

# Kinematička analiza stabilnosti blokova stijenske mase na kosini

---

**Barić, Milica**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2014**

*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:123:201771>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-19**

*Repository / Repozitorij:*



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



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

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

# **DIPLOMSKI RAD**

**Milica Barić**

**Split, 2014.**

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

**Milica Barić**

**Kinematička analiza stabilnosti blokova stijenske  
mase na kosini**

**Diplomski rad**

**Split, 2014.**

# **Kinematička analiza stabilnosti blokova stijenske mase na kosini**

## ***Sažetak:***

U ovom radu izvršena je kinematička analiza potencijalno nestabilnih blokova kosine. Na temelju identificiranih karakteristika nestabilnih blokova napravljen je dvodimenzionalni model te je izvršena simulacija odrona. Temeljem rezultata odabrana je metoda zaštite koja uključuje minimiziranje energije padajućeg bloka koristeći elastične barijere.

## ***Ključne riječi:***

Kinematička analiza, nestabilni blokovi, dvodimenzionalni model, elastične barijere

# **Kinematic analysis of the stability of the rock mass blocks on the slope**

## ***Abstract:***

This paper presents kinematic analysis of the rock instability. According to the identified characteristics of the unstable blocks two-dimensional model and simulation were made. Based on the obtained results, rockfall protection was chosen through minimizing the energy of the rockfall using flexible barriers.

## ***Keywords:***

Kinematic analysis, rock instability, two-dimensional model, flexible barriers

## Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....                                    | 3  |
| 1.1. Opis problematike.....                      | 3  |
| 1.2. Namjena rada .....                          | 3  |
| 1.3. Struktura rada .....                        | 4  |
| 2. TEORIJSKA PODLOGA .....                       | 5  |
| 2.1. Geološko geotehničko izvješće .....         | 5  |
| 2.1.1. Geološki uvjeti .....                     | 5  |
| 2.1.2. Terenska istraživanja.....                | 6  |
| 2.1.3. Geološke značajke.....                    | 6  |
| 2.1.4. Seizmološke značajke lokacije .....       | 8  |
| 2.2. Teorija stabilnosti kosina.....             | 8  |
| 2.2.1. Faktori utjecaja.....                     | 8  |
| 2.2.2. Mjere zaštite.....                        | 10 |
| 2.3. Odroni.....                                 | 11 |
| 2.3.1. Definicija i faktori utjecaja .....       | 11 |
| 2.4. Proračun stabilnosti odrona .....           | 13 |
| 2.4.1. Pretpostavke proračuna .....              | 14 |
| 2.4.2. Algoritam kosog hitca.....                | 15 |
| 2.4.3. Algoritam klizanja .....                  | 19 |
| 2.4.4. Klizanje prema dolje .....                | 19 |
| 2.4.5. Klizanje prema gore .....                 | 22 |
| 2.4.6. Brzina pri kojoj se kamen razbije .....   | 23 |
| 2.4.7. Sila koji prouzrokuje padajući blok ..... | 26 |
| 2.5. RocFall.....                                | 27 |
| 2.5.1. Analiza vjerojatnosti .....               | 27 |
| 2.5.2. Slučajne varijable.....                   | 28 |
| 2.5.3. Model čestice .....                       | 28 |
| 2.5.4. Algoritmi.....                            | 28 |
| 2.6. Poteškoće pri analizi odrona.....           | 29 |
| 2.6.1. Geometrija pokosa .....                   | 29 |
| 2.6.2. Svojstva materijala.....                  | 32 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.6.3. Početni uvjeti .....   | 35  |
| 3. ANALIZA PROBLEMA .....   | 35  |
| 3.1. Parametarska analiza .....                                       | 35  |
| 3.2. Analiza rezultata .....  | 55  |
| 3.2.1. Izračun energije pri kojoj dolazi do loma bloka .....          | 55  |
| 3.2.2. Rezultati RocFall-a .....                                      | 60  |
| 3.2.3. Izračun ekvivalentne statičke sile padajućeg bloka .....       | 68  |
| 3.3. Usporedba rezultata RocFall-a v5.0 .....                         | 70  |
| 3.4. Analiza rezultata RocFall-a v5.0 za prvi pukotinski sustav ..... | 76  |
| 4. RJEŠENJA PROBLEMA .....  | 85  |
| 4.1. Odabir zaštite – barijere.....                                   | 85  |
| 4.1.1. Elastične barijere.....  | 85  |
| 4.1.2. Prednosti i nedostaci .....                                    | 86  |
| 4.1.3. Standardizacija .....  | 87  |
| 4.1.4. Dimenzioniranje barijera.....                                  | 87  |
| 4.2. RocFall v4.0 – rješenje .....                                    | 88  |
| 4.3. RocFall v5.0 – rješenje .....                                    | 100 |
| 4.4. RocFall v5.0 – rješenje za prvi pukotinski sustav .....          | 102 |
| 5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK.....   | 107 |
| 6. LITERATURA.....  | 109 |

## 1. UVOD

### 1.1. Opis problematike

Jedan od glavnih uzroka problema duž jadranske obale koji su ugrožavali ljudske živote, gradove i prometnice su upravo odroni. Odron je gotovo trenutno odvajanje dijelova stijene zbog klimatskih, bioloških i antropogenih čimbenika.

Upravo taj fenomen predstavlja veliku opasnost za objekte i prometnice koji se nalaze u podnožju kosina. U posljednjem desetljeću događali su se odroni stijena značajnih dimenzija, stoga razlog proučavanja ovog fenomena nije iznenađujući, dapače, potreban je. Područje na kojem su izvršena istraživanja su Duće.

Odroni na vapnenačkim kosinama su uglavnom bili uzrokovani sa ne tako poželjnim procesima koji se događaju u stijenskim masama, a to su rastrošba („weathering“) u kombinaciji sa obilnim kišama te sama ljudska djelovanja.

U posljednje vrijeme započeti su projekti zaštite od odrona prvenstveno sa ciljem zaštite ljudskih života.

### 1.2. Namjena rada

Osnova ovog rada je kinematička analiza kosina i proučavanje nestabilnosti stijenskih masa. S obzirom na događaje koji su prethodili odnosno odroni koji su se već dogodili na području Duća i Omiša napravljeno je terensko istraživanje sa ciljem što boljeg utvrđivanja potencijalnih nestabilnih blokova. Ishod istraživanja je bio utvrditi najutjecajnije geološke i geotehničke karakteristike na stijensku masu i pokušati odrediti što su najčešći uzroci odrona.

Na temelju identificiranih karakteristika nestabilnih blokova izvršena je kinematička analiza koja je rezultirala trajektorijom gibanja padajućeg bloka.

Trajektorija gibanja, ukupna kinetička energija i visina odskoka ovise o geometriji pokosa, sastavu površine pokosa i karakteristikama padajućeg bloka. Na temelju svih tih podataka napravljen je dvodimenzionalni model te je izvršena simulacija odrona sa računalnim programom RocFall. Na temelju rezultata RocFall-a odlučujemo se za metodu zaštite koja

uključuje minimiziranje energije padajućeg bloka koristeći elastične barijere. U daljnjem tekstu svaka će komponenta i teorija koja je korištena za analizu biti detaljno objašnjena.

### **1.3. Struktura rada**

Rad je podijeljen na šest dijelova. U prvom uvodnom poglavlju je objašnjena namjena rada.

U drugom poglavlju je predstavljena teorijska podloga rada, od teorije stabilnosti kosina, geoloških uvjeta na lokaciji, definiciji problema odrona, programskog software-a koji je korišten pri proračunu, RocFall, te samim poteškoćama proračuna.

U trećem poglavlju je razrađena analiza problema. Izvršena je parametarska analiza te su prikazani rezultati proračuna.

U četvrtom poglavlju su predstavljene mjere zaštite te opisane elastične barijere kao jedan od načina zaštite od odrona. Opisani su prednosti i nedostaci elastičnih barijera, standardizacija te način dimenzioniranja barijera. Također, prikazana su i konkretna rješenja proučavanog problema.

Peto poglavlje je diskusija i zaključak, te na samom kraju literatura.



## 2. TEORIJSKA PODLOGA

### 2.1. Geološko geotehničko izvješće

#### 2.1.1. Geološki uvjeti

Odroni se u Hrvatskoj najčešće događaju u karbonatnim stijinama koje pripadaju jadranskoj karbonatnoj platformi ( Adriatic Carbonate Platform – AdCP ), najvećoj mezozoičkoj karbonatnoj platformi u peri mediteranskoj regiji. Najveći dio karbonatnih stijena su u hrvatskom dijelu krških Dinarida. Samo ostatci koji su sa kraja donje Jure pa do kraja Krede mogu pripadati AdCP.

Jadranska karbonatna platforma je uglavnom u potpunosti prekrivena. Jugozapadna margina platforme je prekrivena ostacima jadranskog mora i može biti proučavana samo geofizičkim metodama i istražnim bušotinama.

Sjeveroistočna margina platforme je djelomično izložena iako je većina dijelova prekrivena ostacima iz Paleozoika-Trijasa ili flišem iz kasne Krede-Paleogena ili Neogena i Kvarternim ostacima.

Karbonatne stijene koje čine većinu hrvatskog krša prekrivaju otprilike 23 % površine Hrvatske.

Formacija hrvatskog krša je uzrokovana tektonskim procesima praćenim rastrošbom karbonatnih stijena. Geološka stanja stijena u karbonatnom kršu su uvelike uvjetovana stupnjem rastrošbe i distribucijom tipične morfologije krških značajki. Pokrov je relativno tanak te su stijene uglavnom prekrivene gornjim slojem tla.

Trenutna struktura promatrane stijenske mase može se okarakterizirati kao stijenska masa eocenskog fliša prekrivena slojem breče, s naglaskom na flišnu podlogu (lapor) uz prisustvo rastrošbe odnosno erozije materijala i formiranje nestabilnih blokova.

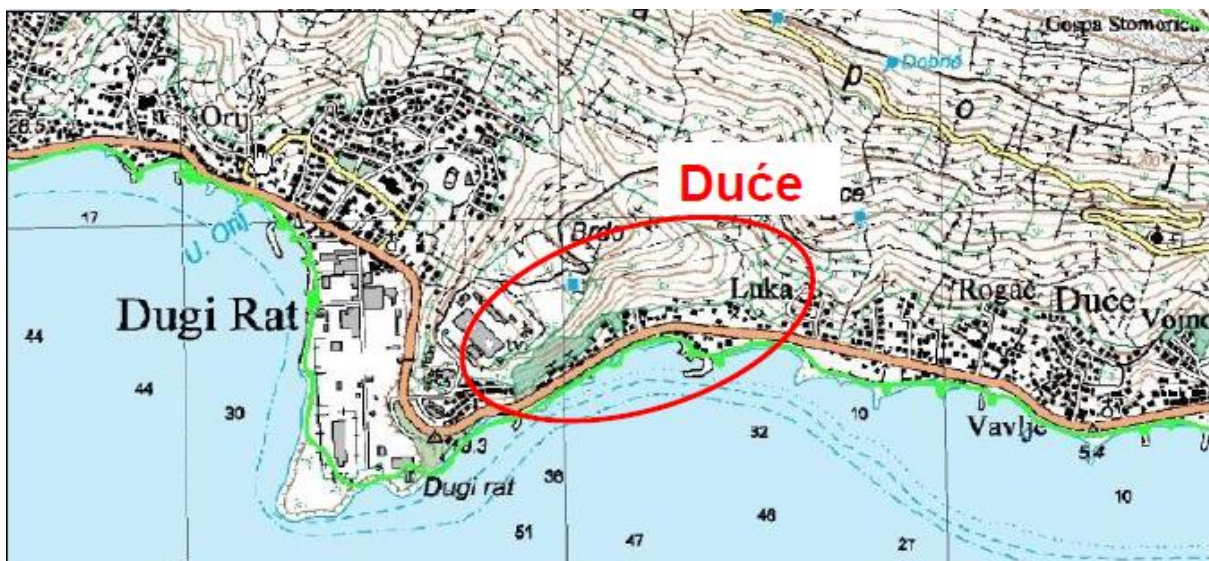
### 2.1.2. Terenska istraživanja

Terenski istražni radovi sastojali su se od istražnog bušenja na jednoj poziciji do dubine 10.0 m, mjereno od sadašnje površine terena.

Bušenje je obavljeno uz kontinuirano jezgrovanje, a sva izvađena jezgra podvrgnuta je terenskoj AC klasifikaciji i geološkoj determinaciji. Tijekom bušenja izvedeno je ispitivanje zbijenosti površinskih kvartarnih naslaga primjenom standardnog penetracijskog pokusa (SPP) (izvor: Geotehnički elaborat, Institut IGH d.d., studeni 2013.).

### 2.1.3. Geološke značajke

Predmetna lokacija se nalazi u Dućama kod Omiša. Teren na predmetnoj lokaciji izgrađuju flišne naslage srednjeg do gornjeg eocena ( $E_{2,3}$ ) - matična stijena koja je prekrivena slojem degradiranog (rastrošenog) fliša ( $Qel$ ) i slojem kvartarnih deluvijalnih naslaga ( $Qd$ ).



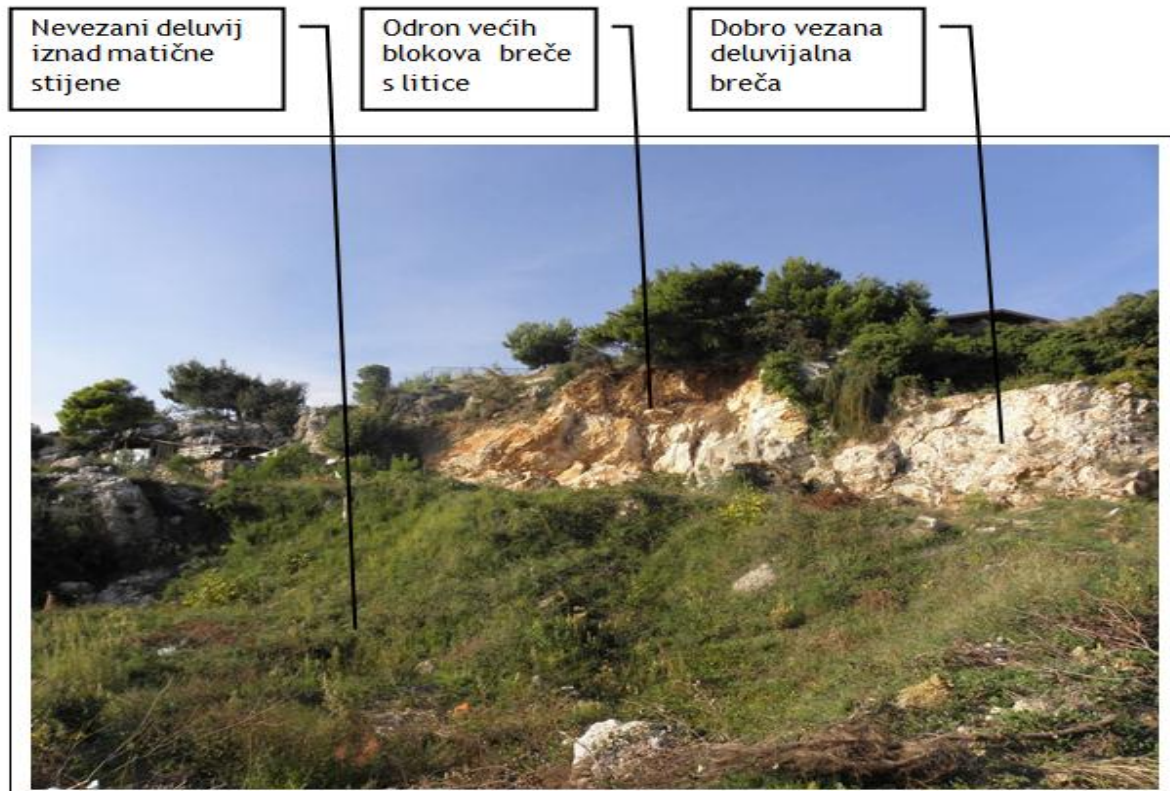
Slika 1. Predmetna lokacija (izvor: Geotehnički elaborat, Institut IGH d.d., studeni 2013.)

Istražnim bušenjem naslage matične stijene - fliša registrirane su na dubini 5.0 m – aps. kota 31.80 m n. m. (B-1).

Flišne naslage predstavljaju kompleks vrlo heterogenih naslaga s vrlo promjenjivim fizikalno - mehaničkim i inženjerskogeološkim značajkama kako vertikalno tako i lateralno. Sastavljene su od slojeva trošnih lapora, lapora s proslojcima laporovitog praha i vapnenačkih pješčenjaka sive boje.

Iznad naslaga matične stijene (interval 2.80 do 5.0 m), registriran je sloj degradiranog fliša (**Qel**), sastavljen od gline prašinate sivosmeđe boje, teško gnječive do polučvrste konzistencije, s učešćem stijenskog kršja. Povećanjem dubine glina postupno prelazi u trošne lapore. Na samom kontaktu deluvijalnih naslaga i degradiranog fliša registrirano je procjeđivanje vode, glinovite naslage su slabije konsolidirane.

Iznad naslaga degradiranog fliša, odnosno na površini terena do dubine 2.80 m registriran je sloj deluvijalnih naslaga sastavljenih od vapnenačkog kršja do manjih blokova vapnenca s učešćem glinovito - prašinate komponente (**Qd**). Ove naslage su mjestimično slabo vezane u deluvijalnu breču. Uz sjeverni rub lokacije deluvijalne naslage su dobro vezane u deluvijalnu breču te je uslijed selektivne erozije tla formiran strmi odsjek – litica visine cca 6 do 7 m. Sa ove litice povremeno dolazi do odrona manjih blokova kao i blokova stijene metarskih dimenzija (izvor: Geotehnički elaborat, Institut IGH d.d., studeni 2013.).



Slika 2. Predmetna lokacija (izvor: Geotehnički elaborat, Institut IGH d.d., studeni 2013.)

#### 2.1.4. Seizmološke značajke lokacije

Temeljno tlo se prema Eurocodu može svrstati u razred "A" po dokumentu (HRN EN, 1998-1-1:2012).

Razred „A“ je definiran kao: Stijena ili druga geološka formacija, uključujući i najviše 5 m najslabijeg materijala na površini. Brzina širenja poprečnih valova  $V_{s,30} \geq 800$  m/s.

Prema karti akceleracija za temeljno tlo – matičnu stijenu može se uzeti maksimalna akceleracija u iznosu  $a_{\max}=0.2$  g (izvor: Geotehnički elaborat, Institut IGH d.d., studeni 2013.).

## 2.2. Teorija stabilnosti kosina

S obzirom na geološke karakteristike terena gore već spomenute i opisane imamo zanimljiv efekt.

Naime, postoji velika razlika u litologiji terena, flišne naslage te slojevi (breče) vapnenca. Veliki problem u laporu je rastrošba koja se razvija na površini pokosa. Ona direktno ne utječe na stabilnost kosine no stvara probleme zbog objekata u podnožju. Rastrošba razvijena na površini pokosa više ima utjecaj na estetiku okoliša te na probleme s održavanjem radi funkcionalnosti objekata koji se nalaze na dnu kosine. Tijekom vremena dio kosine od površine prema unutrašnjosti nestaje. Taj proces ne mora imati značajniji utjecaj na globalnu stabilnost kosine, ali može na lokalnu stabilnost. Odnosno zbog različite brzine rastrošbe dolazi do diferencijalne rastrošbe po kosini. (P.Miščević i G.Vlastelica (2012.)) [2].

### 2.2.1. Faktori utjecaja

Nestabilnost kosine možemo objasniti koristeći interne parametre (IP) i eksterne faktore (EF) koji nam daju okvir unutar kojeg možemo pretpostaviti potencijalnu nestabilnost kosine. Da bi smo mogli detektirati nestabilnost potrebno je locirati procese prije sloma i područja koja su osjetljiva na brze promjene i opadanje čvrstoće što vodi do sloma (Jaboyedoff et al., 2005a; Leroueil and Locat, 1998). Interni parametri su osnovne značajke kosine.

Neke od značajki su:

A) morfologija: tip kosine (nagib, visina, profil, itd.) izloženost, način popuštanja (ovisi o kontroliranim erozivnim procesima), itd.

B) geologija: vrsta stijene i rastrošba, promjenjivost geološke strukture, vrsta pokrova

C) diskontinuiteti: pukotinski sustavi, razmak, duljina, itd.

D) mehanička svojstva tla i stijena : kohezija, kut trenja...

E) aktivnost : uočeni pomaci

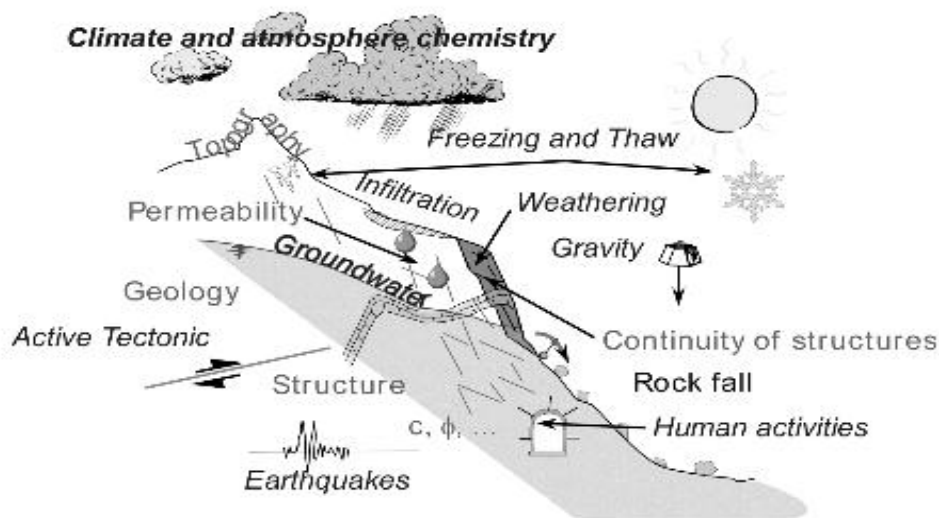
F) hidrogeologija

Unutarnji parametri razvijaju se s vremenom zbog učinka vanjskih faktora (EF), a to su (Jaboyedoff and Derron, 2005) :

- Utjecaj gravitacije
- Kruženje vode (infiltracija vode, podzemne vode...)
- Rastrošba (naglo vlaženje i sušenje...)
- Erozija
- Seizmička aktivnost
- Tektonika
- Ljudska djelovanja

Svi ovi parametri su samo od nekih koji su do sada uočeni kao pokretači i uzročnici nestabilnosti. Oni nam omogućuju bolji uvid u trenutna stanja kosina i upućuju nas na metode putem kojih analiziramo buduće odrone.





Slika 3. Faktori utjecaja (izvor: Jaboyedoff and Labiouse, 2003; Jaboyedoff and Derron, 2005)

### 2.2.2. Mjere zaštite

Metode zaštite kosina mogu bit aktivne (stabilizacija) koje sprječavaju neželjene događaje i pasivne (zaštitne mjere) koje minimiziraju već nastalu štetu [9].

Ta podjela može se opisati kao i kategorija zaštite koja sprječava da dođe do odrona poput sidrenja i prskanog betona ili kategorija koja pruža zaštitu kada je već došlo do odrona, najčešće barijere. U aktivne mjere zaštite spadaju: modifikacija geometrije terena, vanjska i unutarnja pojačanja. Pasivne mjere su barijere, galerije ili dijafragme. Uvijek je preporučljivo i zbog sigurnosnih i ekonomskih razloga primjenjivati aktivne mjere zaštite, naravno ukoliko se radi o tek formiranim kosinama, primjerice prilikom izgradnje nove infrastrukture. No, ukoliko se radi o prirodnoj kosini, kao što je naš slučaj moramo posegnuti za pasivnim mjerama zaštite jer niti jedna druga zaštita ne može zadovoljiti kriterije zaštite detektiranog problema.

Dakle, nastojanje je minimizirati štetu već nastalog odrona, a to će biti uz pomoć elastičnih barijera koje imaju adekvatnu sposobnost apsorpcije energije.

## 2.3. Odroni

### 2.3.1. Definicija i faktori utjecaja

Odron se može definirati kao stijenska masa koja se odvojila od kamene kosine sa malo ili bez posmičnih pomaka i pri tome je većina prijeđenog puta u zraku [4].

U stijenskoj masi se rijetko kada događa pojava globalne nestabilnosti (potpuni slom kroz stijensku masu). U stijenskoj masi najčešće se susreće pojava erozijske nestabilnosti (osipavanje sitnih odlomaka stijene) ili lokalne nestabilnosti (odroni dijelova stijenske mase - blokova).

Mogući scenariji su osipavanje sitnih odlomaka stijene, odron pojedinačnih dijelova stijene (blokovi) i kamene lavine (djelovanjem gravitacije dijelovi stijenske mase različitih dimenzija kreću se velikom brzinom niz pokos). Moguća je istovremena pojava navedenih scenarija.

Kad se blok odvoji od kosine on počinje slobodno padati, odskakivati, klizati ili kotrljati se.

Uzroci odrona mogu biti različiti, uključujući postojanje diskontinuiteta, utjecaj procjeđivanja vode - porni pritisak, klimatske promjene, rastrošba. Seizmička aktivnost uzrokovana potresima također može biti jedna od uzročnika. Odrone uvjetuju klimatski i biološki čimbenici.

Klimatski čimbenici su: povećanje pornog tlaka tijekom infiltracije oborina, erozija materijala tijekom jakih kiša, ciklusi smrzavanja-odmrzavanja te važenje i sušenje. Voda je jedan od ključnih faktora koji kontrolira stabilnost odrona.

Biološki čimbenici su: mrvljene i kemijsko raspadanje stijena, širenje pukotina uslijed rasta korijenja.

Antropogeni čimbenici se manifestiraju kroz građevinske radove kao što su zasijecanje ili nasipavanje, pri čemu se mijenja naponsko stanje u stijenskoj masi, pa novonastalo stanje naprezanja postaje prevladavajući čimbenik u povećanju nestabilnosti. Za vrijeme miniranja (čak i ako se vrlo pažljivo i kontrolirano izvede eksplozija) na stijensku masu djeluje visoki intenzitet kratkotrajne sile, te dolazi do usitnjavanja stijene i proširenja pukotina što povećava rizik od lokalne i erozijske nestabilnosti. Pod utjecajem te sile mogu se pokrenuti rizični blokovi i klinovi. Uklanjanje vegetacije može također utjecati na lokalnu i erozijsku nestabilnost.

U nekim slučajevima očita je opasnost od odrona (npr. nestabilan blok na vrhu pokosa). Međutim, najopasniji oblici sloma stijenske mase se događaju kada se blok iznenada oslobodi iz naizgled čvrste površine s malim deformacijama u okolnoj stijeni. 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.

