Properties

Forest and Vegetation Damping	Disabled
Scarring	Disabled
Viscoplastic Damping	Disabled

### Talus

#### "Talus " Properties

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.3	None			
Tangential Restitution	0.6	None			
Dynamic Friction	0.5	None			
Rolling Friction	0.6	None			

#### "Talus " Advanced Properties

Forest and Vegetation Damping	Disabled
Scarring	Disabled
Viscoplastic Damping	Disabled

### Plato

#### "Plato" Properties

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.25	None			
Tangential Restitution	0.55	None			
Dynamic Friction	0.4	None			
Rolling Friction	0.5	None			

#### "Plato" Advanced Properties

Forest and Vegetation Damping	Disabled
Scarring	Disabled
Viscoplastic Damping	Disabled

**Seeder 1****Seeder Properties**

Name	Seeder 1
Location	(58.6679, 37.6106)


**Rocks to Throw**

Number of Rocks	500 Overall
Rock Types	Group 1

**Initial Conditions**

	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0.2	None			
Vertical Velocity (m/s)	0	None			
Rotational Velocity (°/s)	0	None			
Initial Rotation (°/s)	0	Uniform		0	360

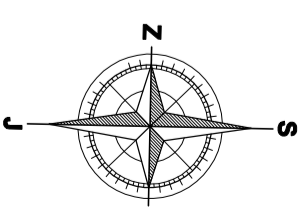
**Rock Types****Group 1****Properties**

Name	Group 1
Color	
Smooth Shapes	Sphere, Super Ellipse^4 (1:1), Super Ellipse^4 (5:6), Super Ellipse^4 (2:3), Super Ellipse^6 (2:3)
Polygons	None

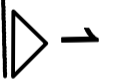
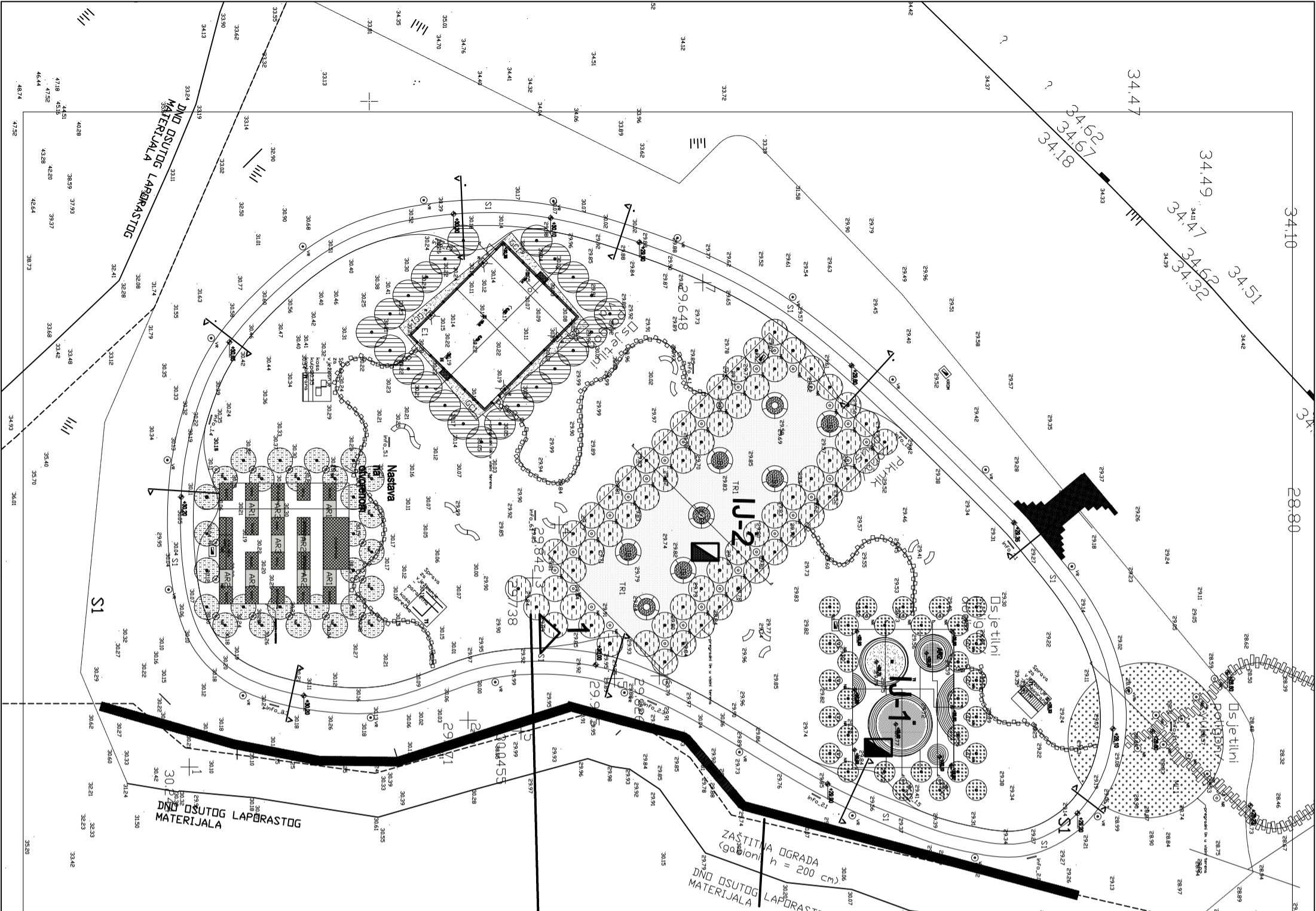
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	2500	None			
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2700	None			

## **7.6. Građevinska situacija – tupinolom Majdan**





# Zaštitna barijera GABIONI - postavljanje na 5m od nožice talusa



FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE SVEUČILIŠTE U SPLITU	
SADRŽAJ:	SITUACIJA MAJ DAN m 1:500
STUDIJ:	SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI 2018/2019
IZRADIO:	ANTE GLIBOTA
PREGLEDAO:	