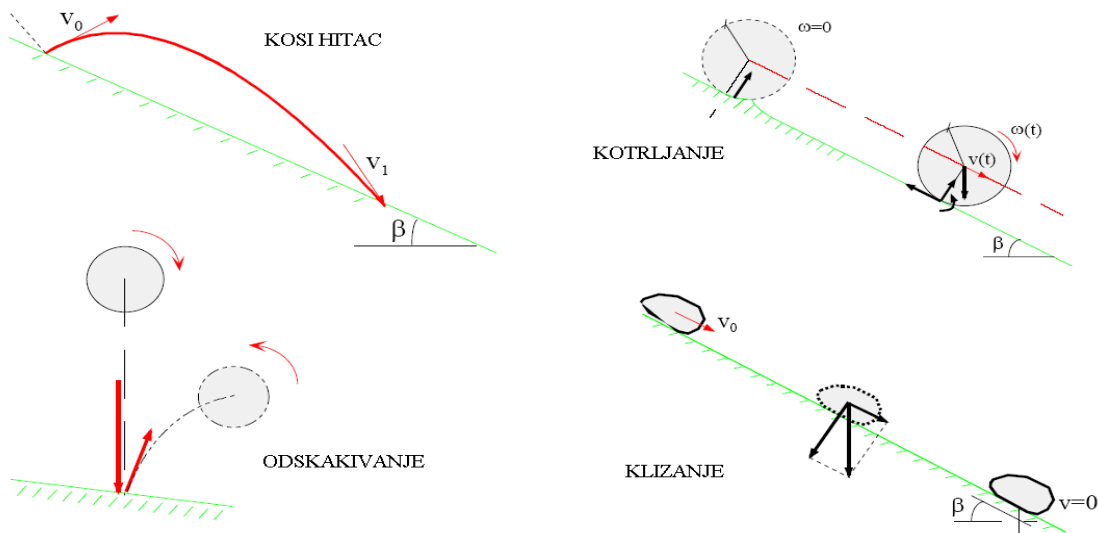
Dimenzije odronjenog bloka ovise o prostornom rasporedu diskontinuiteta, a mehanizam gibanja o orijentaciji diskontinuiteta. Čvrstoća stijene utječe na način gibanja bloka niz pokos. Duljina puta ovisi o veličini bloka, nagibu kosine, kompoziciji i sastavu terena.

U našem slučaju jedan od glavnih faktora koji uzrokuju odrone su jake kiše, rastrošba te smrzavanje. S obzirom da odgovarajući sistem vrednovanja opasnosti od odrona u Hrvatskoj nije razvijen, ne postoje preporuke kako određeni detektirani problem riješiti, stoga geotehnički inženjeri koriste iskustvo susjednih zemalja.



## 2.4. Proračun stabilnosti odrona

Mehanizmi gibanja blokova po pokosu mogu biti: kosi hitac (*falling*), odskakivanje (*bouncing*), klizanje (*sliding*) ili kotrljanje (*rolling*) [3].



Slika 4. Mehanizmi gibanja

Najvažniji faktor koji kontrolira putanju odronjenog bloka je geometrija pokosa. Prevjesi ili slični geometrijski oblici pokosa, npr. istake imaju djelovanje „ski-skakaonica“ i daju veliku horizontalnu komponentu brzine odronjenom kamenu uzrokujući njegov odskok daleko od nožice pokosa.

Čiste površine tvrde stijene, neoštećene vremenskim uvjetima ne usporavaju značajnije brzinu kretanja odronjenog ili kotrljajućeg kamena.

Međutim, površine prekrivene trošnim materijalom ili šljunkom apsorbiraju znatnu količinu energije udara odronjenog kamena i u nekim slučajevima mogu ga u potpunosti zaustaviti.

Svojstvo usporavanja površinskog materijala je izraženo preko **koeficijenta restitucije**. Vrijednost ovog koeficijenta ovisi o vrsti materijala koji formira površinu udara.

Čiste površine tvrde stijene imaju visoki koeficijent restitucije, dok tla i rastrošene stijene imaju nizak koeficijent restitucije.

Drugi čimbenici kao što su: veličina i oblik kamena, koeficijent trenja površine stijene i razbija li se stijena pri udaru na manje komade su manje značajni od geometrije pokosa i koeficijenta restitucije.

#### 2.4.1. Pretpostavke proračuna

Svaki blok je modeliran kao čestica koja se može shvatiti kao infinitezimalan krug, budući da veličina bloka nije ulazni parametar za algoritam. Smatra se da blokovi imaju masu koja je određena konstantnom vrijednosti. Masa se ne koristi u jednadžbama koje proračunavaju gibanje blokova, koristi se samo za proračun kinetičke energije prilikom izrade grafova i prikaza rezultata.

Masa se određuje na početku simulacije i ostaje konstantna tijekom simulacije. Blok se ne može razbiti ili podijeliti na više komada tijekom simulacije.

Međutim, proračunava se energija koja je potrebna da se blok razbije. Uspoređuju se rezultati proračuna sa izračunatom energijom te se određuje iznad koje mase ne promatramo rezultate jer dolazi do razbijanja bloka na manje dijelove.

Većina simulacija odrona služi kako bi se odredila trajektorija gibanja. Problem nije u simulaciji slobodnog pada, već kako što točnije modelirati interakciju između padajućeg bloka i površine kosine. Tu postoje dva načina simulacije. Prvi je da je masa bloka u jednoj točki te se ne uzima u obzir oblik i veličina bloka i rotacija, a drugi uzima u obzir veličinu i oblik bloka i uključuje rotaciju bloka.

Ipak bitno je za napomenuti, da sa znanstvenog stajališta važnost koeficijenta restitucije izraženog tako da se blok promatra kao čestica sa centrom mase u sredini je pomalo pa upitna. Objašnjenje proizlazi iz analiza gibanja bloka. Naime, postoje tri međusobno ovisna mehanizma gibanja: normalna translacija, tangencijalna translacija i rotacija. Pomalo je pa iluzorno modelirati taj problem sa samo dva koeficijenta restitucije i pri tome uzimati u obzir da se centar masa nalazi u sredini čestice [3]. No, ipak većina postojećih trajektorija odrona je ipak modelirana na takav način. Kako to navodi A.Volwein samo model u kojem kao pretpostavku uzimamo kruto tijelo te oblik tog tijela i koji u potpunosti uzimaju u obzir dodirnu površinu bloka i površine pokosa mogu se smatrati pravim modelima realnog odrona.

Također napominju da je ovaj fenomen kompleksan u toliko što ne ovisi samo o karakteristikama terena (čvrstoća, nagib terena...) već i o karakteristikama bloka (težina, oblik, veličina, čvrstoća) i kinematičkim uvjetima prije sudara (brzina, kut trenja, karakteristike bloka prilikom udara). Stoga, izrazito je važno znati i napomenuti da s obzirom da modeli koji tako objektivno prikazuju realno stanje i nisu toliko razvijeni već se uglavnom koristimo gore spomenutim pretpostavkama. Rezultati analize uvelike ovise o dobroj kalibraciji i odabiru parametara na temelju iskustva inženjera koji te iste parametre procjenjuju.

Otpor zraka nije uzet u obzir u jednadžbama. Pretpostavlja se da su blokovi dovoljno masivni i da se kreću dovoljno malim brzinama da se otpor zraka može zanemariti. Kada bi se otpor zraka uključio u jednadžbe, analiza bi postala mnogo složenija, a utjecaj na izlazne rezultate bi bio vrlo mali.

#### 2.4.2. Algoritam kosog hitca

Algoritam kosog hitca 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 pronađe točka sjecišta, proračunava se brzina nakon udara koristeći koeficijente restitucije.

Ako se, nakon udara, blok kreće brže od definirane minimalne brzine ( $v_{MIN}$ ) proces počinje ponovno i traži se sjecište putanje bloka i pokosa (*bouncing* - odskakivanje).

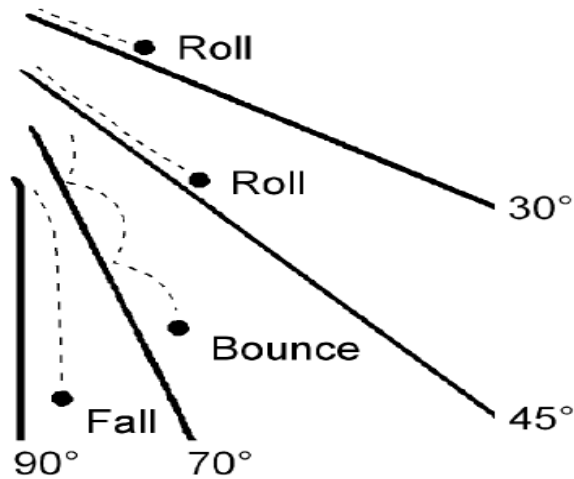
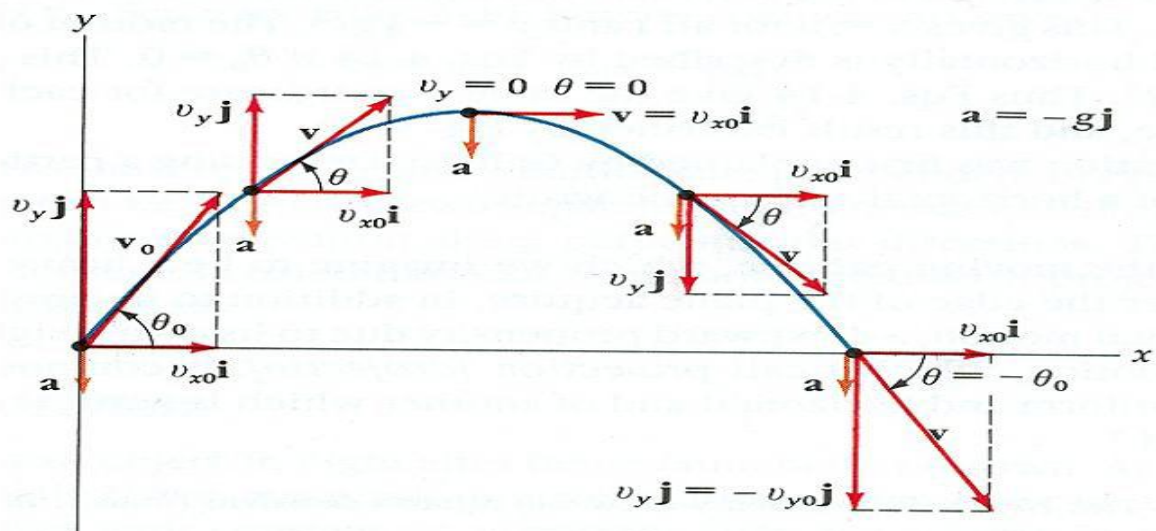


Figure 1 General modes of motion of rocks during their descent on slopes related to the mean slope gradients (modified from Ritchie, 1963 with permission of the Transport Research Board)

Slika 5. Mehanizmi gibanja ovisno o kutu padanja bloka (izvor: Luuk K.A. Dorren, 2003.)

Minimalna brzina ( $v_{MIN}$ ) definira prijelaz između stanja „kosog hitca“ i stanja u kojem se blok kreće presporo da bi se smatrao „kosim hitcem“ i umjesto toga se kotrlja, kliže ili zaustavlja.

Rezultati simulacije i vrijeme potrebno za proračun simulacije nisu osobito osjetljivi na promjene  $v_{MIN}$ .



Slika 6. Kosi hitac

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

Parametarska jednadžba pravca:

$$\begin{aligned}x &= x_1 + (x_2 - x_1)u \\y &= y_1 + (y_2 - y_1)u, \quad u \in [0,1]\end{aligned}$$

gdje su:

$x_1, y_1$  - prve krajnje točke pravca,  
 $x_2, y_2$  - druge krajnje točke pravca.

Parametarska jednadžba parabole:

$$\begin{aligned}x &= v_{x0}t + x_0 \\y &= \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0, \quad t \in [0, \infty]\end{aligned}$$

gdje:

$g$  - je akceleracija zbog gravitacije (s negativnim predznakom),  
 $x_0, y_0$  - određuju početni položaj bloka,  
 $v_{x0}, v_{y0}$  - određuju početnu brzinu bloka.

Parametarske jednadžbe za brzinu čestica:

$$\begin{aligned}v_{xB} &= v_{x0} \\v_{yB} &= v_{y0} + gt\end{aligned}$$

gdje su:

$v_{xB}, v_{yB}$  - brzine bloka u bilo kojoj točki parabole, prije udara.

Izjednačavanjem točaka parabole i jednadžbe pravca (tj.  $x=x$  i  $y=y$ ) i postavljanjem u poznati oblik  $a_x x^2 + b_x x + c = 0$  dobivamo:

$$\left[\frac{1}{2}g\right]t^2 + [v_{y0} - gv_{x0}]t + [y_0 - y_1 + g(x_1 - x_0)] = 0$$

gdje je nagib pravca:

$$q = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$$

Jednadžba se može riješiti po  $t$  prema formuli za rješenja (nul točke) kvadratne jednadžbe:

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

gdje su:

$$a = \frac{1}{2}g, \quad b = v_{y0} - qv_{x0}, \quad c = y_0 - y_1 + q(x_1 - x_0).$$

Nakon što je određeno sjecište, proračunavaju se brzine neposredno prije udara. Ove brzine se transformiraju u normalnu i tangencijalnu komponentu u odnosu na pokos prema izrazima:

$$v_{NB} = v_{yB} \cos\theta - v_{xB} \sin\theta$$

$$v_{TB} = v_{yB} \sin\theta + v_{xB} \cos\theta$$

gdje su:

$v_{NB}$ ,  $v_{BT}$  - normalna i tangencijalna komponenta brzine bloka, prije udara,  
 $\theta$  - nagib segmenta.

Brzine poslije udara se izračunavaju, koristeći koeficijente restitucije prema izrazima:

$$v_{NA} = R_N v_{NB}$$

$$v_{TA} = R_T v_{TB}$$

gdje je:

$R_N$  - koeficijent normalne restitucije, u rasponu od 0 do 1,

$R_T$  - koeficijent tangencijalne restitucije, u rasponu od 0 do 1,

$v_{NA}$ ,  $v_{TA}$  - normalna i tangencijalna komponenta brzine bloka, poslije udara.

Brzine poslije udara se transformiraju natrag u horizontalne i vertikalne komponente prema izrazima:

$$v_{XA} = v_{NA} \sin \theta + v_{TA} \cos \theta$$

$$v_{YB} = v_{TA} \sin \theta - v_{NA} \cos \theta$$

gdje su:

$v_{XA}$ ,  $v_{YA}$  - horizontalna i vertikalna komponenta brzine bloka, poslije udara.

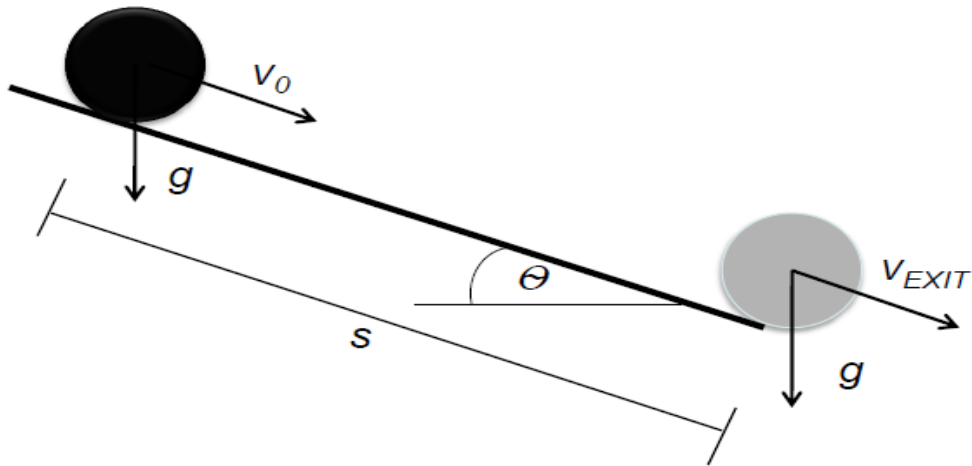
Zatim se proračunava brzina bloka i uspoređuje se s  $v_{MIN}$ . Ako je veća od  $v_{MIN}$  proces počinje iznova i traži se iduća točka sjecišta. Ako je brzina manja od  $v_{MIN}$  blok se više ne može smatrati česticom i koristi se algoritam klizanja.

### 2.4.3. Algoritam klizanja

Algoritam klizanja se koristi za proračunavanje gibanja blokova nakon što se na njih više ne može primjenjivati algoritam čestice. Blokovi se mogu klizati po bilo kojem segmentu pokosa. Za potrebe algoritma klizanja, segment pokosa ima svojstva: kut pokosa ( $\Theta$ ) i kut trenja ( $\varphi$ ). Kut trenja može biti zadan konstantnom vrijednošću ili slučajnom distribucijom. Blok može početi klizati na bilo kojoj poziciji duž segmenta i može imati početnu brzinu koja je usmjerena prema gore ili prema dolje. U jednadžbu se uzima u obzir samo tangencijalna komponenta brzine u odnosu na segment pokosa. Nakon što je klizanje pokrenuto, algoritam se koristi ovisno o tome da li je početna brzina prema gore ili prema dolje.

### 2.4.4. Klizanje prema dolje

Ako je početna brzina bloka usmjerena prema dolje (ili je nula), ponašanje bloka ovisi o veličini kuta trenja ( $\varphi$ ) i nagibu pokosa ( $\Theta$ ).



Slika 7. Klizanje prema dolje

$\Theta = \varphi$  Ako je nagib pokosa jednak kutu trenja, pokretačka sila (gravitacija) je jednaka sili otpora (trenje), te će blok skliznuti prema dolje na kraju segmenta  $s$  brzinom koja je jednaka početnoj brzini (tj.  $v_{EXIT}=v_0$ ).

Poseban slučaj je kada je  $v_0=0$ ; u tom slučaju blok se ne miče i simulacija završava.

$\Theta > \varphi$  Ako je nagib pokosa veći od kuta trenja, pokretačka sila je veća od sile otpora i blok će skliznuti sa segmenta  $s$  povećanom brzinom. Brzina kojom blok napušta segment pokosa izračunava se prema:

$$v_{EXIT} = \sqrt{v_0^2 - 2sgk}$$

Gdje je:

$v_{EXIT}$  - brzina bloka koju ima na kraju segmenta,

$v_0$  - početna brzina bloka, tangencijalna na pokos,

$s$  - udaljenost početne pozicije i krajnje točke segmenta,

$g$  - akceleracija zbog gravitacije ( $-9.81 \text{ m/s}^2$ ),

$k$  -  $\pm \sin(\Theta) - \cos(\Theta)\tan(\varphi)$ ,

$\Theta$  - nagib segmenta,

$\varphi$  - kut trenja segmenta,

$\pm$  - + ako je početna brzina bloka koja je prema dolje ili nula,



$\pm$  - - ako je početna brzina bloka koja je prema gore.

$\Theta < \varphi$  Ako je nagib pokosa manji od kuta trenja, sila otpora je veća od pokretačke sile i brzina bloka će se smanjiti. Blok se može zaustaviti na segmentu, ovisno o duljini segmenta i početnoj brzini bloka.

Uz pretpostavku da je segment beskonačno dug, računa se duljina nakon koje će se blok zaustaviti. Duljina se računa tako da se stavi da je izlazna brzina jednaka nuli u jednadžbi:

$$v_{EXIT} = \sqrt{v_0^2 - 2sgk} = 0$$

Iz čega slijedi:

$$s = \frac{v_0^2}{2gk}$$

Izračunava se udaljenost od početne pozicije do kraja segmenta.

Ako je duljina nakon koje će se blok zaustaviti veća od udaljenosti početne pozicije i kraja segmenta, blok će skliznuti na kraju segmenta.

U tom slučaju, izlazna brzina se računa prema:

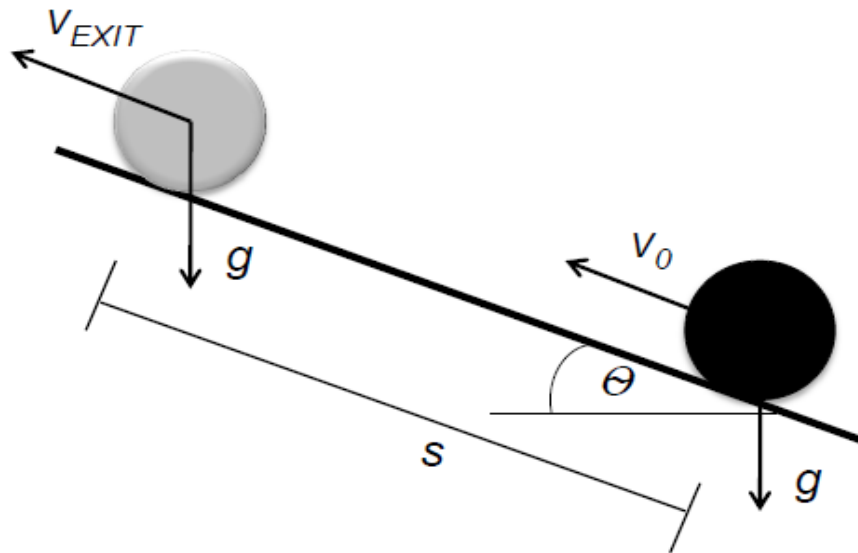
$$v_{EXIT} = \sqrt{v_0^2 - 2sgk}$$

U suprotnom, blok će se zaustaviti na segmentu i simulacija će se zaustaviti.

Pozicija gdje će se blok zaustaviti je udaljenost  $s$  od početne lokacije prema dolje.

### 2.4.5. Klizanje prema gore

Kod klizanja prema gore sila trenja i gravitacijska sila djeluju na smanjenje brzine čestice.



Slika 8. Klizanje prema gore

Uz pretpostavku da je segment beskonačno dug, čestica će se zaustaviti nakon što prijeđe put:

$$s = \frac{v_0^2}{2gk}$$

Ako je duljina zaustavljanja veća od udaljenosti do kraja segmenta, stijena će skliznuti s kraja segmenta. U tom slučaju, izlazna brzina se računa pomoću jednadžbe:

$$v_{EXIT} = \sqrt{v_0^2 - 2sgk}$$

Ako je duljina zaustavljanja manja od udaljenosti do kraja segmenta blok će se zaustaviti i simulacija će se zaustaviti.

Ako blok kliže prema gore i zaustavi se onda se na njega primjenjuje algoritam klizanja prema dolje.

Ako je segment dovoljno strm da dopusti klizanje (tj.  $\theta > \varphi$ ) tada će blok skliznuti s donjeg kraja segmenta.

Ako segment nije dovoljno strm, tada će se pozicija na kojoj se blok prestao kretati (nakon klizanja prema gore) uzeti kao konačna lokacija i simulacija će se zaustaviti.

#### 2.4.6. Brzina pri kojoj se kamen razbije

Sada kad su nam poznate brzine u proizvoljnim točkama izračunati ćemo pri kojoj brzini dolazi do razbijanja bloka na manje dijelove.

Polazimo od pretpostavke da do loma dolazi.

Jednadžba promjene količine gibanja je jednaka:

$$\Delta \vec{G} = \vec{G}_{prije} - \vec{G}_{poslje} = m * \vec{v}_{pr} - m * \vec{v}_{po} = m * \vec{v}_{pr} - m * 0 = m * \vec{v}_{pr}$$

$\Delta \vec{G}$  – količina gibanja (kgm/s = Ns)

$\vec{G}_{pr}$  – količina gibanja prije sudara (Ns)

$\vec{G}_{po}$  – količina gibanja nakon sudara (Ns)

m – masa kamena (kg)

$\vec{v}_{pr}$  – brzina prije sudara (m/s)

$\vec{v}_{po}$  – brzina nakon sudara (m/s)

Promjena količine gibanja je jednaka impulsu sile:

$$\Delta \vec{G} = \vec{F} * \Delta t$$

$\vec{F}$  – sila kamena (N)

$\Delta t$  – vrijeme sudara (s)

Vrijeme sudara određujemo iz puta koje tijelo napravi do sudara. Put sudara je jednak deformaciji koji tijelo napravi prilikom sudara.

$$\vec{s} = \vec{v}_{av} * \Delta t$$

$\vec{s}$  – put koji tijelo napravi za vrijeme sudara (m)

$\overline{v_{av}}$  – prosječna brzina tijela tijekom sudara (m/s)

$\Delta t$  – vrijeme sudara (s)

$$\overline{v_{av}} = \frac{\overline{v_{pr}} + \overline{v_{po}}}{2} = \frac{\overline{v_{pr}}}{2}$$

$\overline{v_{av}}$  – prosječna brzina tijela tijekom sudara (m/s)

$\overline{v_{pr}}$  – prosječna brzina tijela prije sudara (m/s)

$\overline{v_{po}}$  – prosječna brzina tijela nakon sudara (m/s)

Vrijeme sudara izrazimo preko puta koje je tijelo napravilo tijekom sudara:

$$\Delta t = \frac{\vec{s}}{\frac{\overline{v_{av}}}{2}}$$

Put koji tijelo napravi tijekom sudara jednako je deformaciji koju tijelo napravi tijekom sudara:

$$\vec{s} = \vec{R} * \varepsilon$$

$\vec{R}$  – polumjer kamena (m)

$\varepsilon$  – specifična deformacija pri sudaru

Prema tome je sada vrijeme sudara jednako:

$$\Delta t = \frac{\vec{R} * \varepsilon}{\frac{\overline{v_{pr}}}{2}} = \frac{2 * \vec{R} * \varepsilon}{\overline{v_{pr}}}$$

Promjena količine gibanja je jednaka:

$$\Delta \vec{G} = \vec{F} * \Delta t \rightarrow m * \overline{v_{pr}} = \vec{F} * \Delta t = \vec{F} * \frac{2 * \vec{R} * \varepsilon}{\overline{v_{pr}}}$$

$$m * \vec{v}_{pr} = \vec{F} * \frac{2 * \vec{R} * \varepsilon}{\vec{v}_{pr}}$$

Sada se može izračunati brzina pri kojoj dolazi do razbijanja kamena:

$$\vec{v}_{pr}^2 = \frac{2 * \vec{F} * \vec{R} * \varepsilon}{m}$$

Silu izrazimo preko naprezanja i specifične deformacije, a naprezanje izrazimo preko modula elastičnosti i specifične deformacije:

$$\vec{F} = \vec{\sigma} * A = \vec{E} * \varepsilon * A$$

Sljedi:

$$v_{pr}^2 = \frac{2 * \vec{E} * \varepsilon * A * \vec{R} * \varepsilon}{m}$$

A – površina poprečnog presjeka (m<sup>2</sup>)

m – masa kamena (kg)

$\rho$  – jedinična gustoća (kg/m<sup>3</sup>)

$$m = \rho * V = \rho * \frac{4 * \pi * R^3}{3}$$

$$A = \pi * R^2$$

$$\vec{v}_{pr}^2 = \frac{2 * \vec{E} * \vec{R} * \varepsilon^2 * A}{m} = \frac{2 * \vec{R} * \vec{E} * \varepsilon^2 * \pi * \vec{R}^2}{\rho * V} = \frac{2 * \vec{R} * \vec{E} * \varepsilon^2 * \pi * \vec{R}^2}{\rho * \frac{4 * \pi * \vec{R}^3}{3}}$$

$$\vec{v}_{pr}^2 = \frac{3 * \vec{E} * \varepsilon^2}{2 * \rho}$$

Brzina pri kojoj dolazi do razbijanja kamena je :

$$\vec{v}_{pr} = \sqrt{\frac{3 * \vec{E} * \varepsilon^2}{2 * \rho}}$$

$E$  – modul elastičnosti ( $\text{N/m}^2$ )

$\varepsilon$  – specifična deformacija

$\rho$  – jedinična gustoća ( $\text{kg/m}^3$ )

$R$  – polumjer kamena (m)

$v$  – brzina pri kojoj se kamen razbije (m/s)

Energija pri kojoj se kamen razbije:

$$W = \frac{m * v_{pr}^2}{2} = \frac{3}{4 * \rho} * m * E * \varepsilon^2$$

Iz gore navedenih jednadžbi vidljivo je da brzina pri kojoj dolazi do loma ovisi o modulu elastičnosti i specifičnoj deformaciji.

#### 2.4.7. Sila koji prouzrokuje padajući blok

Sila s kojim blok opterećuje objekt je:

$$\Delta \vec{G} = \vec{F} * \Delta t \rightarrow m * \vec{v}_{pr} - m * (-\vec{v}_{po}) = 2 * m * \vec{v}_{pr}$$

$$\vec{F} = \frac{2 * m * \vec{v}_{pr}}{\Delta t}$$

$m$  – masa kamena (kg)

$\vec{v}_{pr}$  – brzina bloka prije sudara (m/s)

$\Delta t$  – vrijeme sudara (s)

$\vec{F}$  – sila koju prouzrokuje padajući blok (N)

## 2.5. RocFall

Rocfall je računalni program jednostavan za korištenje koji obavlja vjerojatnosne simulacije odrona i može se koristiti za projektiranje barijera (ali i drugih mjera zaštite od odrona) i testiranje njihove učinkovitosti.

Rocfall na temelju ulaznih podataka (geometrije pokosa, karakteristike materijala pokosa, veličine bloka, početne pozicije bloka i početne brzine bloka) proračunava putanju odronjenog bloka i kao izlazne podatke daje brzinu, poziciju i kinetičku energiju bloka duž cijelog profila pokosa.

Izlazni grafički podaci koji prikazuju maksimalne brzine, kinetičku energiju i odskočnu visinu blokova duž cijelog profila pokosa korisni su prilikom odlučivanja o poziciji sustava zaštite.

Program izlazne rezultate daje i u obliku histograma koji prikazuju raspodjelu brzine, kinetičke energije i odskočne visine blokova u odnosu na bilo koju lokaciju duž profila pokosa. Histogrami su korisni pri projektiranju sustava zaštite (npr. pri odabiru kapaciteta barijera).

Naime, tijekom analize korištene su dvije različite verzije programskog software-a RocFall. Osnovna razlika je u modelu čestice. U odjeljku „Pretpostavke proračuna“ objašnjena razlika između dva načina modeliranja čestice. Svrha je utvrditi kakve utjecaje na rezultate proračuna imaju ta dva različita načina modeliranja.

### 2.5.1. Analiza vjerojatnosti

Korištenje probabilističkih simulacija odrona u kombinaciji s pravilnim statističkim analizama pokazalo se kao učinkovit i prihvatljiv način za rješavanje nesigurnosti oko ulaznih parametara i osjetljivosti proračuna na te parametre, te su se razvili različiti računalni programi koji izvode veliki broj analiza i kao rezultat daju probabilističke rezultate.

Najpoznatiji takav program je RocFall.

Ako koeficijent restitucije ili neki drugi parametar nije dovoljno poznat, ali se može odrediti očekivani raspon vrijednosti, može se izvesti velik broj analiza.

Nasumičnim odabirom vrijednosti iz očekivanog raspona, za parametar koji nije dovoljno poznat, može se izvesti velik broj analiza i stvoriti raspodjela rezultata na temelju korištenog

raspona ulaznih podataka. Statističkom analizom raspodjele mogu se dobiti probabilistički rezultati.

### 2.5.2. Slučajne varijable

Za potrebe analiza vjerojatnosti omogućeno je određivanje ulaznih parametara ili kao konstantnih vrijednosti ili kao slučajnih varijabli.

Masa bloka, početna pozicija bloka, pozicija svake karakteristične točke pokosa, koeficijent restitucije i kut trenja (za svaki segment pokosa i za svaku barijeru) mogu biti definirani kao slučajne varijable.

Svaka distribucija je određena odvojeno i svaka je neovisna o ostalima.

Slučajna distribucija omogućava izvođenje analiza osjetljivosti bilo kojeg ulaznog parametra što je vrlo korisno pri odabiru najučinkovitijeg i najekonomičnijeg sustava zaštite.

Jedini parametar kojem se ne može dodijeliti distribucija je pozicija barijere koja je obično unaprijed definirana od strane projektanta.

### 2.5.3. Model čestice

RocFall v4.0. koristi analizu čestice za izračunavanje putanje odronjenog bloka.

Model čestice je prilično grub model fizikalnih procesa odrona koji zanemaruje učinak koji veličina, oblik i kutni moment čestice imaju na ishod analize.

Međutim, prednost ovog modela je brzina proračuna, te je time omogućeno provođenje analiza osjetljivosti.

RocFall v5.0. koristi model u kojem je oblik i veličina bloka uzeta u obzir.

Budući da je ulazne podatke za većinu analiza odrona teško precizno definirati, jednako je važno odrediti o kojem ulaznom podatku najviše ovise rezultati analize kao i same rezultate.

### 2.5.4. Algoritmi

Program koristi dva algoritma: Algoritam kosog hitca i Algoritam klizanja.



Algoritam kosog hitca se koristi za proračunavanje kretanja bloka, dok blok putuje kroz zrak, odskoče iz jedne točke pokosa na drugu.

Algoritam klizanja se koristi za proračunavanje kretanja bloka dok je blok u kontaktu s pokosom.

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.

## 2.6. Poteškoće pri analizi odrona

- Pokosi na kojima postoji opasnost od odrona često imaju vrlo varijabilnu geometriju.
- Lokacija i masa bloka koji će, eventualno, postati odron su neizvjesne. Materijal pokosa može značajno varirati od jednog do drugog dijela padine i bitna svojstva materijala su obično nedovoljno poznata.
- Jednadžbe koje se koriste za simulaciju odrona su osjetljive na male promjene u tim parametrima.

Odgovornost za osjetljivost simulacija na male promjene u navedenim parametrima ne leži u potpunosti u kompjuterskom programu ili jednadžbama koje se koriste; i fizikalni procesi odrona su također osjetljivi na male promjene u tim parametrima.

### 2.6.1. Geometrija pokosa

Iz ekonomskih, ali i praktičnih razloga nije moguće izvršiti prospekciju na svim poprečnim presjecima duž pokosa na kojem postoji opasnost od odrona, već samo na onima koji su procijenjeni kao najkritičniji. Stoga, geometrija koja se koristi u proračunima nije uvijek precizna.

Čak i kada je geometrija pokosa poznata, proračuni su osjetljivi na male promjene u geometriji pokosa.

Na primjer, ako mali blok kliže duž nagnutog dijela pokosa (dobivajući znatnu brzinu na tom putu), geometrija pokosa na kraju nagnutog dijela igra važnu ulogu u određivanju putanje bloka.

Ako kraj dijela pokosa naglo pada prema dolje, blok će jednostavno pasti s kraja prema dolje i zaustaviti se prilično blizu ruba pokosa.

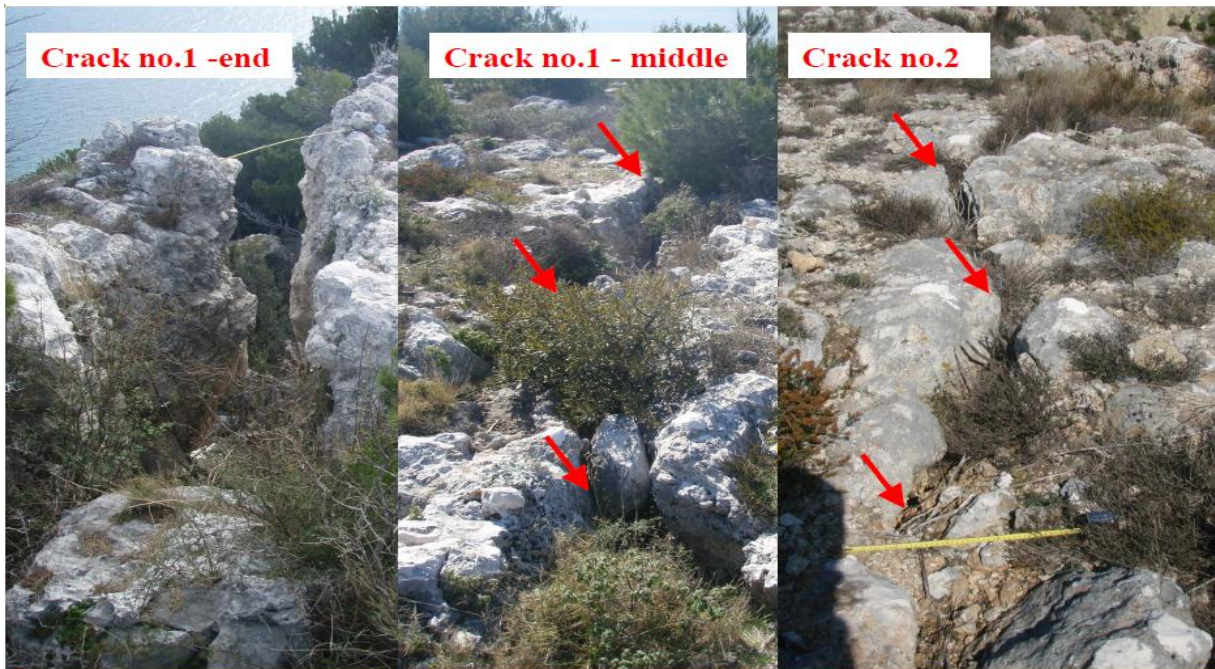
Ako blok naiđe na izdignuti dio, mogao bi skrenuti prema gore daleko od pokosa. Takve putanje je najvažnije predvidjeti, jer označavaju blokove koji se mogu gibati daleko od pokosa.

Promatrano područje u Dućama je podijeljeno na dva glavna poprečna presjeka. S obzirom da su uočene dvije glavne pukotine. Dužina prve je 45 m, dubina 8 m, a pukotina široka 0.5 – 1 m, udaljenost od kraja 7 – 11 m. Druga je dužine 20 m, cijelom dubinom je popunjena, a udaljenost od kraja je 3 m.

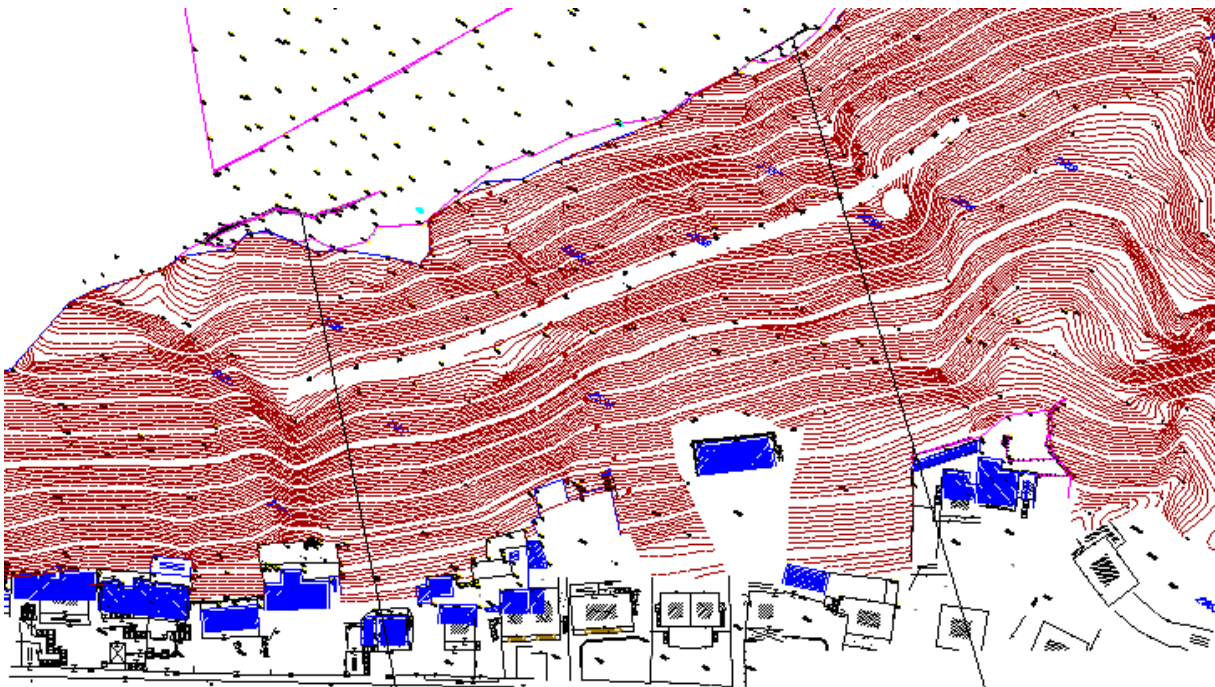
Parametarska analiza je izvršena samo za jedan poprečni presjek, dok su rješenja prikazana za oba presjeka.



Slika 9. Prikaz lokacije



Slika 10. Prikaz dvije glavne pukotine



Slika 11. Prikaz situacije



## 2.6.2. Svojstva materijala

Materijali pokosa mogu značajno varirati od vrha pokosa do nožice i od jednog do drugog poprečnog presjeka. Čak i kada se radi o samo jednom materijalu, njegova svojstva koja su relevantna za analizu odrona (koeficijenti restitucije) mogu biti nedovoljno poznata.

Tipične vrijednosti za koeficijent normalne restitucije ( $R_n$ ) koje se koriste u analizama odrona su u rasponu  $0.3 - 0.5$ . tipične vrijednosti za koeficijent tangencijalne restitucije ( $R_t$ ) koje se koriste u analizama odrona su u rasponu  $0.7 - 0.95$ .

Područja s vegetacijom i mekana tla se nalaze u donjem dijelu, a stijena i asfalt u gornjem dijelu raspona.

Budući da je algoritam koji se koristi za simulacije odrona osjetljiv na male promjene u koeficijentima restitucije, blok prilikom udara na segment pokosa s  $R_n = 0.4$  će se ponašati drugačije nego prilikom udara na isti segmenta s  $R_n = 0.5$ .

Koeficijenti restitucije mogu se odrediti povratnim analizama. Terenski podaci za povratne analize sadrže krajnju točku bloka, masu bloka, početnu točku (izvorni položaj bloka može se činiti manje oštećen vremenskim prilikama) i nekoliko pozicija udara (oznake 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. Gubitak energije se događa zbog tangencijalnog i normalnog koeficijenta restitucije. Tangencijalni koeficijent je u smjeru paralelno sa kosinom, a normalni okomito na ravninu kosine.

U pretpostavci Pfeiffer and Bowen (1989.) tangencijalni koeficijent restitucije je određen na temelju vegetacijskog pokrova i sastavu površine terena, a normalni koeficijent restitucije na temelju elastičnosti površinskog materijala.

Također jedno od objašnjenja koeficijenta restitucije RocFall-a je da je  $R_n$  faktor koji predstavlja tranziciju od gotovo elastičnih uvjeta za male brzine do gotovo plastičnih uvjeta koji uzrokuju lomljenje stijene te uništavanje površine kosine za velike udare pri velikim brzinama.

Da bismo mogli napraviti model koji bi dovoljno dobro simuliralo trajektoriju padajućeg bloka bilo je potrebno odrediti tangencijalni i normalni koeficijent restitucije. Iz prethodnih istraživanja za vapnence u sličnim situacijama (H.Saroglou, V.Marinos, P.Marinos, G.Tsiambaos, 2012., te prilozi iz RocFall-a)  $R_n$  smo odabrali u rasponu 0.3 - 0.5, a  $R_t$  0.7 – 0.95 te kut trenja pokosa 25 - 44°.

| Vrsta materijala na površini pokosa                                  | Koeficijent restitucije |         |           |
|--|-------------------------|---------|-----------|
|  | R                       | $R_N$   | $R_T$     |
| Udar između sličnih materijala (stijena-stijena)                     | 0.75-0.80               |         |           |
| Udar između stijene i oblutaka tla                                   | 0.20-0.35               |         |           |
| Čvrsta stijena   |                         | 0.9-0.8 | 0.75-0.65 |
| Materijal trošenja stijene pomiješana s velikim stijenskim blokovima |                         | 0.8-0.5 | 0.65-0.45 |
| Kompaktan materijal trošenja stijene pomiješan s malim blokovima     |                         | 0.5-0.4 | 0.45-0.35 |
| Pokosi prekriveni travom ili livade                                  |                         | 0.4-0.2 | 0.3-0.2   |

Tablica 1. Prikaz  $R_n$  i  $R_t$  koeficijenta

**Table A.1.1:** Values of COR in the literature defined by various researchers as well as different types of coefficient and for different materials after Heidenreich (2004) and RocFall® 4.0 (2002)

| Reference                     | Values for $R_n$ | Values for $R_t$ | Values for $R_E$ | Values for $R_{TE}$ | Values for $R_{kin}$ | Values for $\mu$ | Values for $\mu_{tot}$ | Remarks   |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|----------------------|------------------|------------------------|---|
| Habib 1977                    | 0.75-0.80        |                  |                  |                     |                      |                  |                        | Based on experience in Italy                        |
|                               | 0.5-0.6          |                  |                  |                     |                      |                  |                        | Based on experience in Norway                       |
| Piteau and Claton 1977        | 0.8-0.9          | 0.65-0.75        |                  |                     |                      |                  |                        | Solid rock  |
|                               | 0.5-0.8          | 0.45-0.65        |                  |                     |                      |                  |                        | Detrital material mixed with large rock boulders    |
|                               | 0.4-0.5          | 0.35-0.45        |                  |                     |                      |                  |                        | Compact detrital material mixed with small boulders |
|                               | 0.2-0.4          | 0.2-0.3          |                  |                     |                      |                  |                        | Grass covered slopes                                |
| Wu 1985                       | 0.2-0.8          | 0.5-0.75         |                  |                     |                      |                  |                        | Rock on rock or wood platform                       |
| Heierli 1985                  | 0.95             |                  | 0.9              |                     |                      |                  |                        | Rock  |
|                               | 0.55             |                  | 0.3              |                     |                      |                  |                        | Gravel layer (35 cm)                                |
|                               | 0.45             |                  | 0.2              |                     |                      |                  |                        | Gravel layer (70 cm)                                |
|                               | 0.45             |                  | 0.2              |                     |                      |                  |                        | Debris  |
| Bozzolo & Pamini 1986         |                  |                  |                  | 0.7                 |                      |                  |                        | Rock at a slope angle of 44°                        |
|                               |                  |                  |                  | 0.55                |                      |                  |                        | Debris at a slope angle of 57°                      |
| Descouedres & Zimmermann 1987 |                  |                  |                  |                     | 0.4                  | 0.5              |                        | Vineyard slopes                                     |
|                               |                  |                  |                  |                     | 0.85                 | 0.5              |                        | Rock slopes   |
| Hoek 1987                     | 0.53             | 0.99             |                  |                     |                      |                  |                        | Clean hard bedrock                                  |
|                               | 0.4              | 0.9              |                  |                     |                      |                  |                        | Asphalt roadway                                     |
|                               | 0.35             | 0.85             |                  |                     |                      |                  |                        | Bedrock outcrops with hard surface, large boulders  |
|                               | 0.32             | 0.82             |                  |                     |                      |                  |                        | Talus cover   |
|                               | 0.32             | 0.8              |                  |                     |                      |                  |                        | Talus cover with vegetation                         |
|                               | 0.3              | 0.8              |                  |                     |                      |                  |                        | Soft soil, some vegetation                          |

Tablica 2. Prikaz  $R_n$  i  $R_t$  koeficijenta; izvor RocFall

Table A.1.1 (continued):

| Reference   | Values for $R_n$ | Values for $R_t$ | Values for $R_E$ | Values for $R_{TE}$ | Values for $R_{Kin}$ | Values for $\mu$ | Values for $\mu_{tot}$ |                    | Remarks  |
|---|------------------|------------------|------------------|---------------------|----------------------|------------------|------------------------|--------------------|--|
| Urciuoli 1988   | 0.05-0.35        | 0.5-1            | 0.02-1           |                     |                      |                  |                        |                    | Rock block impacting limestone                     |
|   | ~0               | 0.24             |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Debris fan   |
| Gerber 1995   | 0.17-0.43        | 0.45-0.88        |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Rock (limestone)                                   |
| Ushiro & al. 2000   | 0.1-0.4          | 0.71             |                  |                     |                      |                  |                        |                    | ?  |
| Pfeiffer & Bowen 1989<br>(older versions of program CRSP) | 0.37-0.42        | 0.87-0.92        |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Smooth, hard surface as paving rock                |
|   | 0.33-0.37        | 0.83-0.87        |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Bedrock or boulders with little soil or vegetation |
|   | 0.30-0.33        | 0.83-0.87        |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Talus with little vegetation                       |
|   | 0.3-0.33         | 0.80-0.83        |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Talus with some vegetation                         |
|   | 0.28-0.32        | 0.80-0.83        |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Soft soil slope with little vegetation             |
|   | 0.28-0.32        | 0.78-0.82        |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Vegetated soil slope                               |
| Giani 1992, Barbieri & al. 1988                           | 0.5              | 0.95             |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Bedrock  |
|   | 0.35             | 0.85             |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Bedrock covered by large blocks                    |
|   | 0.3              | 0.7              |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Debris formed by uniform distributed elements      |
|   | 0.25             | 0.55             |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Soil covered by vegetation                         |
| Azzoni & al. 1995   |                  |                  |                  |                     |                      |                  | 0.3 m <sup>3</sup>     | 1.2 m <sup>3</sup> |  |
|   |                  |                  |                  |                     | 0.75-0.90            |                  | 0.4-0.45               | 0.4                | Rock (limestone)                                   |
|   |                  |                  |                  |                     | 0.55-0.6             |                  | 0.5-0.6                | 0.4                | Fine angular debris and earth (compacted)          |
|   |                  |                  |                  |                     | 0.35-0.45            |                  | 0.7-0.8                | 0.6-0.7            | Fine angular debris and earth (soft)               |
|   |                  |                  |                  |                     | 0.45-0.5             |                  | 0.6-0.7                | 0.5-0.6            | Medium angular debris with angular rock fragments  |
|   |                  |                  |                  |                     | 0.4-0.5              |                  | 0.70-1.00              |                    | Medium angular debris with scattered trees         |
|   |                  |                  |                  |                     | 0.55-0.7             |                  | 0.65-1.20              | 0.60-0.80          | Coarse angular debris with angular rock fragments  |
|   |                  |                  |                  |                     | 0.5-0.6              |                  | 0.55-0.65              | 0.45-0.50          | Earth with grass and some vegetation               |
|   |                  |                  |                  |                     | <0.2                 |                  | 0.85                   |                    | Ditch with mud                                     |
|   |                  |                  |                  |                     | 0.5-0.65             |                  | 0.50-0.65              |                    | Flat surface of artificially compacted ground      |
|   |                  |                  |                  | 0.75                |                      | 0.40-0.45        |                        | Road               |  |
| Kamijo 2000   | 0.1-0.35         |                  |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Vertical impact of a 220kg rock on hard surface    |
|   | 0.1              |                  |                  |                     |                      |                  |                        |                    | Vertical impact of a 800kg rock on hard surface    |

Tablica 3. Prikaz  $R_n$  i  $R_t$  koeficijenta; izvor RocFall; nastavak tablice

Table A.1.1 (continued):

| Reference   | Values for $R_n$ | Values for $R_t$ | Values for $R_E$ | Values for $R_{TE}$ | Values for $R_{Kin}$ | Values for $\mu$ | Values for $\mu_{tot}$ |  | Remarks  |
|---|------------------|------------------|------------------|---------------------|----------------------|------------------|------------------------|--|--|
| Jones & al. 2000<br>(Values gathered by program calibration for CRSP 4.0) | 0.6-1.0          | 0.9-1.0          |                  |                     |                      |                  |                        |  | Smooth hard surface and paving   |
|   | 0.15-0.3         | 0.75-0.95        |                  |                     |                      |                  |                        |  | Bedrock and boulder fields   |
|   | 0.12-0.2         | 0.65-0.95        |                  |                     |                      |                  |                        |  | Talus and firm soil slopes   |
|   | 0.1-0.2          | 0.5-0.8          |                  |                     |                      |                  |                        |  | Soft soil slopes   |
| Budetta & Santo 1994 (evaluated by program calibration)                   | 0.2              | 0.53             |                  |                     |                      |                  |                        |  | Rock   |
| Kobayashi et al. 1990   |                  |                  |                  |                     |                      |                  | 0.64                   |  | Rock slope also covered with trees   |
|   |                  |                  |                  |                     |                      |                  | 0.38                   |  | Rock   |
|   |                  |                  |                  |                     |                      |                  | 0.53                   |  | Scattered sagebrush, grass, few other boulders   |
|   |                  |                  |                  |                     |                      |                  | 0.33                   |  | Rock   |
| Hungry, O. and Evans, S.G. 1988   | 0.5              | 0.8              |                  |                     |                      |                  |                        |  | Sparsely forested slope covered by a veneer of very fine weathered talus derived from weak schistose |
|   | 0.5              | 0.8              |                  |                     |                      |                  |                        |  | Limestone on bare uniform talus slope formed of basalt fragments                                     |
|   | 0.7              | 0.9              |                  |                     |                      |                  |                        |  | Rectangular boulder of metamorphosed tuff on bare rock and a steep snow covered shelf                |
| Robotham et al.   | 0.32             | 0.71             |                  |                     |                      |                  |                        |  | Limestone face   |
|   | 0.3              | 0.62             |                  |                     |                      |                  |                        |  | Partially vegetated limestone scree  |
|   | 0.32             | 0.71             |                  |                     |                      |                  |                        |  | Uncovered limestone blast pile   |
|   | 0.25             | 0.49             |                  |                     |                      |                  |                        |  | Vegetated covered limestone pile   |
|   | 0.28             | 0.84             |                  |                     |                      |                  |                        |  | Chalk face   |
|   | 0.27             | 0.60             |                  |                     |                      |                  |                        |  | Vegetated chalk scree  |

Tablica 4. Prikaz  $R_n$  i  $R_t$  koeficijenta; izvor RocFall; nastavak tablice

### 2.6.3. Početni uvjeti

Na prirodno nastalim pokosima često se nalaze blokovi različitih veličina koji predstavljaju potencijalne odrone. Veličina najvećeg bloka može jako varirati i ovisi isključivo o lokalnim uvjetima.

## 3. ANALIZA PROBLEMA

U ovom poglavlju biti će prikazana parametarska analiza jednog odabranog poprečnog presjeka na temelju rezultata RocFall-a 4.0. Također biti će prikazani rezultati RocFall-a 4.0. za oba karakteristična poprečna presjeka te na kraju usporedba rezultata RocFall-a v4.0. i v5.0.

### 3.1. Parametarska analiza

Rezultati analize odrona sa programskim software-om RocFall v4.0. su:

- trajektorija gibanja
- visina odskoka
- translacijska i rotacijska brzina
- rotacijska i ukupna kinetička energija

Trajektorija gibanja i visina odskora ovise o geometriji pokosa, sastavu površine pokosa i karakteristikama bloka. Na temelju karakteristika terena i podataka o mogućim nestabilnim blokovima napravljena je kinematička analiza i rezultirajuće trajektorije. Korišten je 2D model. Za analizu korištene su mase od 1 – 100 000 kg na kosini visine do 70 m za prvi poprečni presjek. Na temelju rezultata tj. kinetičke energije odabrane su elastične barijere koje imaju moć apsorpcije 1000 – 2000 kJ.

Parametarska analiza je izvršena na modelu sa nagibom terena  $30^{\circ}$ , koji ima visinu 70 m, a duljina je 120 m. Analizirana je ovisnost kinetičke energije, translacijske i rotacijske brzine i visina odraza. Analiza je izvršena na način da se mijenjao jedan parametar, a ostali parametri

su ostali konstantni tijekom analize kako bismo mogli vidjeti kako pojedini faktor utječe na rezultate. Rezultati analize su dijagrami koji prikazuju u funkciju ovisnosti parametra.

A to su:

Koeficijent sudara u smjeru tangente  $R_t$ , koeficijent sudara u smjeru normale  $R_n$ , kut trenja  $\varphi$ , masa bloka  $m$  sa rezultatima koje dobijemo programom rotacijska energija  $W_{rot}$ , translacijska  $W_{trans}$ , ukupna energija  $W_{uk}$ , rotacijska brzina  $v_{rot}$ , translacijska  $v_{trans}$  i visina odraza  $h$ . Rezultati su očitani prije sudara (na lokaciji 39.77 m) i nakon sudara (na lokaciji 46.39 m).

Karakteristike pokosa :

$H_0 = 70$  m visina kosine

$L = 120$  m duljina kosine

$\beta = 30^0$  nagib kosine

$\varphi = 25 - 44^0$  kut trenja

$R_n = 0.3 - 0.5$  koeficijent sudara u smjeru normale

$R_t = 0.7 - 0.95$  koeficijent sudara u smjeru tangente

Karakteristike bloka :

$m = 1 - 100\ 000$  kg masa

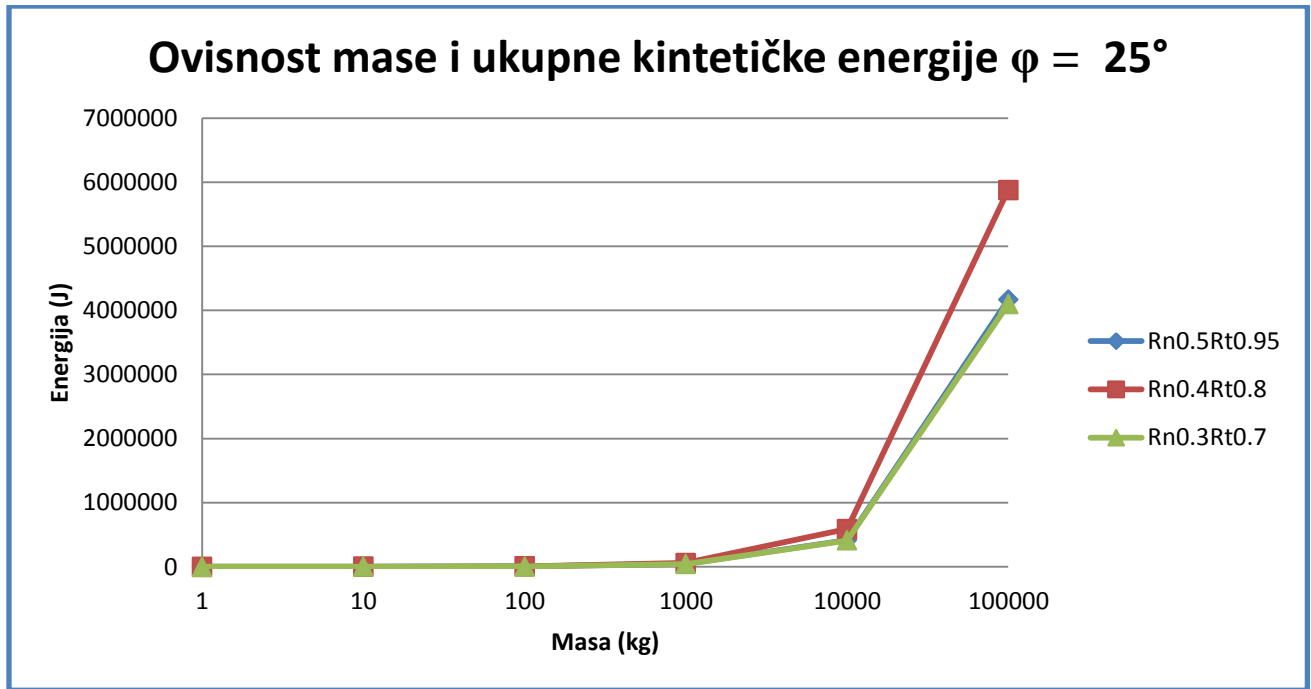
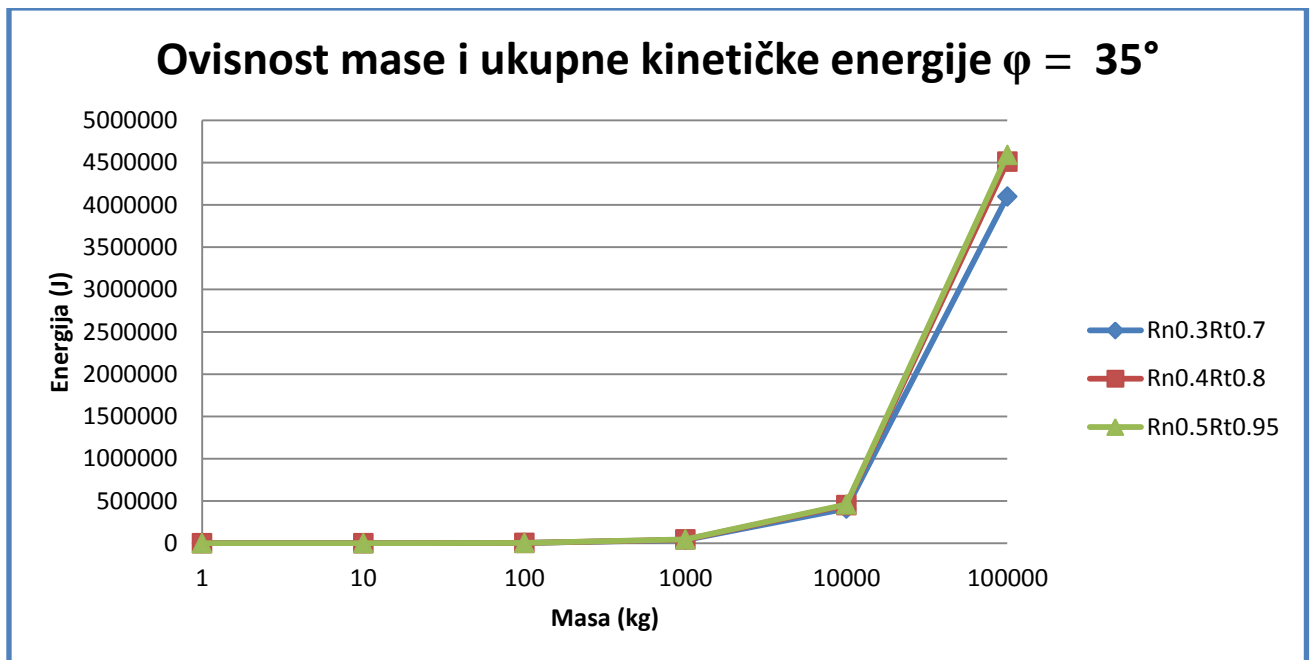
$\rho = 2750$  kg/m<sup>3</sup> jedinična gustoća kamena

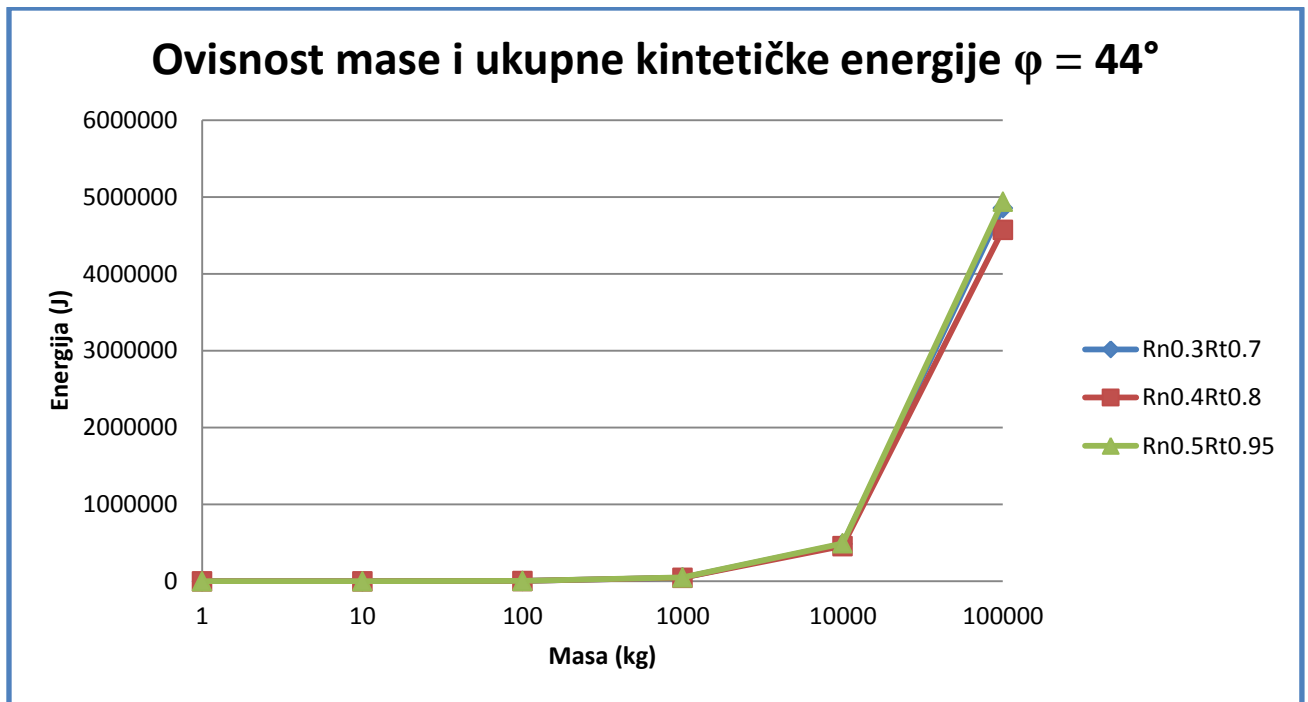
### **Ovisnost mase i energije**

#### **- prije sudara**

U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost mase i ukupne kinetičke energije za svaku kombinaciju koeficijenta restitucije i za kut trenja u rasponu  $25^0 - 44^0$  prije samog sudara, na lokaciji 39.77 m.



Dijagram 1. Ovisnost mase i energije prije sudara za kut trenja  $25^\circ$ Dijagram 2. Ovisnost mase i energije prije sudara za kut trenja  $35^\circ$

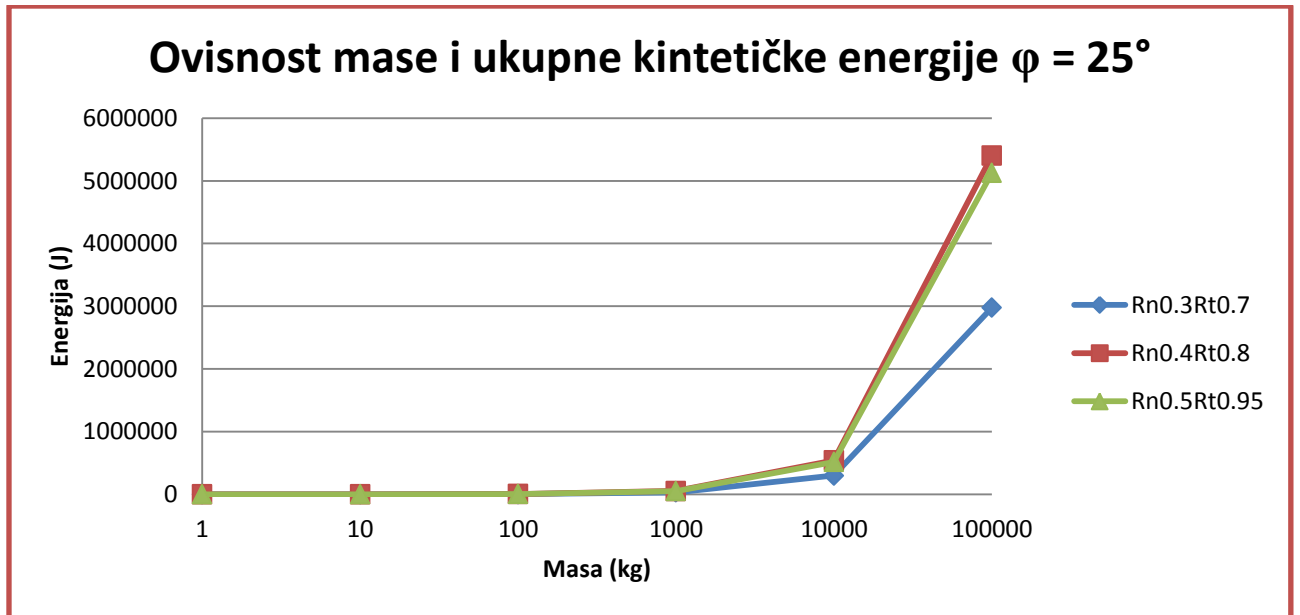
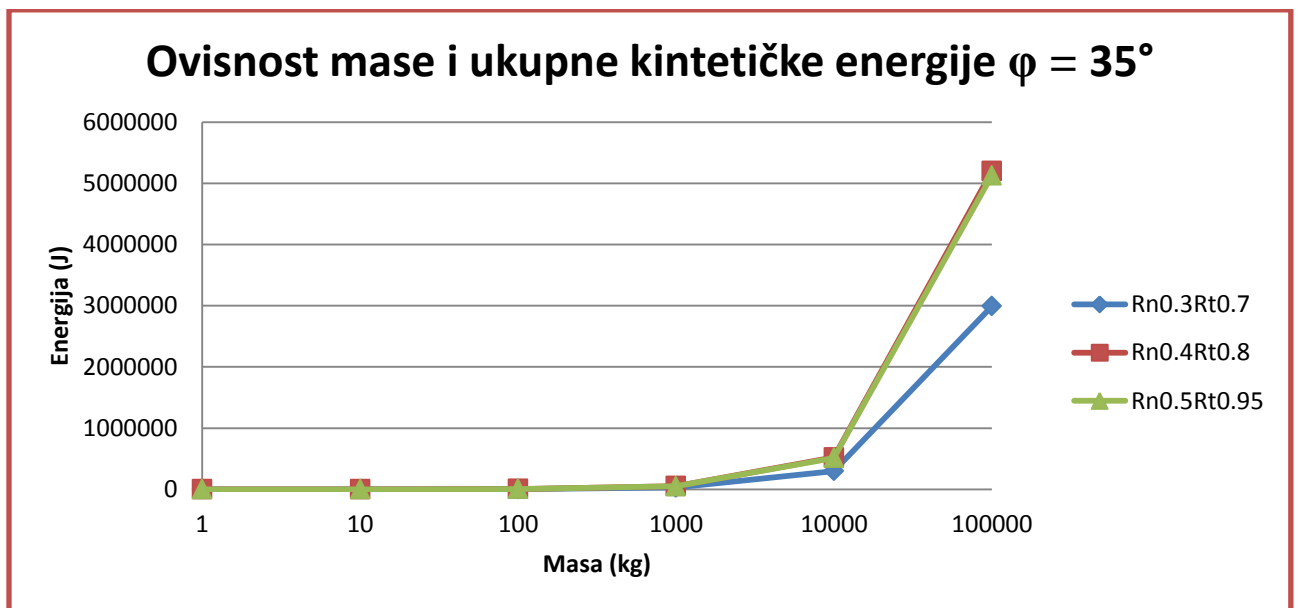


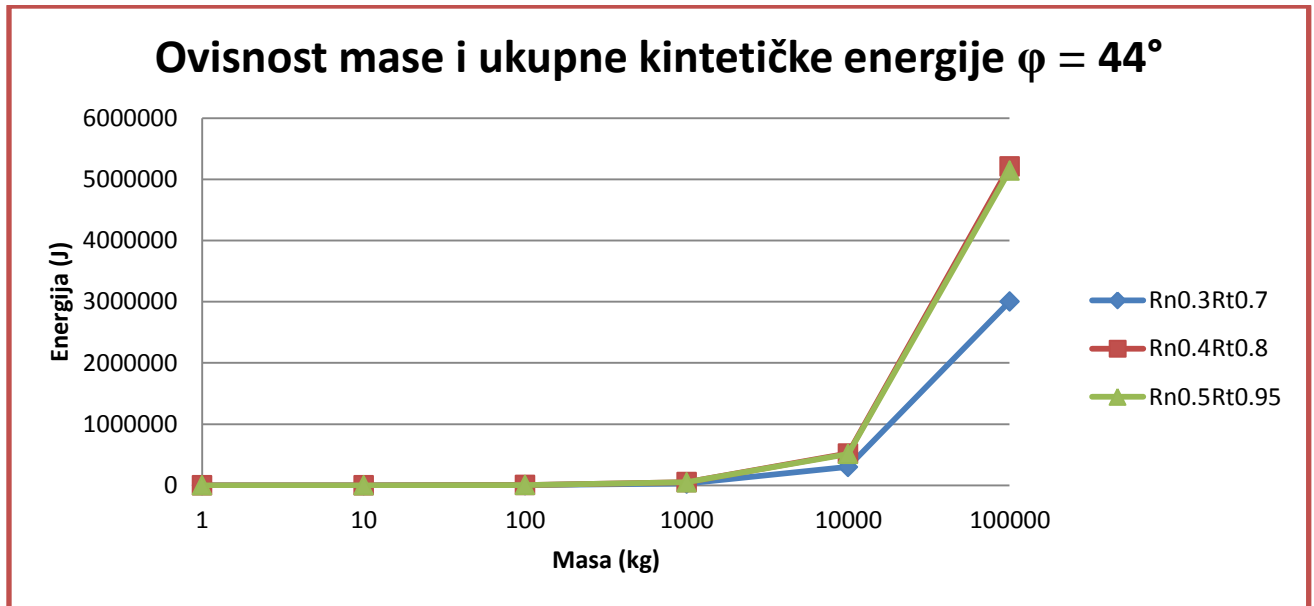
Dijagram 3. Ovisnost mase i energije prije sudara za kut trenja  $44^\circ$

Na temelju rezultata možemo vidjeti da da za koeficijent restitucije  $R_n = 0.4$  i  $R_t = 0.8$  pri kutu trenja  $25^\circ$  imamo najveću ukupnu kinetičku energiju.

- Nakon sudara

Na slijedećim dijagramima je prikazana ovisnost mase i ukupne kinetičke energije za svaku kombinaciju koeficijenta restitucije i za kut trenja u rasponu  $25^\circ - 44^\circ$  nakon sudara, na lokaciji 46.39 m.

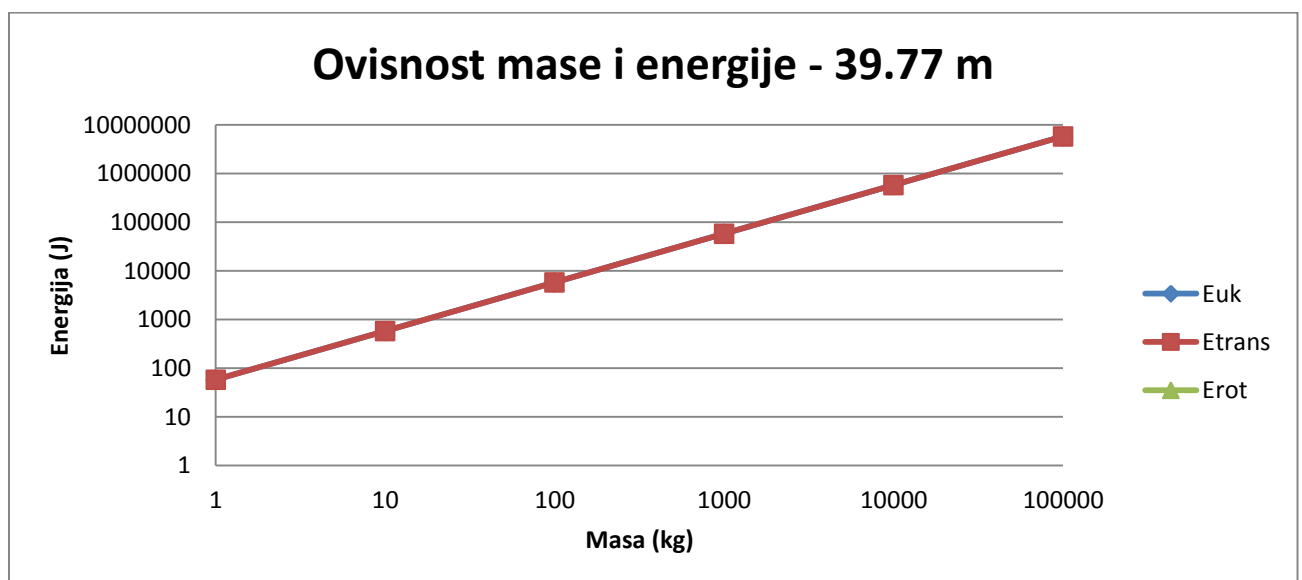
Dijagram 4. Ovisnost mase i energije nakon sudara za kut trenja  $25^\circ$ Dijagram 5. Ovisnost mase i energije nakon sudara za kut trenja  $35^\circ$



Dijagram 6. Ovisnost mase i energije nakon sudara za kut trenja  $44^\circ$

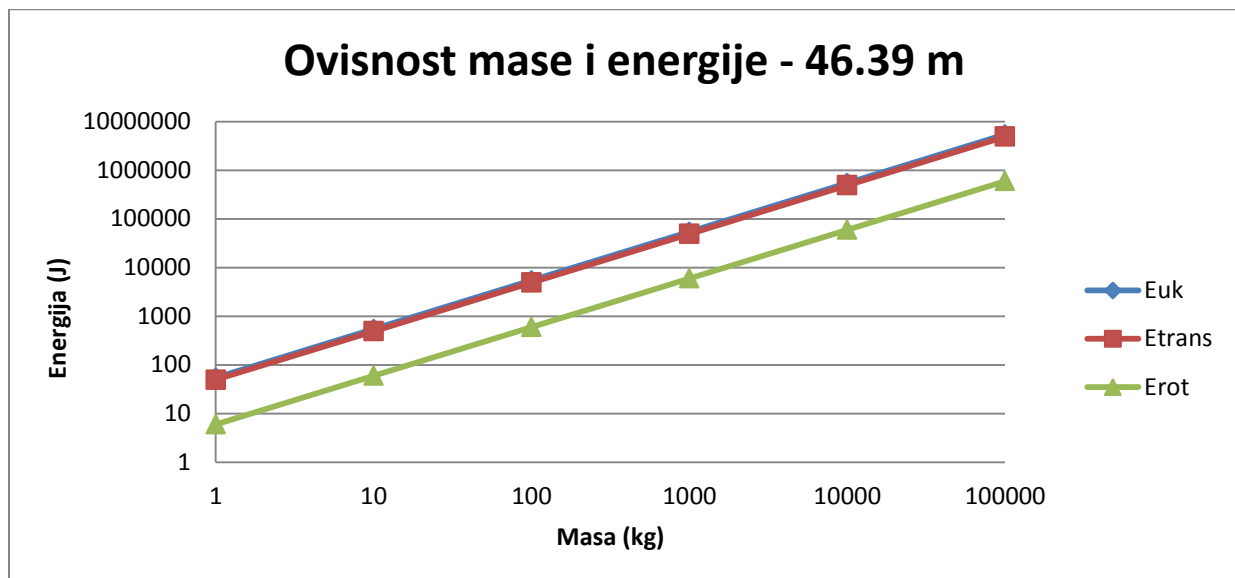
Također jednake rezultate možemo vidjeti i za dijagrame nakon sudara. Stoga, slučaj gdje nam je  $R_n = 0.4$   $R_t = 0.8$  i kut trenja  $25^\circ$  uzimamo kao kritični i njega u daljnjoj analizi obrađujemo.

#### Ovisnost mase i energije za $R_n = 0.4$ $R_t = 0.8$ $\varphi = 25^\circ$



Dijagram 7. Ovisnost mase i energije prije sudara

Iz dijagrama možemo vidjeti da prije samog sudara ukupna kinetička energija je zapravo tangencijala te da je rotacijska energija jednaka nuli. Također, porastom mase energija linearno raste.



Dijagram 8. Ovisnost mase i energije nakon sudara

Iz dijagrama vidimo da svaka komponenta energije raste linearno sa masom.

Jedna od jako bitnih značajki je dobivena iz brojnih eksperimenata koji su do sada provedeni, a to je veliki utjecaj kinematičkih uvjeta prije sudara. Što se i kod našeg promatranja pokazalo kao takvo.

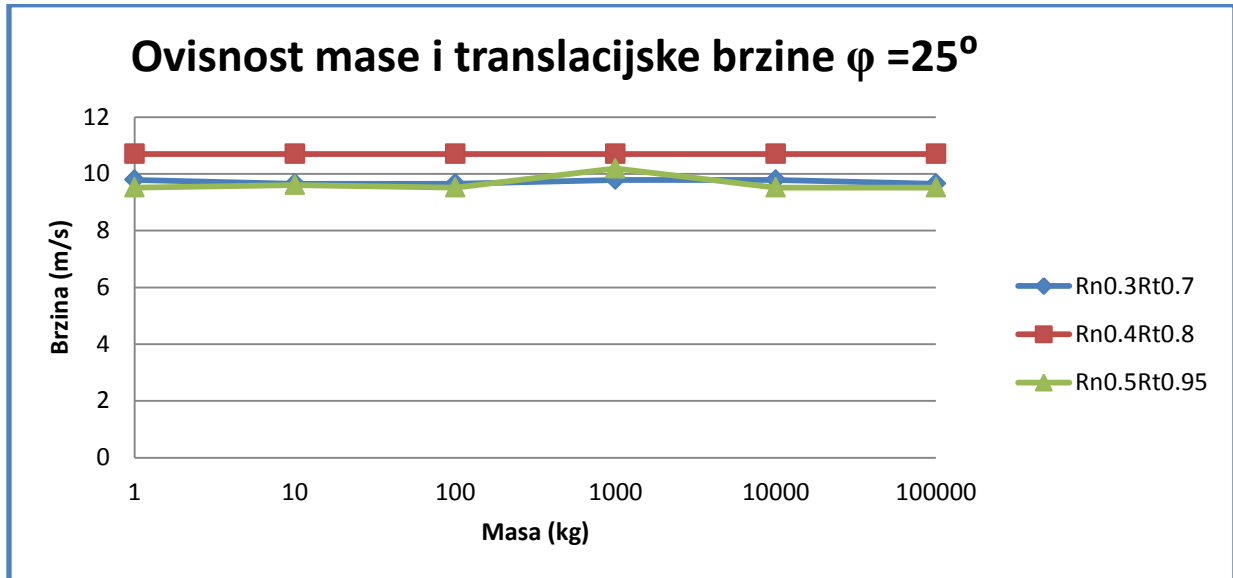
Pokusi su pokazali da kod relativno malih upadnih kutova je većina energije sadržana u bloku. Zapravo, samo mali dio kinetičke energije prije sudara je pripisan normalnoj komponenti brzine. Što pokazuje da je jako mali dio energije disipirao u tlo tj. da je rotacijska energija gotovo jednaka nuli.

S druge pak strane, popriličan dio ukupne kinetičke energije ostane u bloku kao tangencijalna kinetička energija, a dio se transformira u rotacijsku energiju i to do 30 % u našem slučaju taj postotak je negdje do 20%.

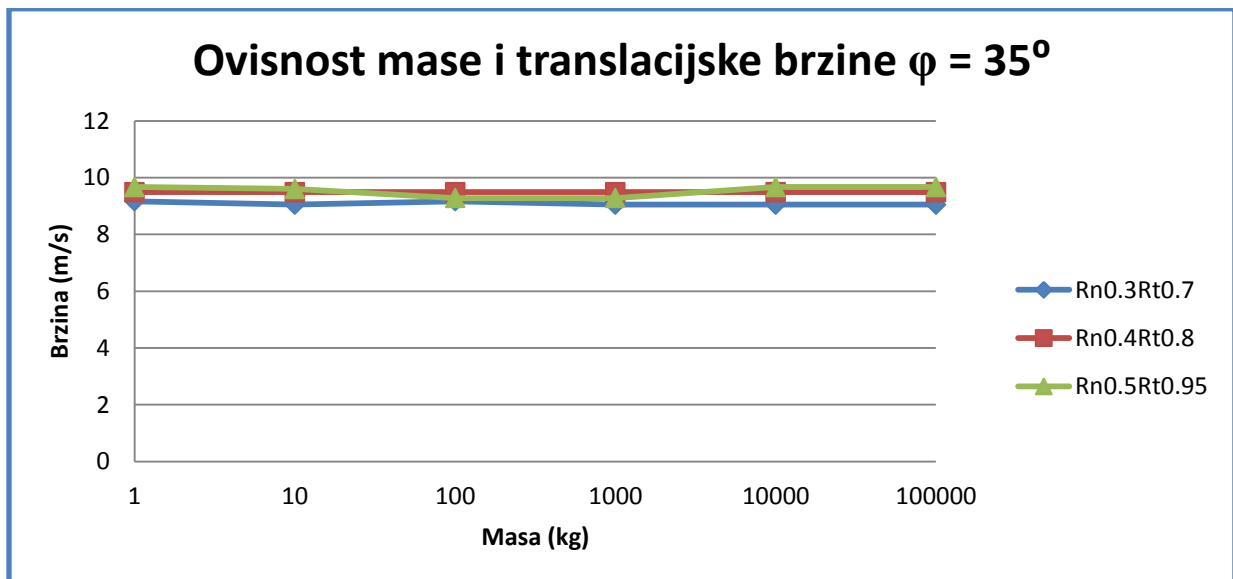
## Ovisnost mase i brzine

### - Prije sudara

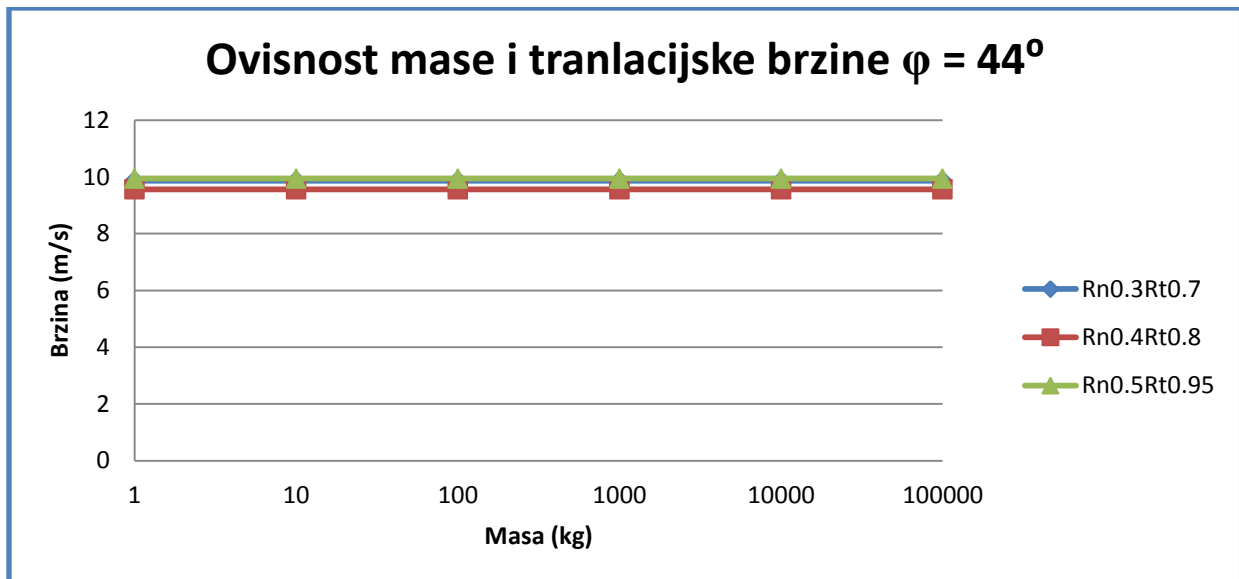
U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost mase i translacijske brzine za svaku kombinaciju koeficijenta restitucije i za kut trenja u rasponu  $25^{\circ}$  -  $44^{\circ}$  prije samog sudara, na lokaciji 39.77 m.



Dijagram 9. Ovisnost mase i brzine prije sudara za kut trenja  $25^{\circ}$



Dijagram 10. Ovisnost mase i brzine prije sudara za kut trenja  $35^{\circ}$



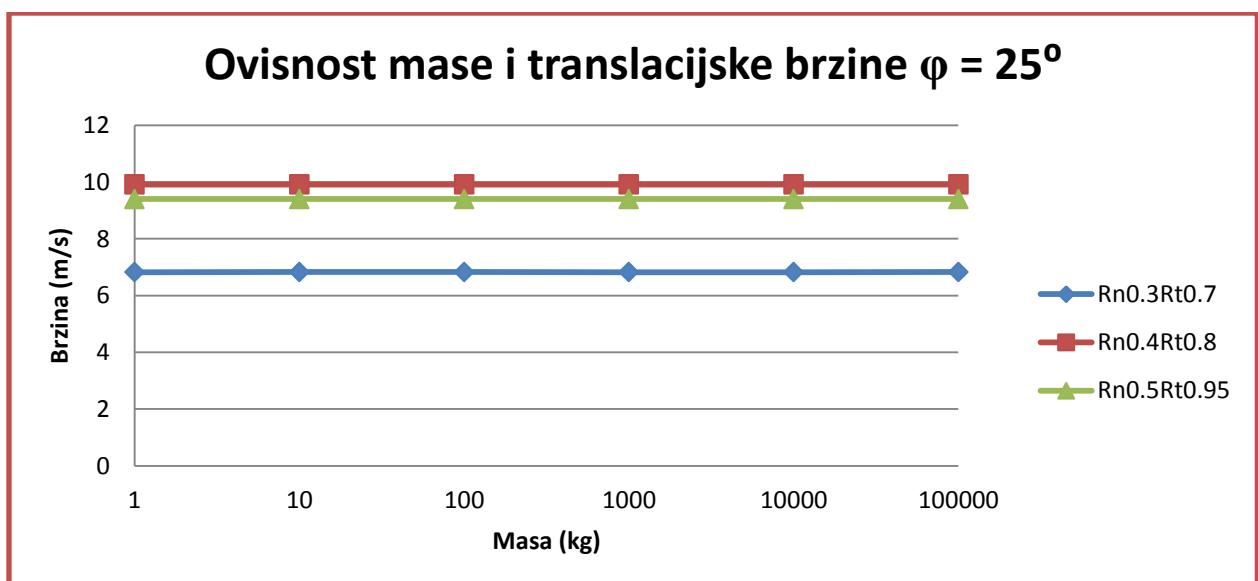
Dijagram 11. Ovisnost mase i brzine prije sudara za kut trenja  $44^\circ$

Rotacijska brzina prije sudara je gotovo jednaka nuli za svaki slučaj.

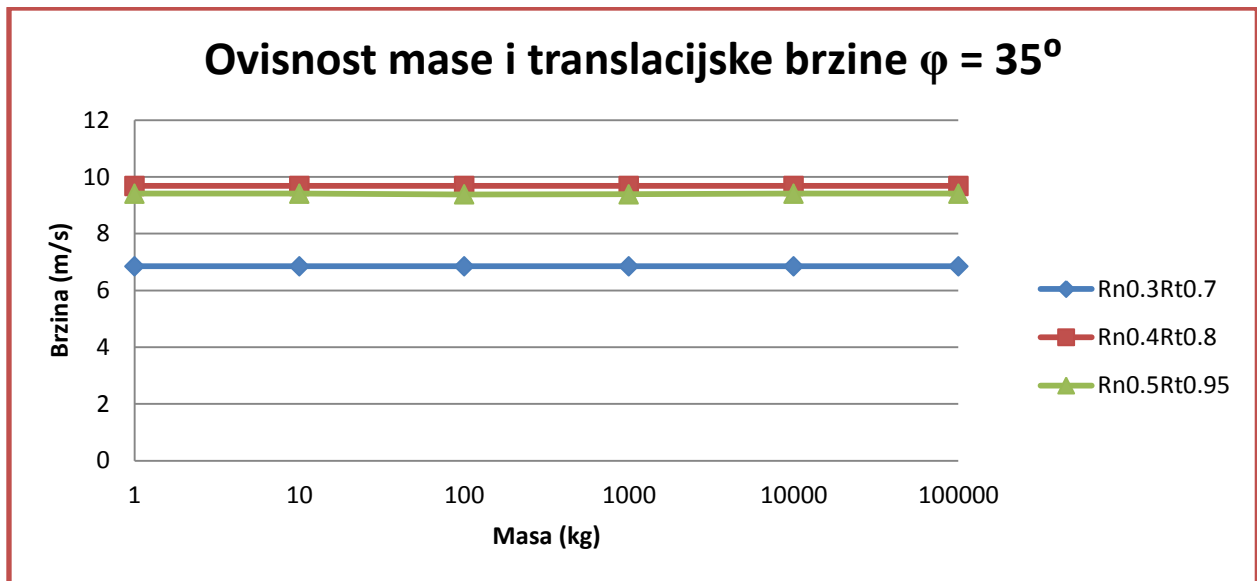
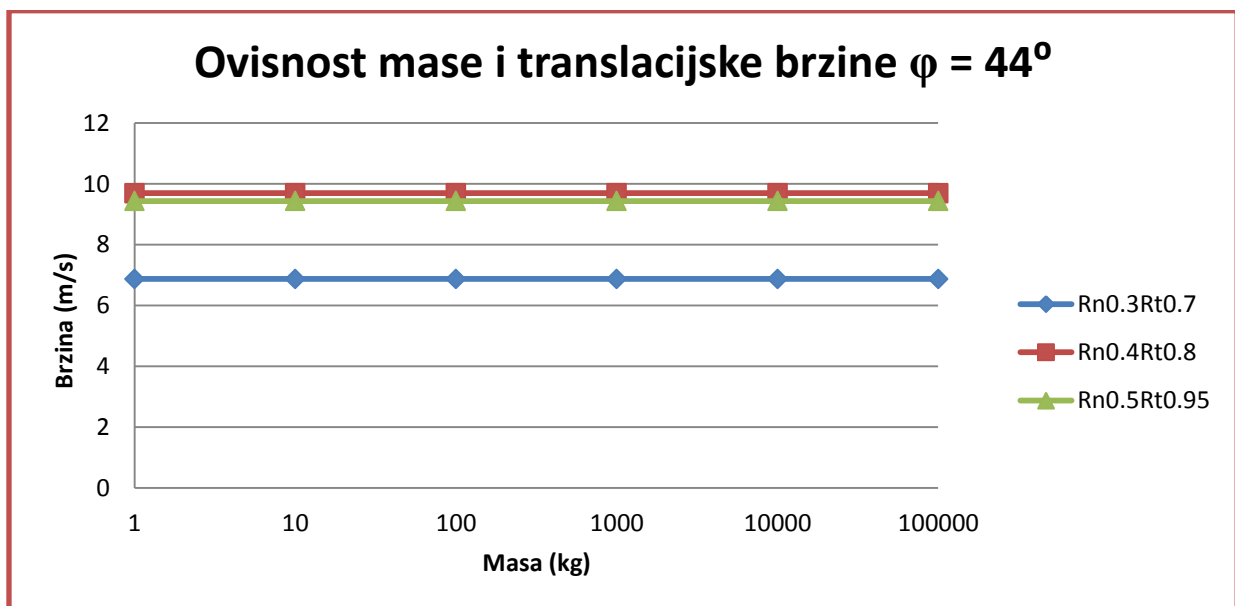
Na temelju rezultata možemo vidjeti da da za koeficijent restitucije  $R_n = 0.4$  i  $R_t = 0.8$  pri kutu trenja  $25^\circ$  imamo najveću brzinu. Stoga ćemo taj slučaj dalje analizirati.

- Nakon sudara

U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost mase i translacijske brzine za svaku kombinaciju koeficijenta restitucije i za kut trenja u rasponu  $25^\circ - 44^\circ$  nakon sudara, na lokaciji 46.39 m.



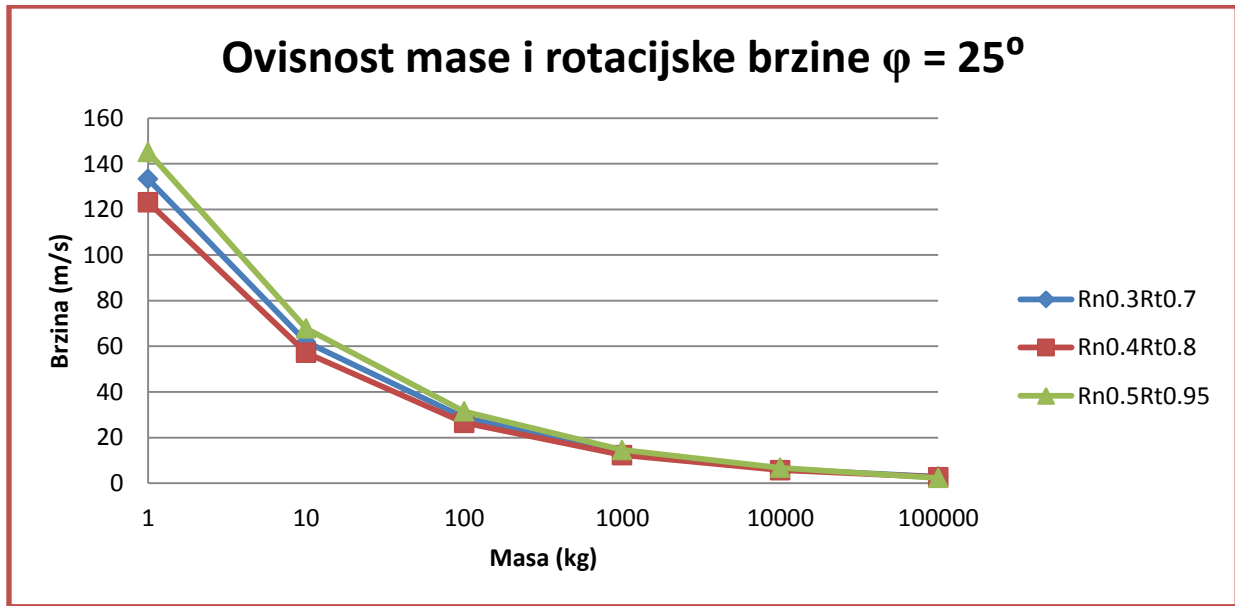
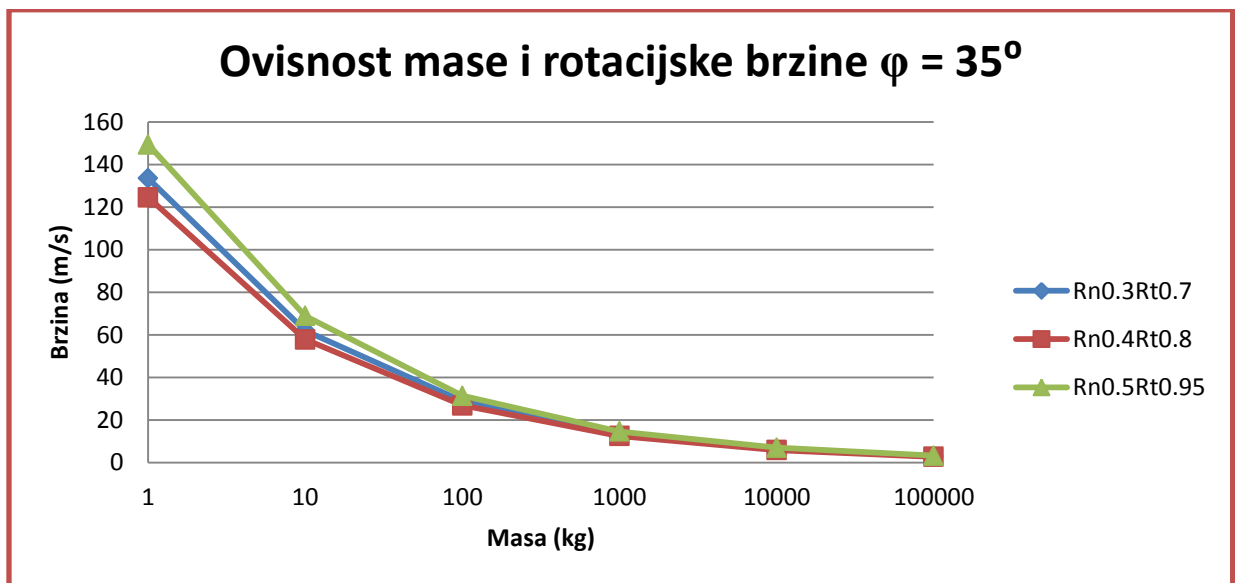
Dijagram 12. Ovisnost mase i brzine nakon sudara za kut trenja  $25^\circ$

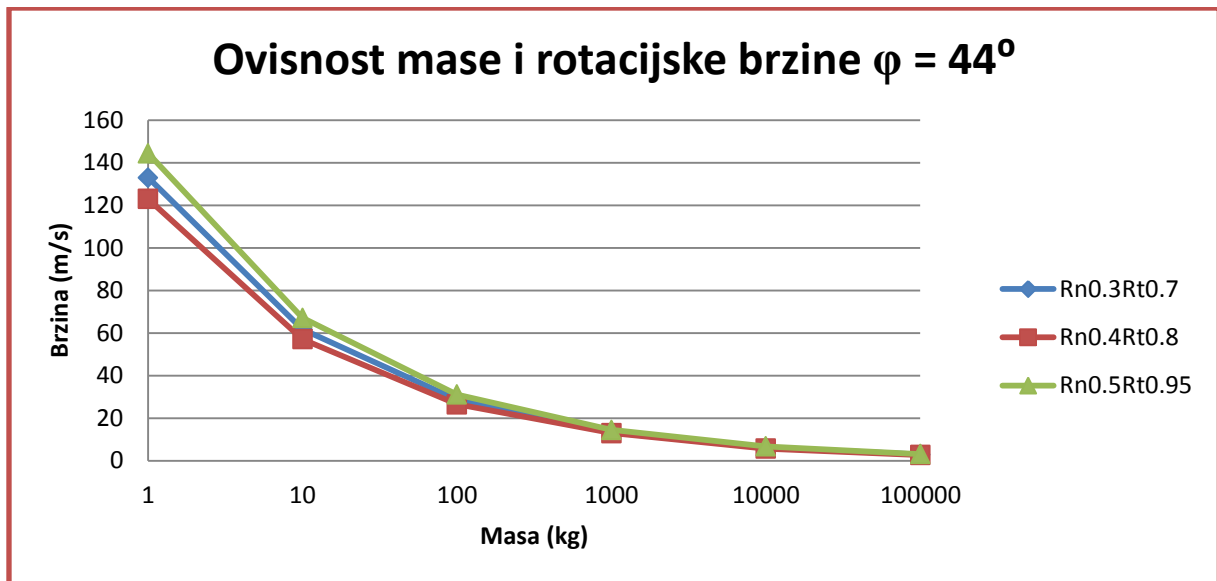
Dijagram 13. Ovisnost mase i brzine nakon sudara za kut trenja  $35^\circ$ Dijagram 14. Ovisnost mase i brzine nakon sudara za kut trenja  $44^\circ$ 

Iz dijagrama nakon sudara možemo zaključiti da slučaj  $R_n = 0.4$   $R_t = 0.8$  i  $\rho = 25^\circ$  daje najveću brzinu.

U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost mase i rotacijske brzine za svaku kombinaciju koeficijenta restitucije i za kut trenja u rasponu  $25^\circ - 44^\circ$  nakon sudara, na lokaciji 46.39 m.

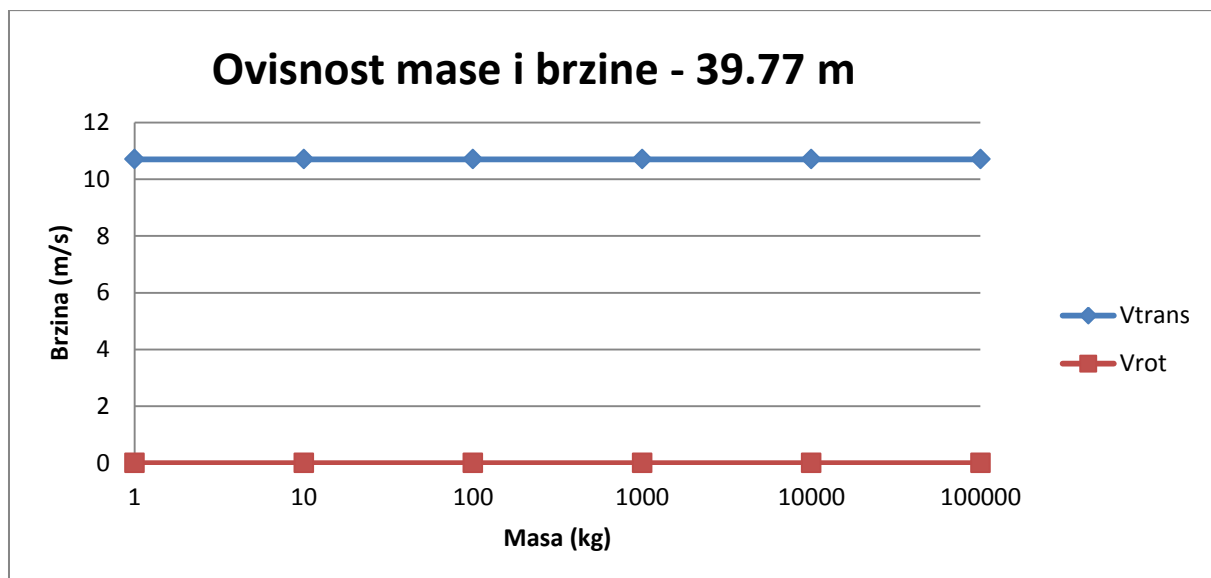


Dijagram 15. Ovisnost mase i brzine nakon sudara za kut trenja  $25^\circ$ Dijagram 16. Ovisnost mase i brzine nakon sudara za kut trenja  $35^\circ$



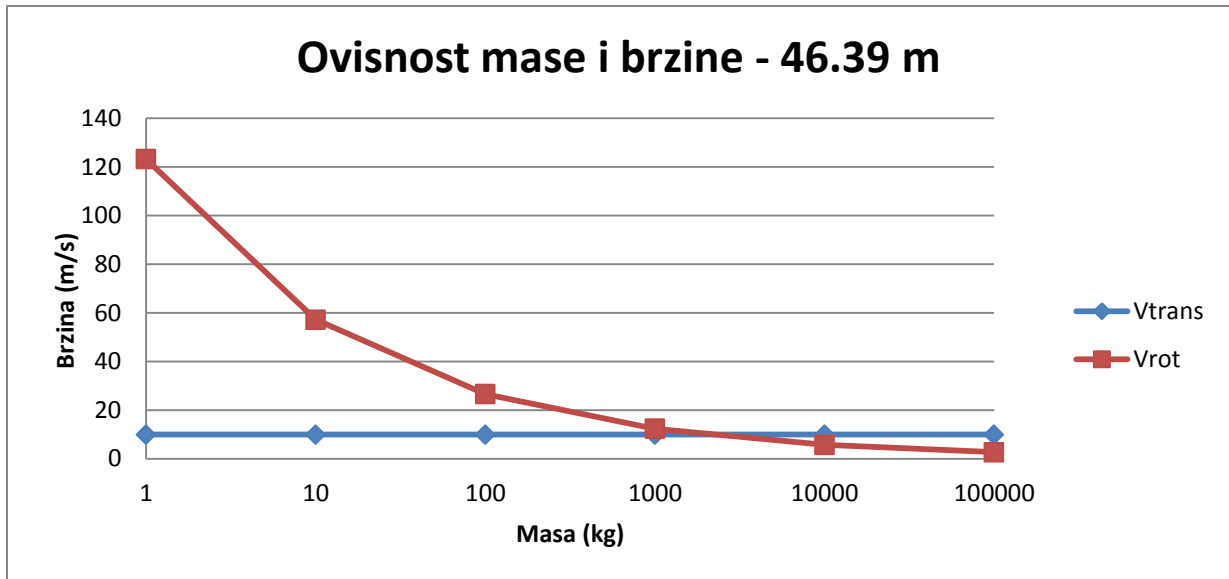
Dijagram 17. Ovisnost mase i brzine nakon sudara za kut trenja  $44^\circ$

**Ovisnost mase i brzine za  $R_n = 0.4$   $R_t = 0.8$   $\varphi = 25^\circ$**



Dijagram 18. Ovisnost mase i brzine prije sudara

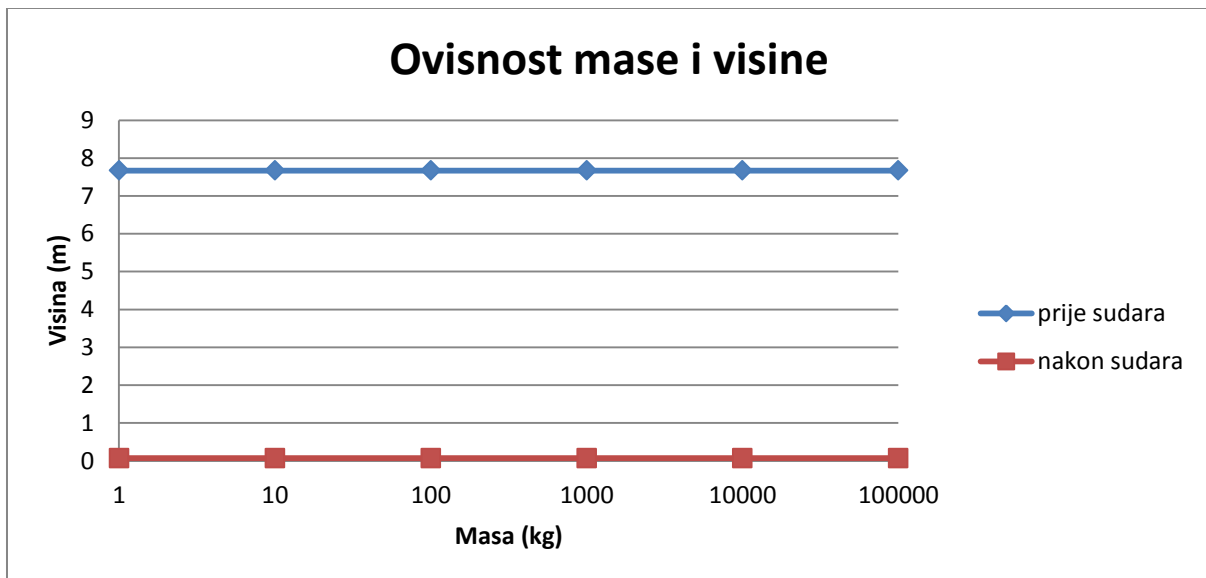
Iz dijagrama možemo vidjeti da masa ne utječe translacijsku brzinu prije sudara. Također možemo vidjeti da je rotacijska energija jednaka nuli.



Dijagram 19. Ovisnost mase i brzine nakon sudara

Na translacijsku energiju ne utječe promjena mase no vidimo da za rotacijsku energiju na početku brzina naglo opada do jedne tone nakon toga se promjena ponaša linearno.

#### Ovisnost mase i visina odskoka

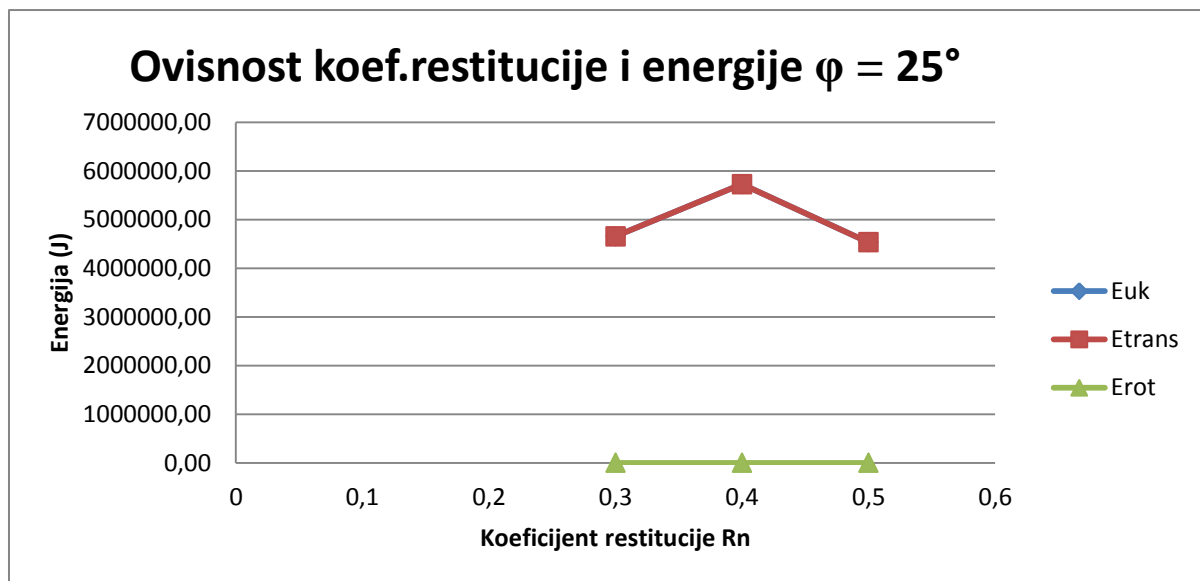


Dijagram 20. Ovisnost mase i visine

Iz dijagrama vidimo koliko je blok bio iznad površine prije sudara, te da je nakon sudara ta visina bila gotovo pa nula. Što nam također ukazuje i na elastične karakteristike terena. Vidimo da promjena mase ne utječe na visinu te je ona konstantna.

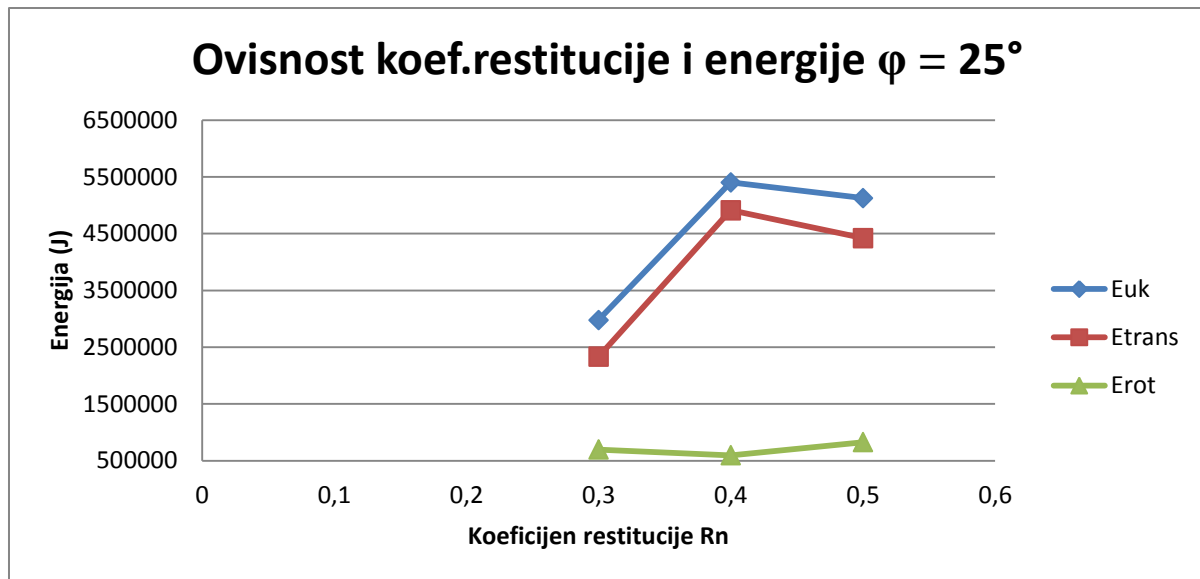
### Ovisnost koeficijenata restitucije ( $R_n$ i $R_t$ ) i energije

U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost koeficijenta restitucije  $R_n$  i kinetičke energije za kut trenja  $25^\circ$  prije i poslije sudara.



Dijagram 21. Ovisnost  $R_n$  i energije prije sudara

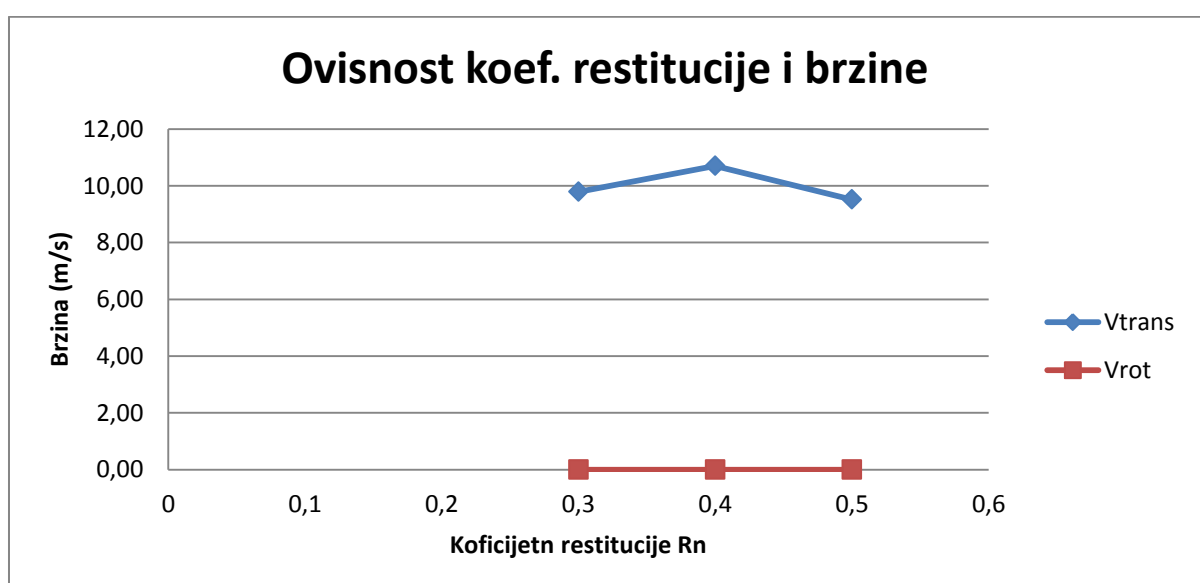
Iz dijagrama vidimo da za tri slučaja koje smo promatrali najveću energiju blok posjeduje sa koeficijentom  $R_n = 0.4$ .

Dijagram 22. Ovisnost  $R_n$  i energije nakon sudara

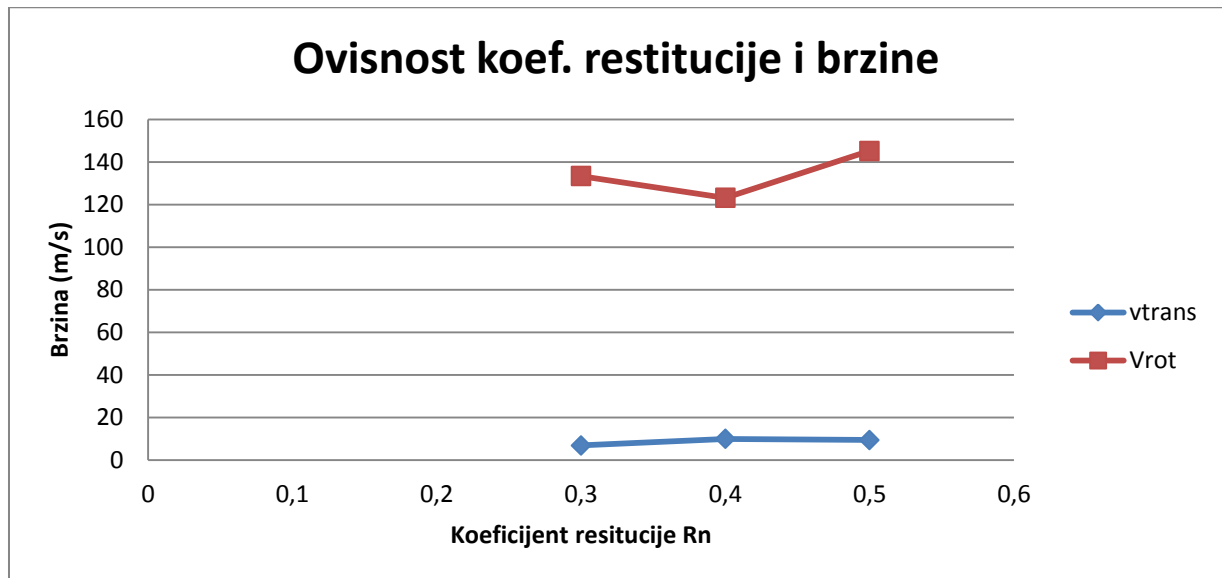
Nakon sudara također najveća energija je za koeficijent  $R_n = 0.4$ . Promatrani slučaj je za kut trenja  $25^\circ$  iz razloga što su vrijednosti za taj kut najkritičnije. Također bitno za napomenuti da odnosi za  $R_n$  i  $R_t$  su jednaki te su prikazani dijagrami samo u ovisnosti o  $R_n$ . Naime, kako raste  $R_n$  linearno s njim raste i  $R_t$ . To vrijedi za kinetičku energiju, brzinu i visinu odskoka.

### Ovisnost koeficijenata restitucije ( $R_n$ i $R_t$ ) i brzine

U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost koeficijenta restitucije  $R_n$  i brzine za kut trenja  $25^\circ$  prije i poslije sudara.

Dijagram 23. Ovisnost  $R_n$  i brzine prije sudara

Iz dijagrama vidimo da je rotacijska brzina jednaka nuli za razliku od translacijske koja se mijenja sa povećanjem  $R_n$ .

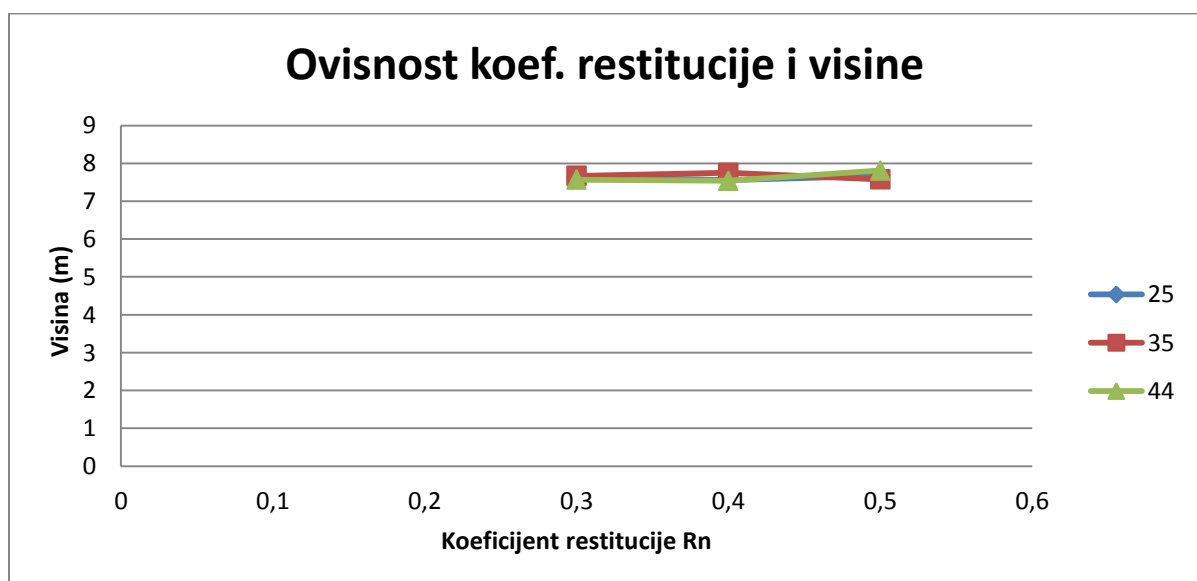


Dijagram 24. Ovisnost  $R_n$  i brzine nakon sudara

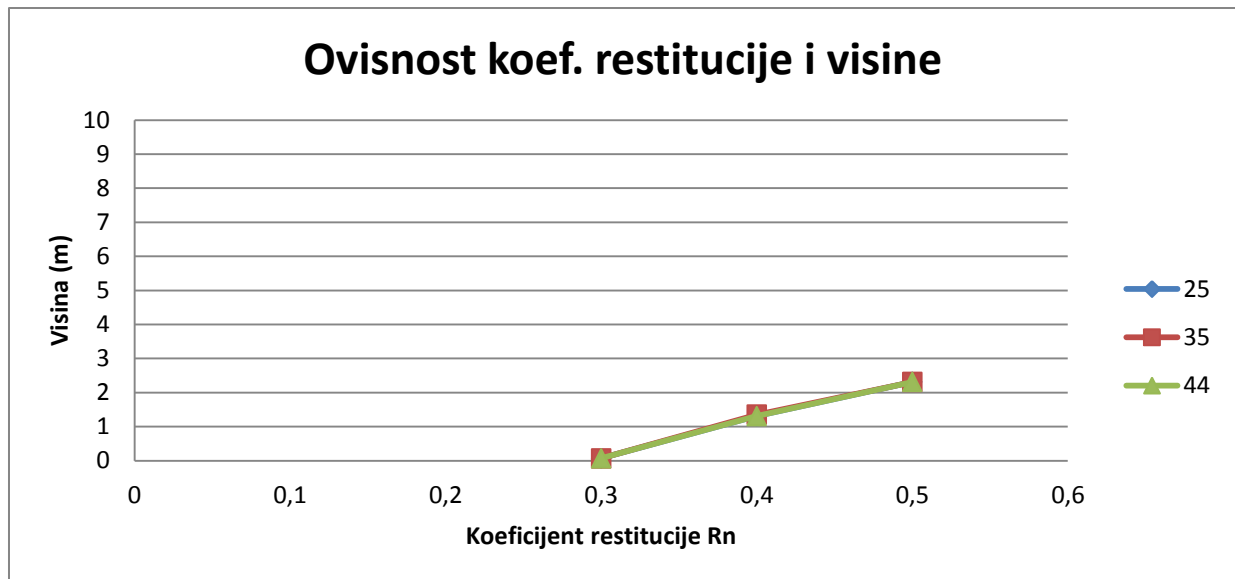
Nakon sudara mijenjanje  $R_n$  ne utječe na promjenu translacijske brzine, dok utječe na rotacijsku brzinu.

### Ovisnost koeficijenata restitucije ( $R_n$ i $R_t$ ) i visine

U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost koeficijenta restitucije  $R_n$  i visine odskoka prije i poslije sudara za raspon kuta trenja  $25^\circ - 44^\circ$ .



Dijagram 25. Ovisnost  $R_n$  i visine prije sudara

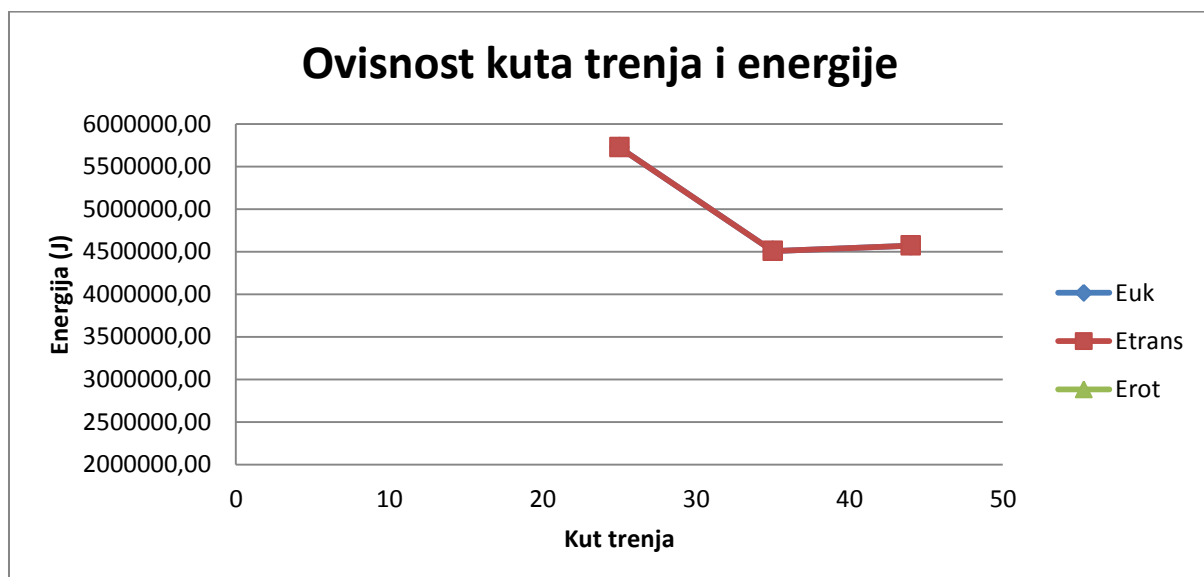


Dijagram 26. Ovisnost  $R_n$  i visine nakon sudara

Iz dijagrama vidimo da prije sudara koeficijenti restitucije ne utječu na promjenu visine dok nakon sudara se ona linearno povećava ukoliko se povećava koeficijent restitucije.

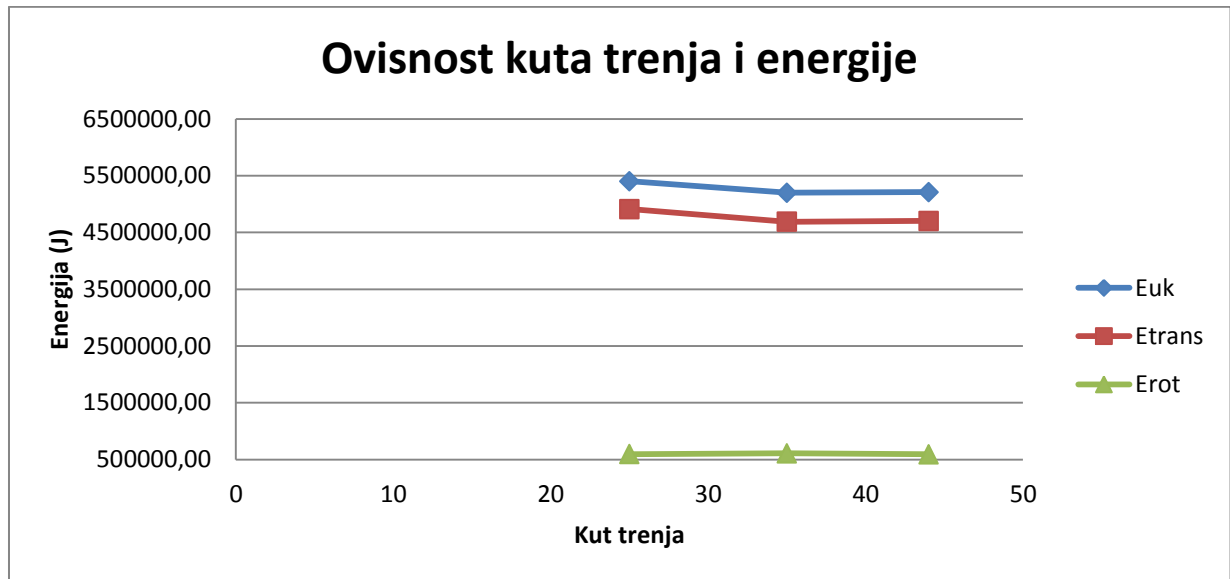
### Ovisnost kuta trenja i energije

U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost kuta trenja i energije prije i poslije sudara za parametre  $R_n = 0.4$  i  $R_t = 0.8$ .



Dijagram 27. Ovisnost kuta trenja i energije prije sudara

Vidimo da energija opada povećanjem kuta trenja prije sudara.

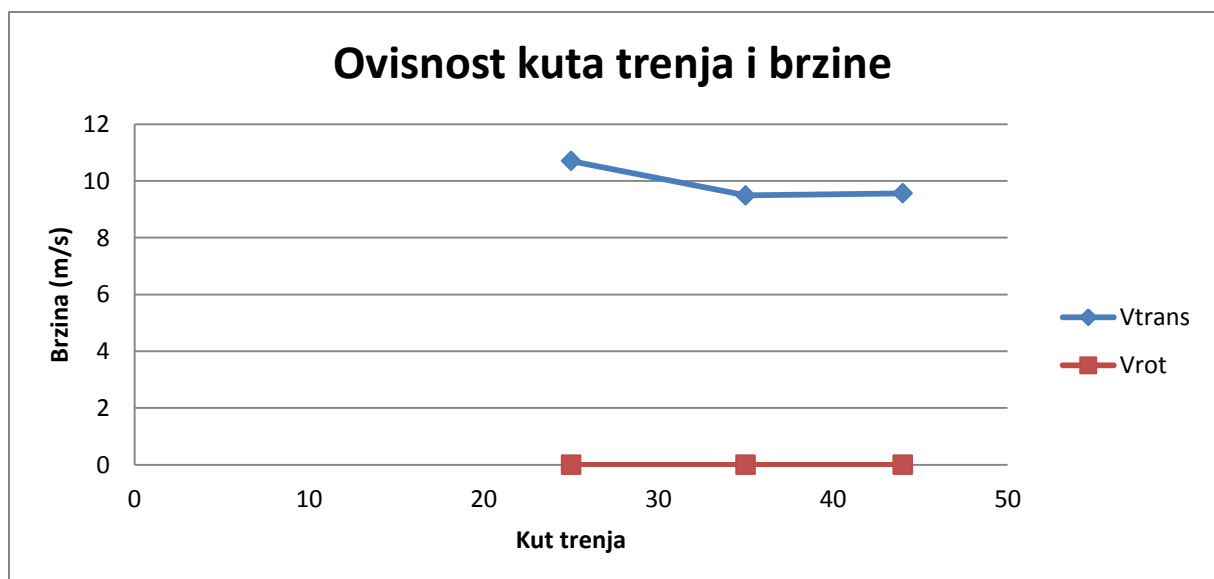


Dijagram 28. Ovisnost kuta trenja i energije nakon sudara

Iz dijagram se vidi kako nakon sudara povećanjem kuta trenja linearno opada translacijska kinetička energija dok promjena kuta ne utječe na rotacijsku energiju te je ona konstantna.

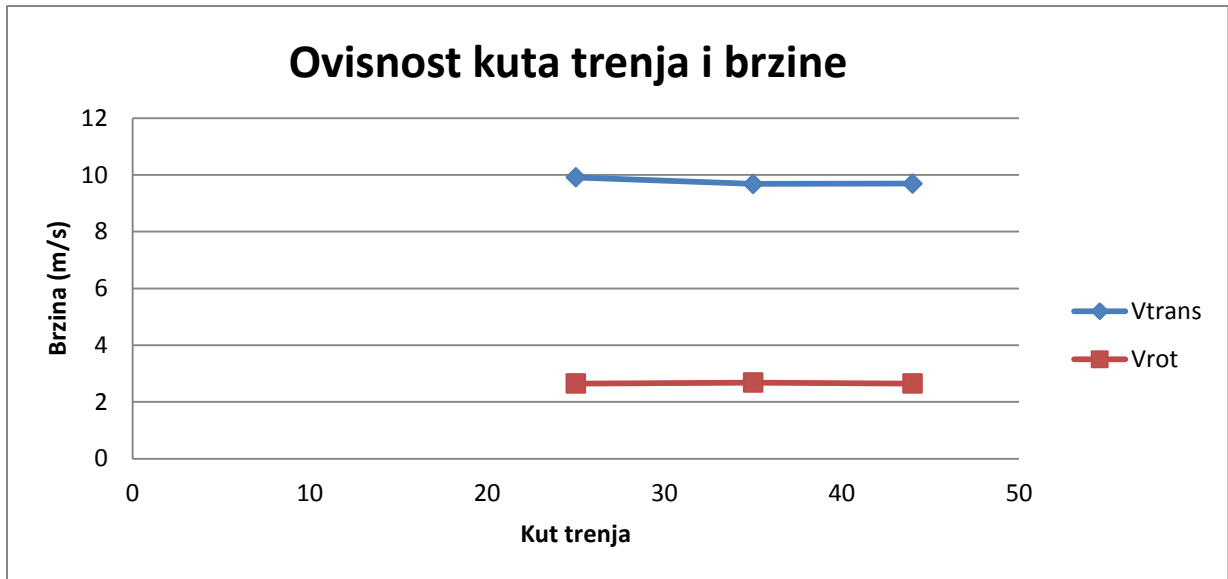
### Ovisnost kuta trenja i brzine

U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost kuta trenja i brzine prije i poslije sudara za parametre  $R_n = 0.4$  i  $R_t = 0.8$ .



Dijagram 29. Ovisnost kuta trenja i brzine prije sudara



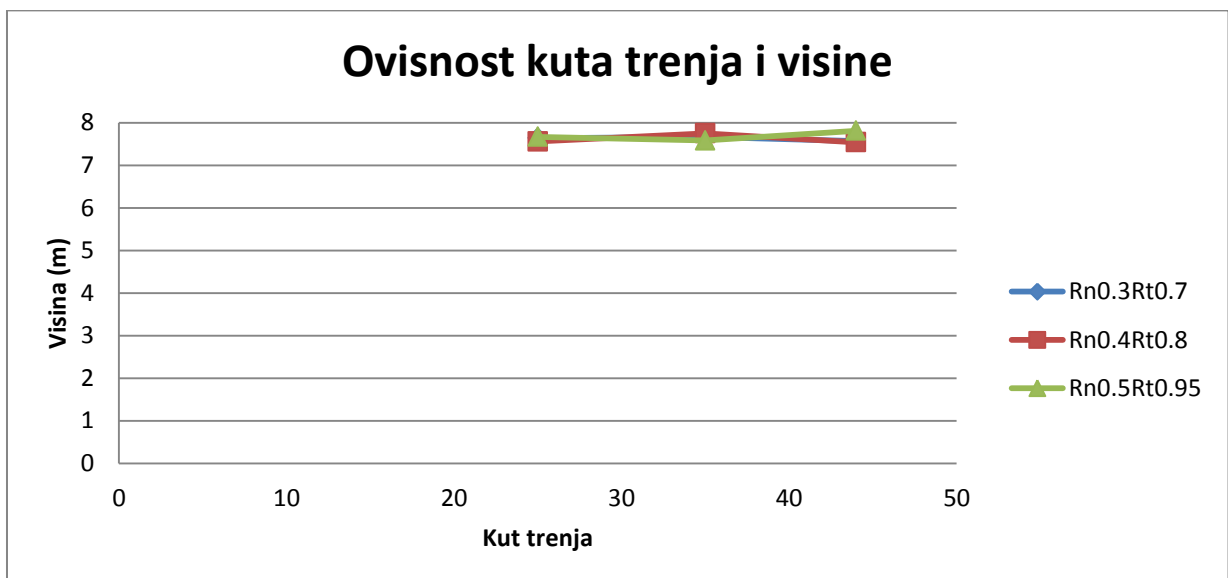


Dijagram 30. Ovisnost kuta trenja i brzine nakon sudara

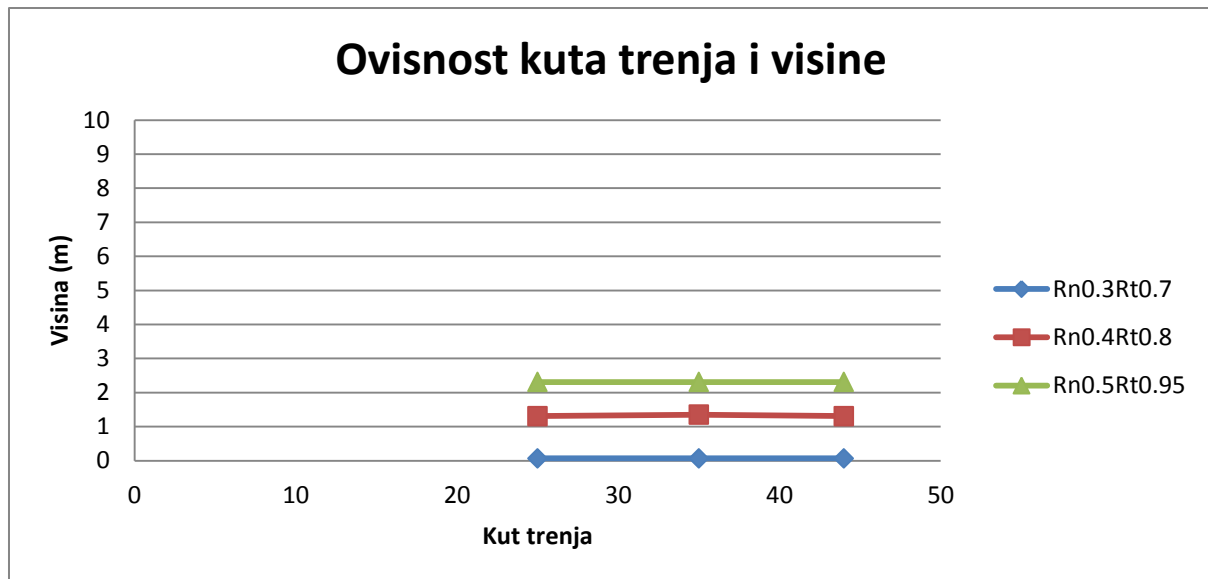
Iz dijagrama možemo vidjeti da kut trenja ne utječe na promjenu brzine, mali utjecaj ima na brzinu u smjeru tangente, no na brzinu u smjeru okomito na podlogu nema nikakav utjecaj.

### Ovisnost kuta trenja i visine

U sljedećim dijagramima je prikazana ovisnost kuta trenja i visine odskoka prije i poslije sudara za različite parametre koeficijenta restitucije.



Dijagram 31. Ovisnost kuta trenja i visine prije sudara



Dijagram 32. Ovisnost kuta trenja i visine nakon sudara

Iz prikazanih dijagrama vidimo da kut trenja ne utječe na visinu odskoka prije ni nakon sudara.

## 3.2. Analiza rezultata

U prethodnom poglavlju prikazani su dijagrami parametara te kako pojedini parametar utječe na promjenu energije, brzine i visine odskoka.

Sada će biti opisane pretpostavke koje su korištene da bih se odredila masa kamena pri kojoj dolazi do loma bloka.

Biti će prikazani rezultati iz programskog software-a RocFall v4.0. te pri kojoj kinetičkoj energiji bloka dolazi do loma. Također, biti će prikazana promjena energije u ekvivalentnu statičku silu.

Na temelju energije u danom presjeku odabran je tip barijere.

### 3.2.1. Izračun energije pri kojoj dolazi do loma bloka

Da bismo mogli proračunati energiju pri kojoj dolazi do loma potrebno je izračunati brzinu. Brzina ovisi o modulu elastičnosti. Naime, iz dosadašnjih istraživanja B.Žlendera [1] o ponašanju modula elastičnosti u odronima došlo se do rezultata da modul elastičnosti opada sa polumjerom kamena. To proizlazi iz činjenice da veći polumjer znači i veći volumen bloka, a što je volumen bloka veći pretpostavlja se da u samom bloku postoje pukotine te kad se blokovi promatraju kao cjeline time dolazimo do zaključka da je čvrstoća većeg kamena manja tj. da je modul elastičnosti manji. Odnosno potrebna je manja sila za razbijanje bloka. Ta pretpostavka je jako bitna pri proračunu energije pri kojoj dolazi do loma bloka na manje dijelove. S obzirom da se modul elastičnosti kreće u intervalu 16 – 40 GPa, a rezultat je preuzet iz istraživanja P.Miščevića i G. Vlastelica 2012. te ga možemo vidjeti u prilogu ispod.

#### Young modulus (intact rock)

| type of rock  | E (GPa)   |
|---------------|-----------|
| limestone     | 16.0-40.0 |
| marl (flysch) | 8.0 -16.0 |

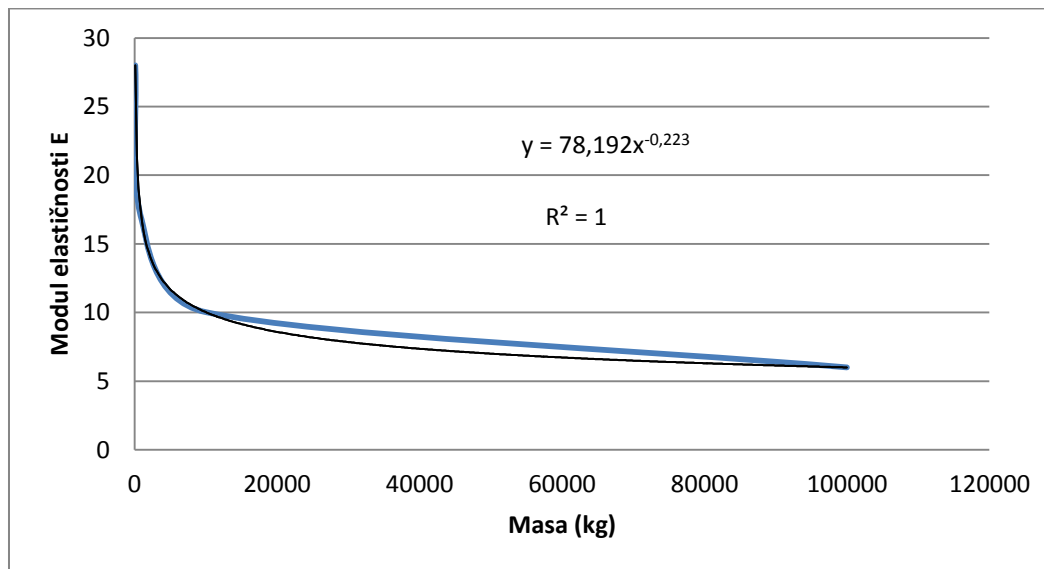
Tablica 5. Modul elastičnosti za intaktnu sijenu

Jednoosna tlačna čvrstoća je jedan od ključnih faktora koji utječu na brzinu pri kojoj dolazi do loma. Naime, vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće nemamo iz terenskih istraživanja jer su njihovi rezultati o samoj podlozi terena, stoga su podaci uzeti iz S.Šestanovića.

| STIJENA           | PROSTORNA<br>MASA $\gamma_v$ | POROZNOST<br>$n$ | ČVRSTOĆA<br>NA TLAK<br>$\sigma_{tl}$ | ČVRSTOĆA<br>NA VLAK<br>$\sigma_{vl}$ | BRZINA<br>ŠIRENJA<br>ELASTIČNIH<br>SEIZMIČKIH<br>VALOVA $V_p$ | BRZINA<br>ŠIRENJA<br>ELASTIČNIH<br>SEIZMIČKIH<br>VALOVA $V_s$ | YOUNGOV<br>MODUL | MODUL<br>NA SMIK | POISSONOV<br>KOEFIČIJENT |
|-------------------|------------------------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|---|------------------|------------------|--------------------------|
|                   | $\text{gcm}^{-3}$            | % vol            | MPa                                  | MPa                                  | km/s  | km/s  | $10^{11}$ Pa     | $10^{11}$ Pa     | $\mu$                    |
| 1                 | 2                            | 3                | 4                                    | 5                                    | 6   | 7   | 8                | 9                | 10                       |
| Breče             | 2,30 - 2,75                  | 0,8 - 2,0        | 100 - 200                            | 5 - 20                               | 1,45 - 5,6  | 1,2 - 3,5   | 0,12 - 1,42      | 0,11 - 0,65      | 0,12 - 0,35              |
| Konglo-<br>merati | 2,60 - 2,72                  | 0,8 - 2,0        | 100 - 200                            | 5 - 20                               | 1,45 - 5,6  | 1,2 - 3,5   | 0,12 - 1,42      | 0,11 - 0,65      | 0,12 - 0,35              |
| Pješčenjaci       | 2,60 - 8,90                  | 2 - 18           | 80 - 200                             | 4 - 25                               | 1,8 - 4,5   | 1,0 - 3,4   | 0,15 - 0,75      | 0,12 - 0,59      | 0,12 - 0,30              |
| Lapori            | 1,20 - 3,00                  | 0,7 - 48         | 20 - 130                             | 0,5 - 7                              | 1,3 - 4,5   | 1,1 - 3,5   | 0,15 - 0,46      | 0,09 - 0,42      | 0,3 - 0,4                |
| Prapori           | 1,13 - 2,25                  | 30 - 60          |                                      |                                      | 0,3 - 0,6   | 0,12 - 0,3  | 0,3 - 0,7        |                  | 0,3 - 0,5                |
| Gline             | 1,20 - 2,50                  | 4 - 75           |                                      |                                      | 0,3 - 3,0   | 0,2 - 1,2   | 0,02 - 0,4       |                  | 0,4 - 0,5                |

Slika 12. Rasponi unutar koji se nalaze fizičko - mehaničke značajke stijena (Farmer, 1968., Schon, 1983., Kobranova, 1989., u rezultati istraživanja u laboratoriju IGH – PC Split)

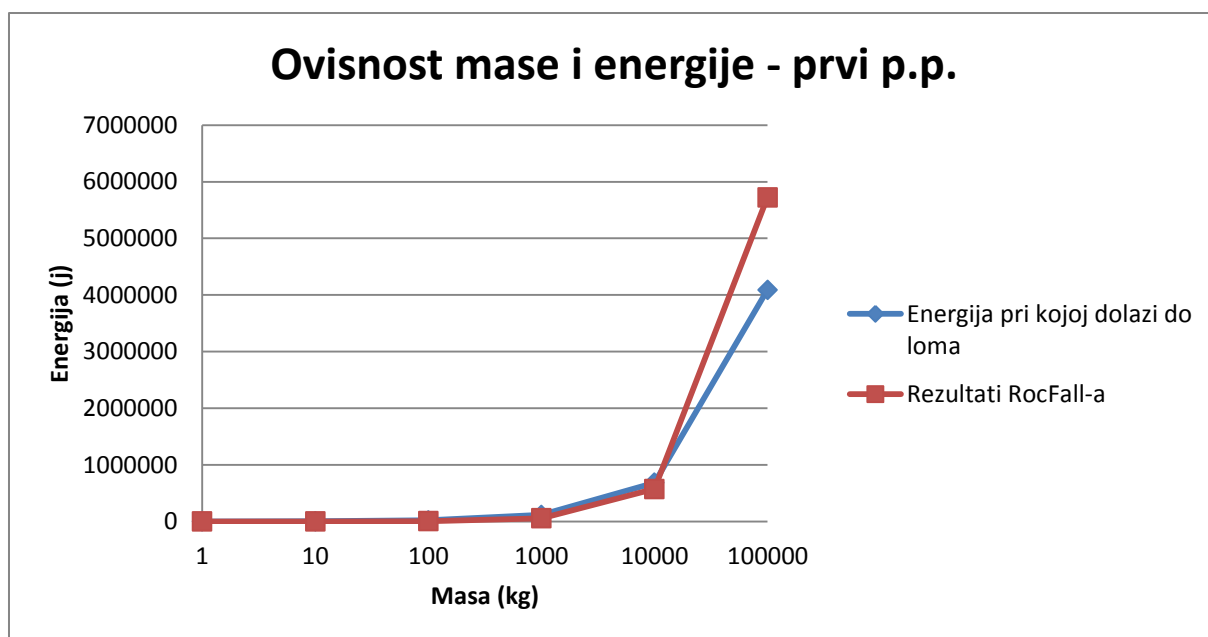
Vrijednosti modula elastičnosti aproksimirali smo sa funkcijom :



Dijagram 33. Ovisnost mase i modula elastičnosti

Brzina ovisi o specifičnoj deformaciji, modulu elastičnosti te jednoosnoj tlačnoj čvrstoći. Povećanjem jednoosne tlačne čvrstoće povećava se brzina pri kojoj dolazi do loma. Povećanjem modula elastičnosti granična brzina se nelinearno smanjuje.

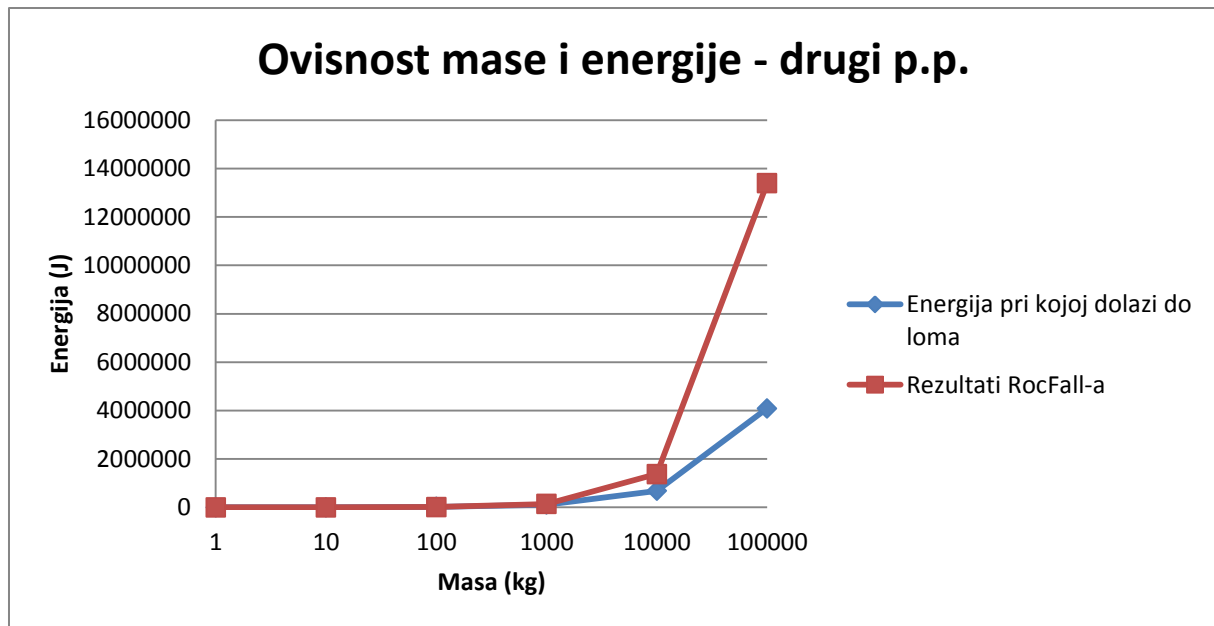
S obzirom da nemamo točne podatke o deformaciji odabrali smo deformaciju od 0.01, 0.001 i 0.005. Pri deformaciji od 1% dobijemo brzine za koje možemo zaključiti pri kojoj masi dolazi do loma na manje dijelove. Za odabranu brzinu izračunamo kinetičku energiju pri kojoj dolazi do loma. Rezultate se može vidjeti u priloženim dijagramima te u tablica za oba poprečna presjeka.



Slika 34. Odnosi kinetičke energije pri kojoj dolazi do loma za prvi poprečni presjek

| Energija loma (J) | Rezultat RocFall-a (J) |
|-------------------|------------------------|
| 191               | 57                     |
| 1909              | 573                    |
| 19091             | 5726                   |
| 114243            | 57257                  |
| 683645            | 572573                 |
| 4091013           | 5725726                |

Tablica 6. Odnosi kinetičke energije pri kojoj dolazi do loma za prvi poprečni presjek



Slika 35. Odnosi kinetičke energije pri kojoj dolazi do loma za drugi poprečni presjek

| Energija loma (J) | Rezultat RocFall-a (J) |
|-------------------|------------------------|
| 191               | 136                    |
| 1909              | 1358                   |
| 19091             | 13652                  |
| 114243            | 138269                 |
| 683645            | 1380024                |
| 4091013           | 13393305               |

Tablica 7. Odnosi kinetičke energije pri kojoj dolazi do loma za drugi poprečni presjek

Iz priloga vidimo da kod prvog poprečnog presjeka do loma dolazi tek kod blokova oko 10 t. Kod drugog presjeka dolazi do loma već kod 1 t. S obzirom na geometriju terena ukoliko promatramo lokaciju prvog sudara vidimo da visina s koje dolazi do odrona i površine kosine je manja nego kod drugog presjeka. Također očitana energija za oba presjeka nije očitana u istim uvjetima. Naime, nedostatka RocFall-a 4.0. je što presjek očitavanja određuje sam software te nije moguće odabrati točnu lokaciju. Razlika očitavanja je u tome što kod drugog presjeka je energija veća jer je očitana gotovo prije samog sudara gdje blok posjeduje najveću brzinu, a samim time i veću kinetičku energiju. No ipak, bez obzira na taj uvjet razlika u energija bi svakako postojala samo bi u slučaju jednakih uvjeta ta razlika bila manja.

### 3.2.2. Rezultati RocFall-a

Karakteristike kosine za prvi poprečni presjek:

Koeficijent restitucije u smjeru normale:  $R_n = 0.4$

Koeficijent restitucije u smjeru tangente:  $R_t = 0.8$

Kut trenja:  $\rho = 25^\circ$

Karakteristike bloka :

Masa: 1000 kg

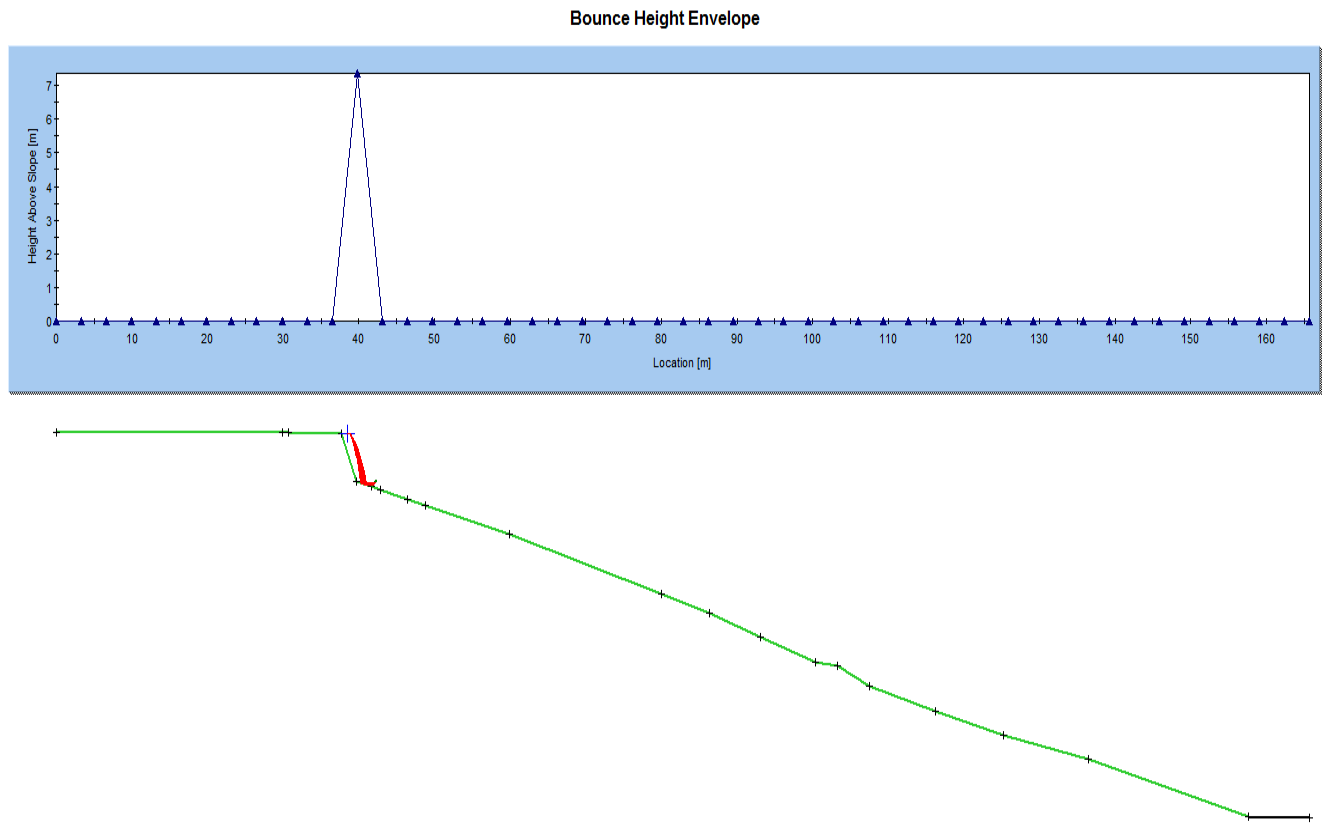
Početna brzina: 1.5 m/s

Jedinična gustoća bloka:  $2750 \text{ kg/m}^3$

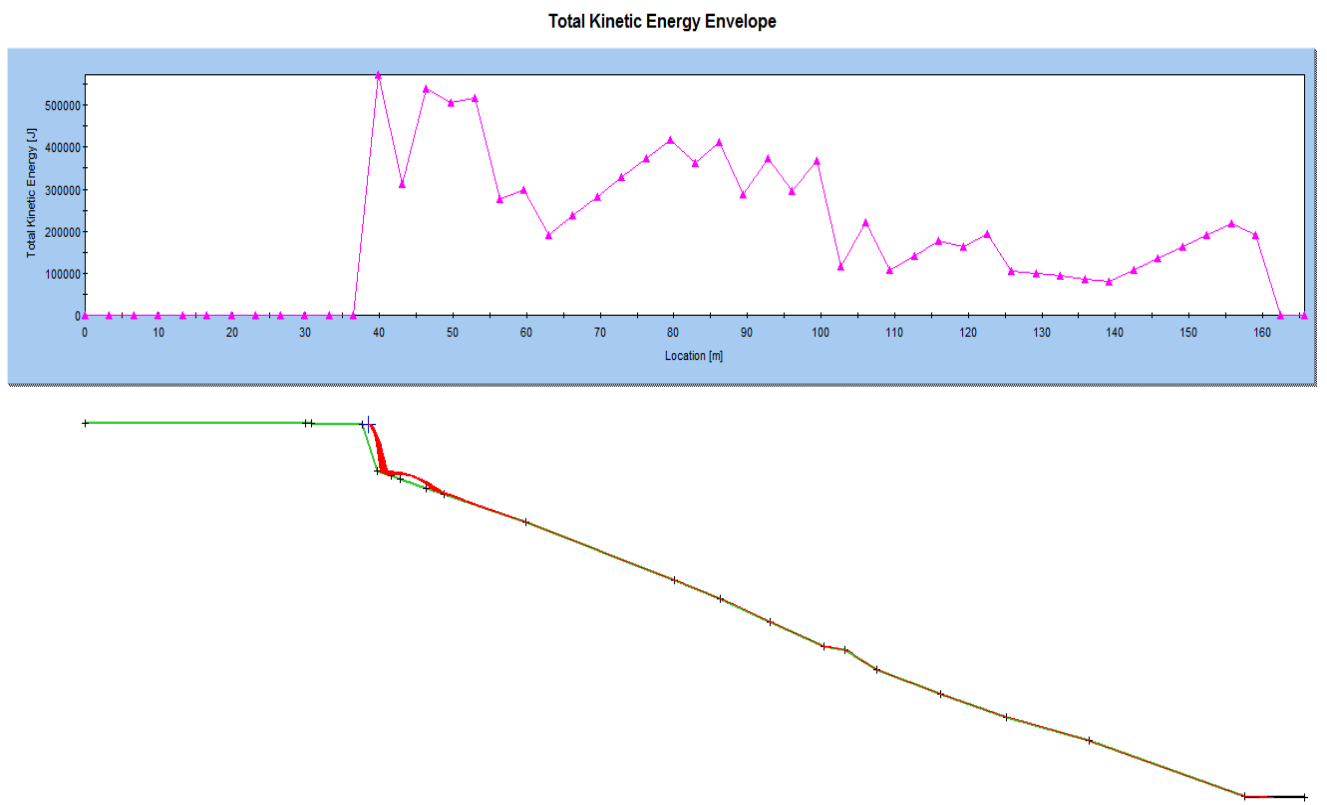


Slika 13. Trajektorija gibanja karakterističnog poprečnog presjeka

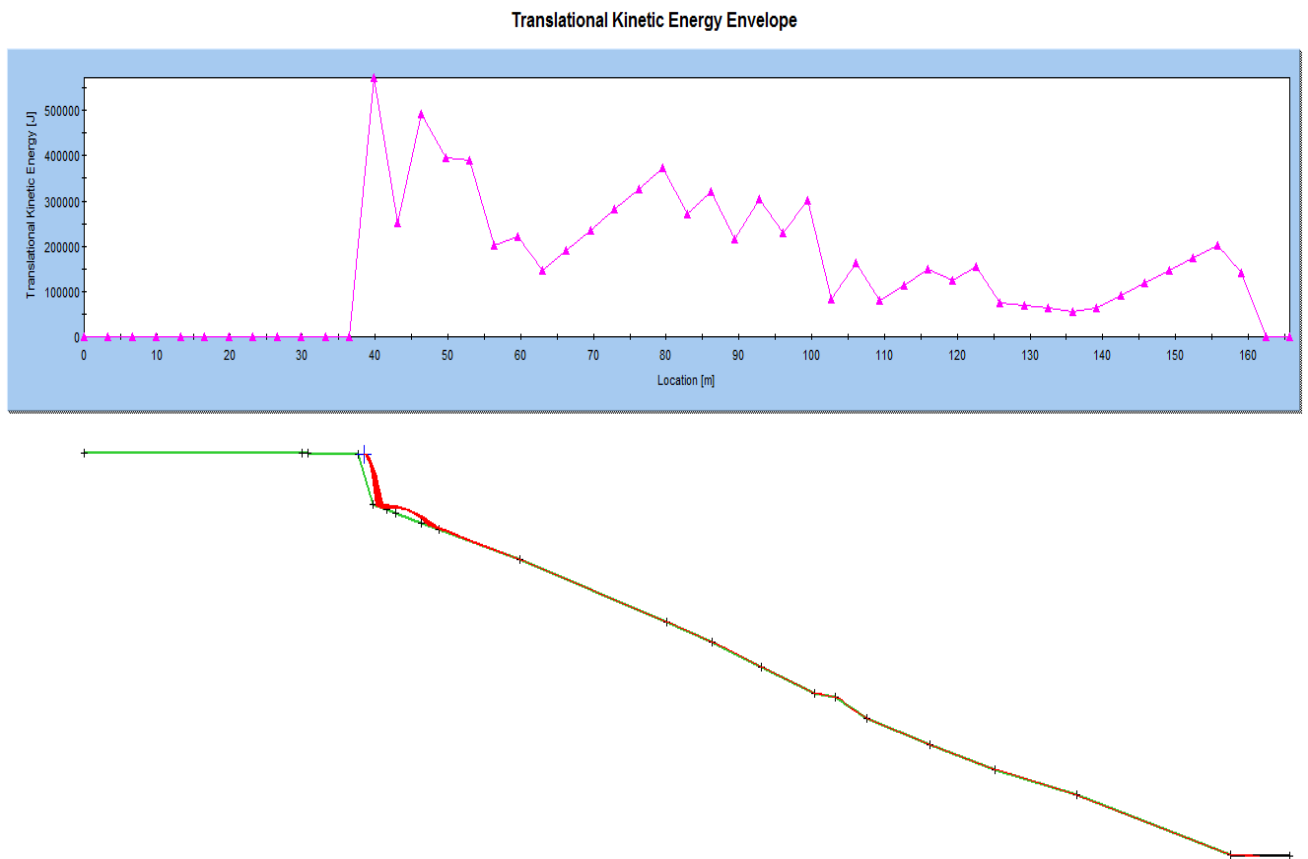




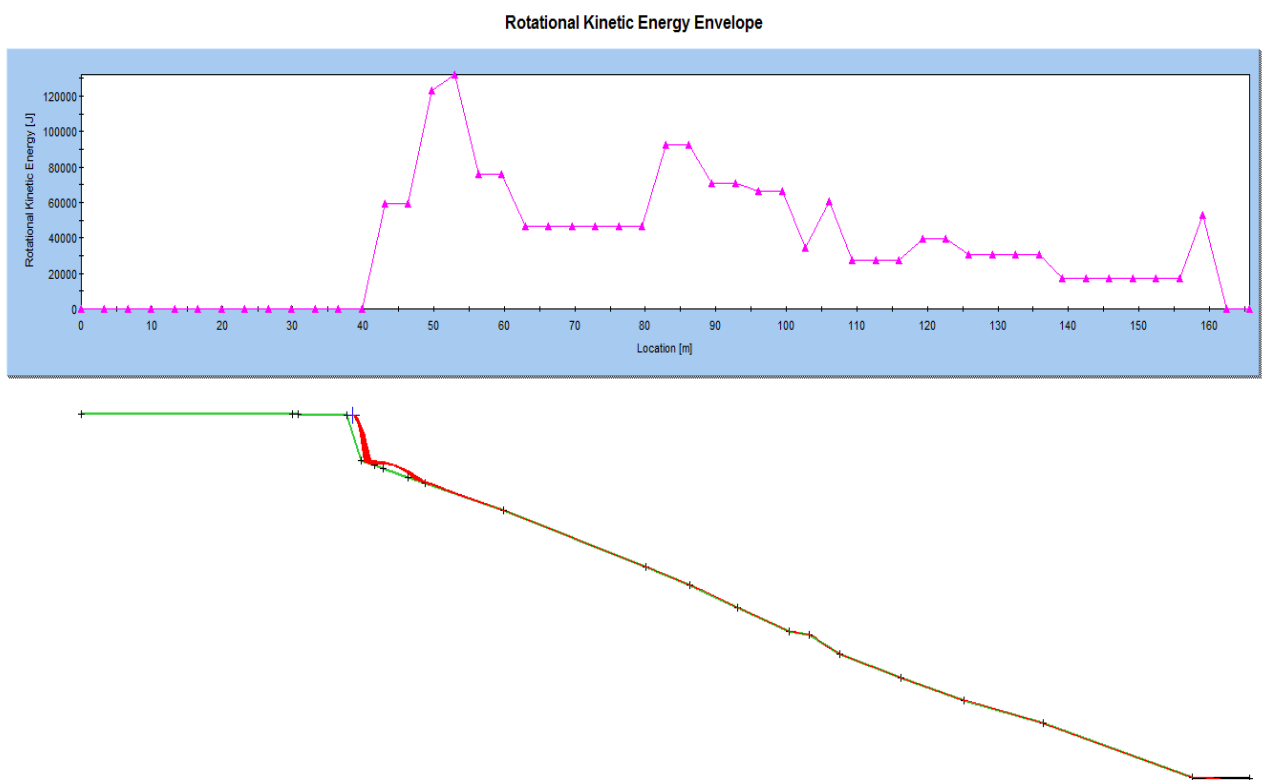
Slika 14. Dijagram visine bloka iznad površine



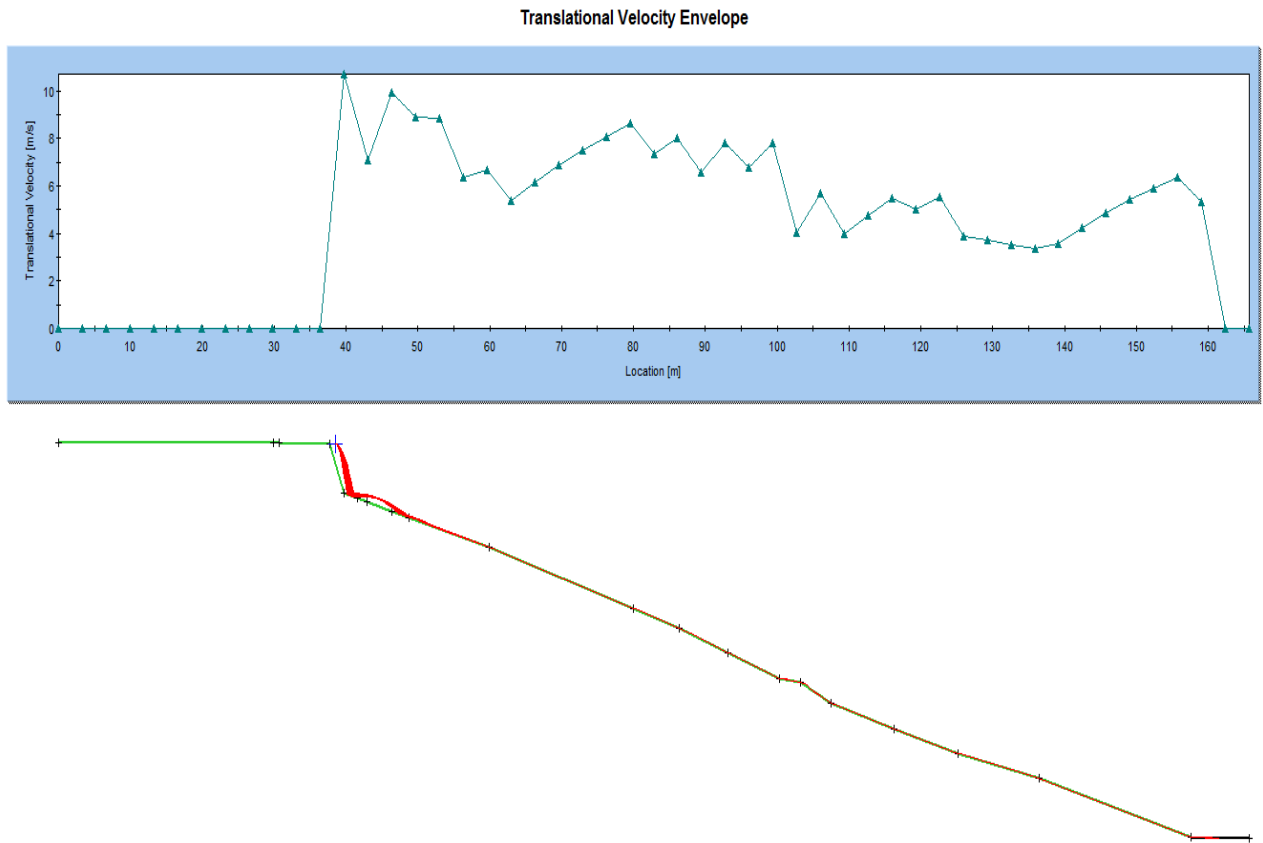
Slika 15. Dijagram ukupne kinetičke energije



Slika 16. Dijagram translacijske kinetičke energije



Slika 17. Dijagram rotacijske kinetičke energije



Slika 18. Dijagram translacijske brzine



Slika 19. Dijagram rotacijske brzine

Karakteristike kosine za drugi poprečni presjek:

$H_0 = 74$  m visina kosine

$L = 110$  m duljina kosine

$\beta = 35^\circ$  nagib kosine

Koeficijent restitucije u smjeru normale:  $R_n = 0.4$

Koeficijent restitucije u smjeru tangente:  $R_t = 0.8$

Kut trenja:  $\rho = 25^\circ$

Karakteristike bloka :

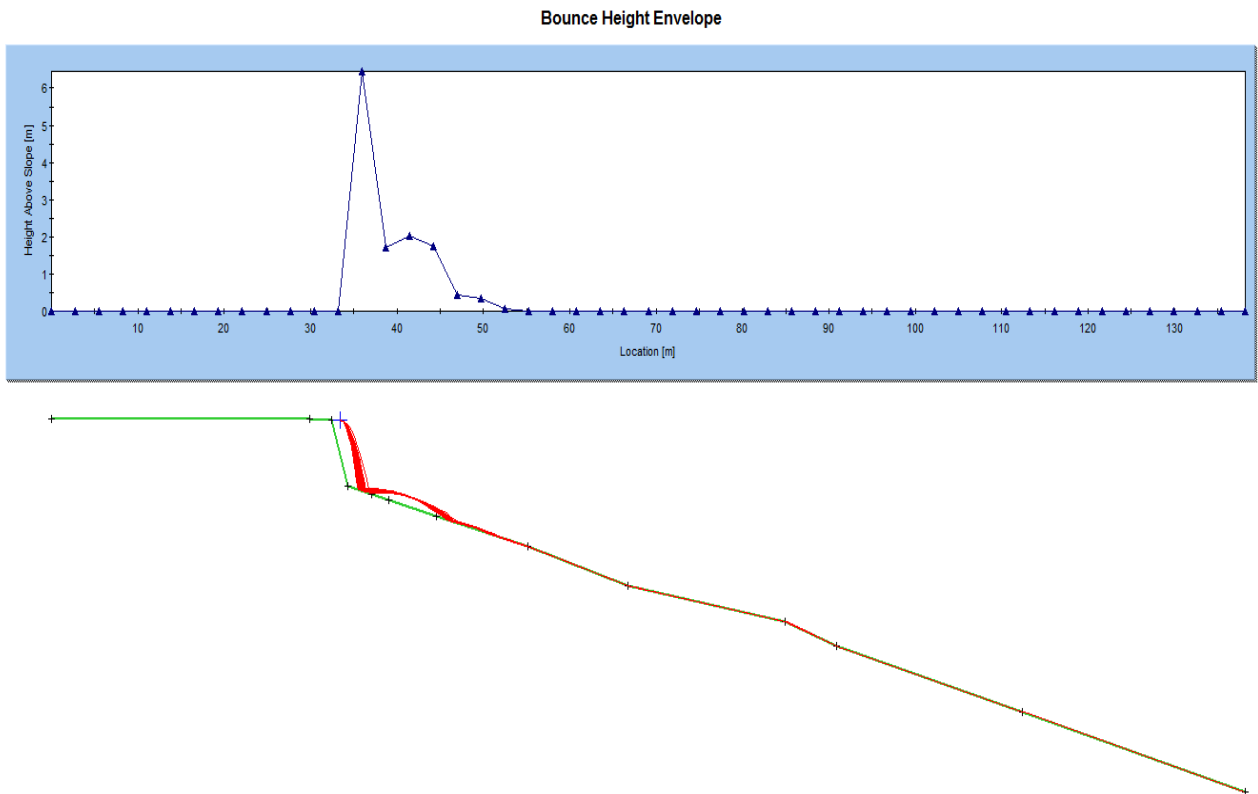
Masa: 1000 kg

Početna brzina: 1.5 m/s

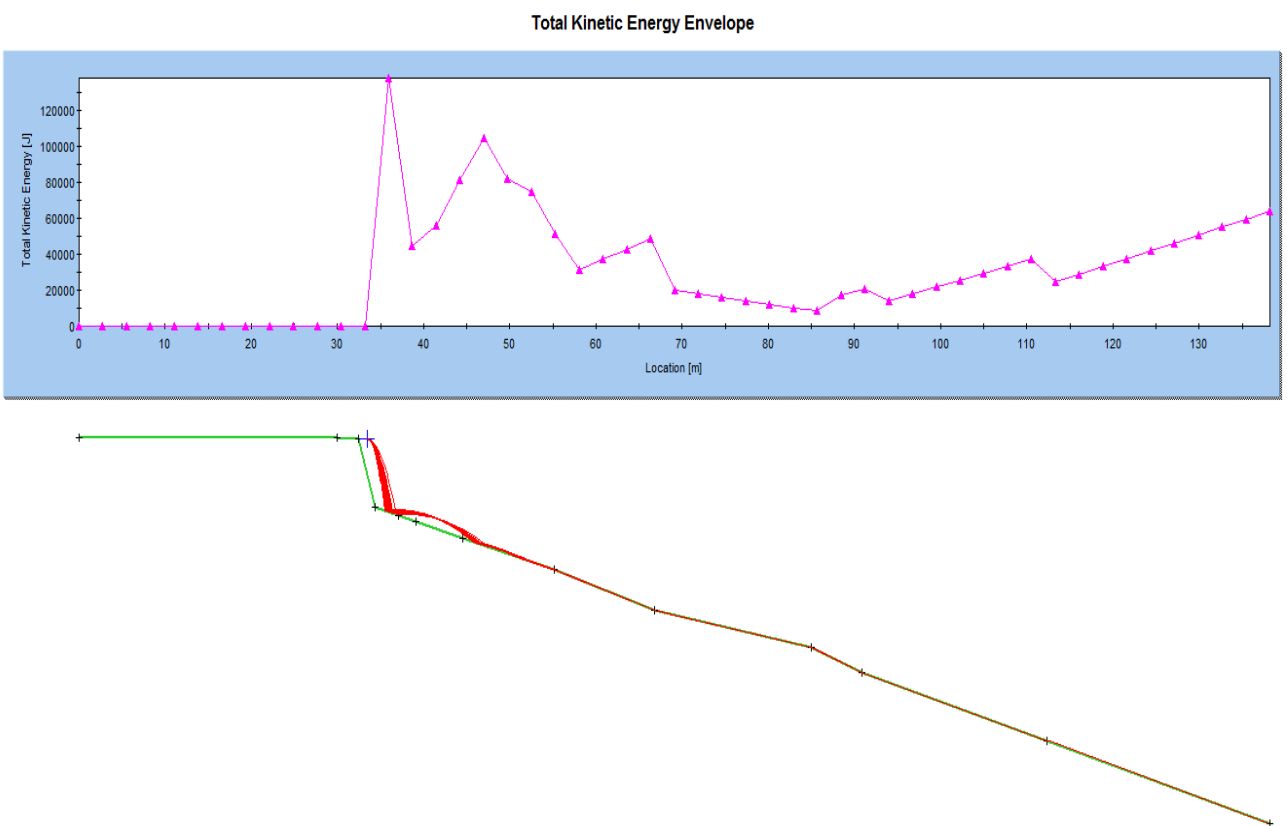
Jedinična gustoća bloka:  $2750 \text{ kg/m}^3$



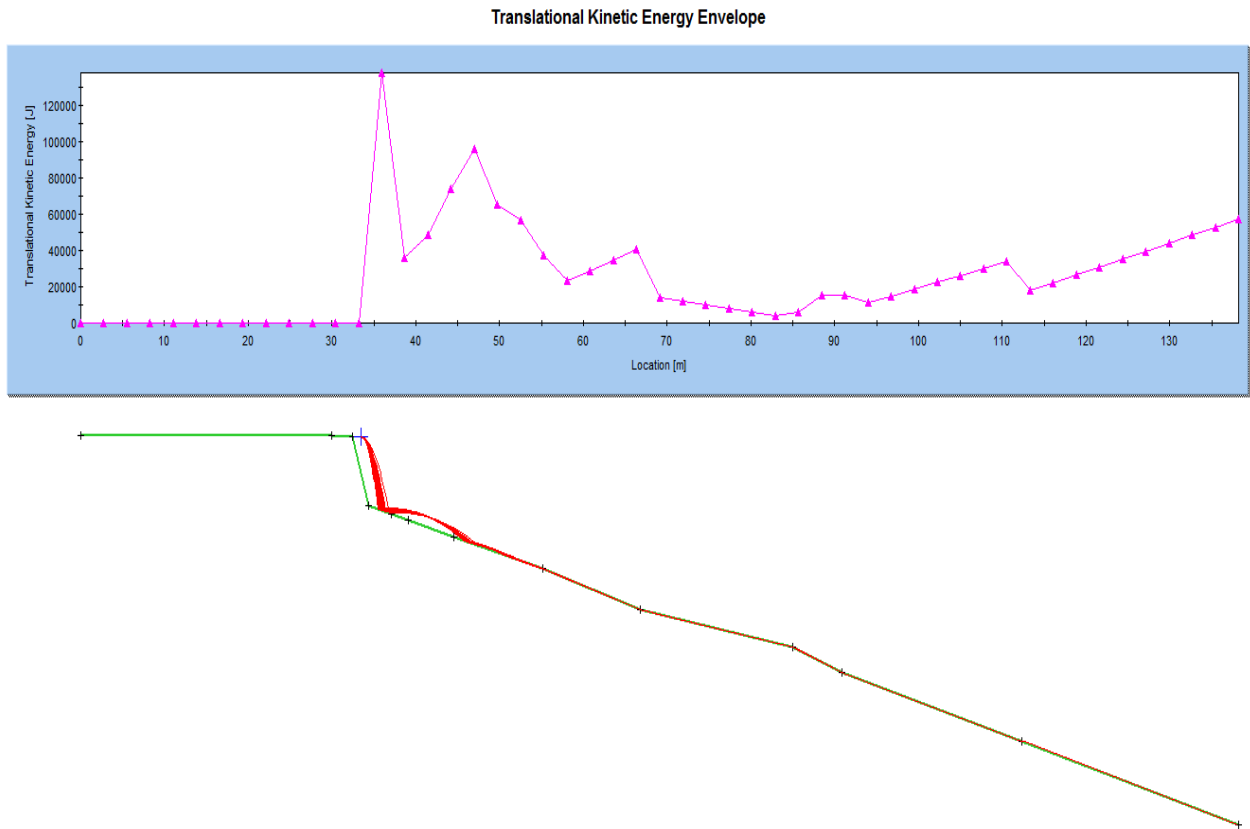
Slika 20. Trajektorija gibanja karakterističnog poprečnog presjeka



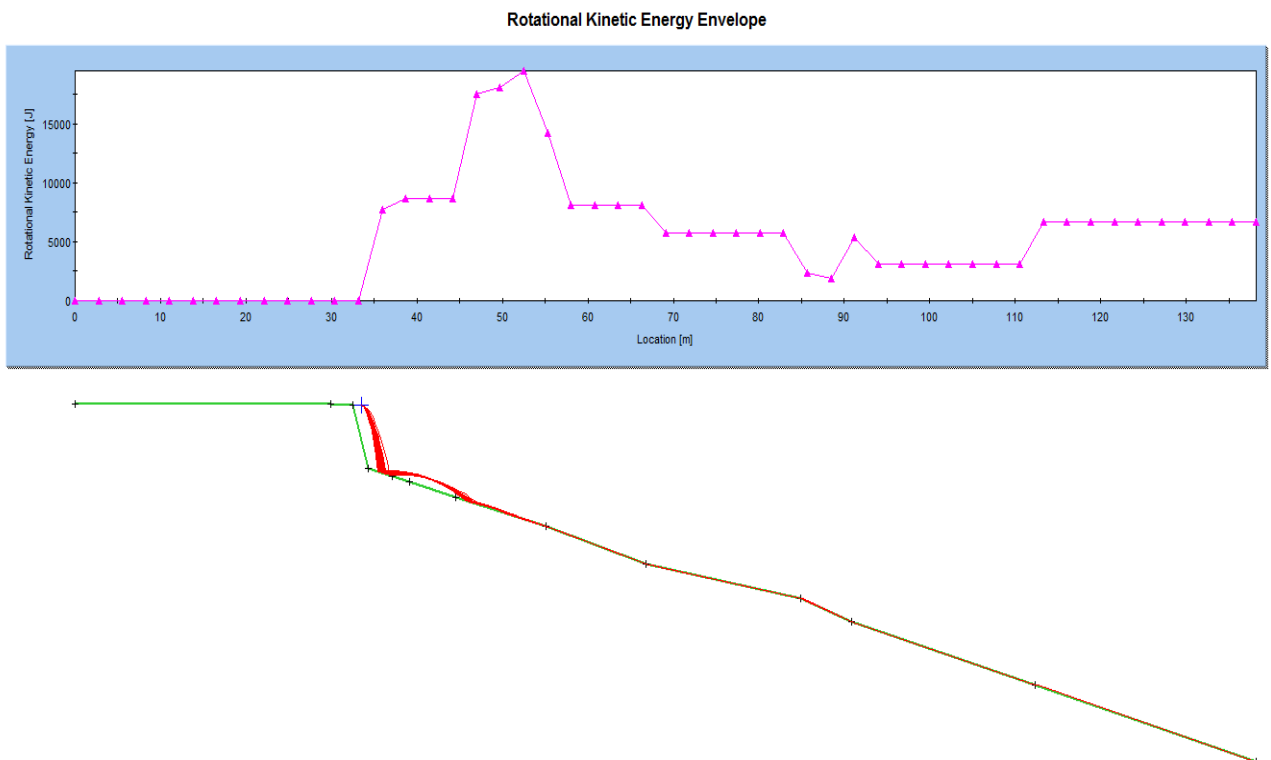
Slika 21. Dijagram visine odskoka



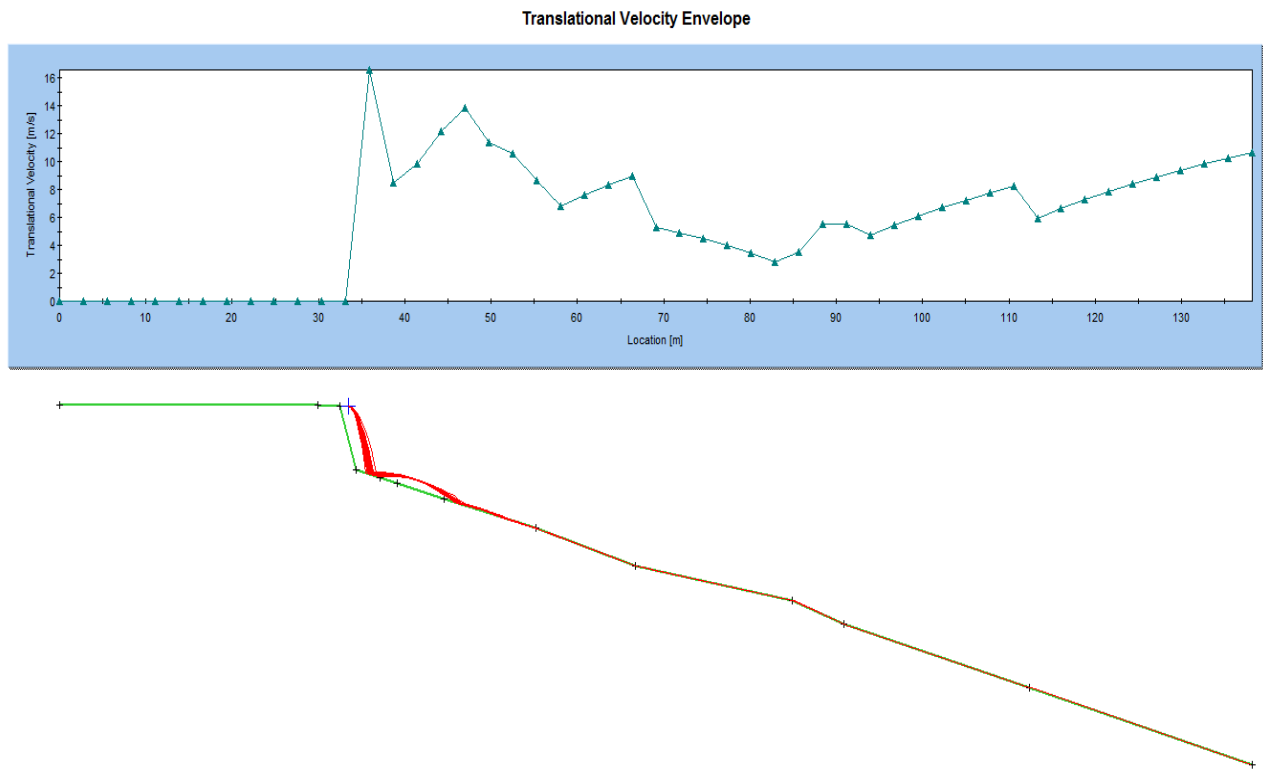
Slika 22. Dijagram ukupne kinetičke energije



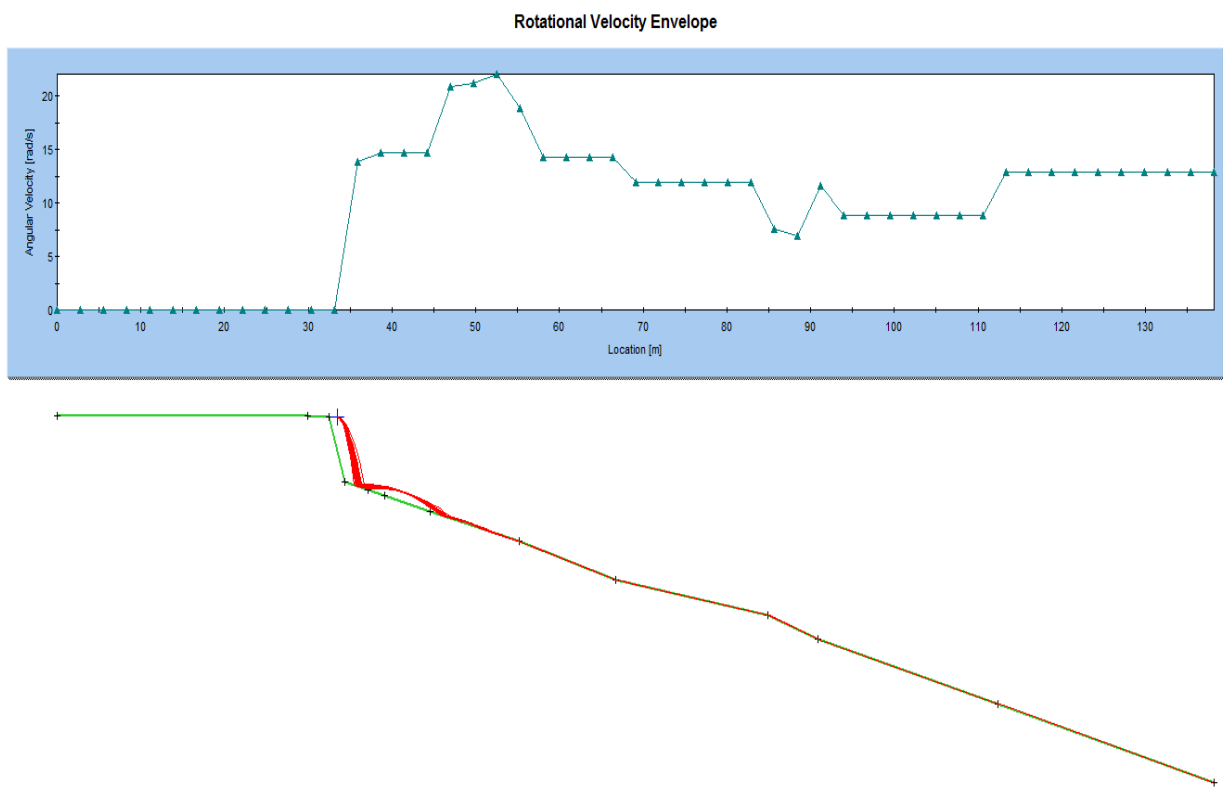
Slika 23. Dijagram translacijske kinetičke energije



Slika 24. Dijagram rotacijske kinetičke energije



Slika 25. Dijagram translacijske brzine



Slika 26. Dijagram rotacijske brzine

### 3.2.3. Izračun ekvivalentne statičke sile padajućeg bloka

Potrebno je izračunati ekvivalentnu statičku silu koju ima blok određene mase kako bismo mogli dimenzionirati zaštitni zid. U poglavlju 2.4.7. prikazali smo kako dolazimo do formule za proračun sile.

$$F = \frac{2 * m * v}{\Delta t}$$

$v = 10.7 \text{ m/s}$  očitana maksimalna brzina za prvi poprečni presjek

$$\Delta t = \frac{\vec{R} * \varepsilon}{\frac{v_{pr}}{2}} = \frac{2 * \vec{R} * \varepsilon}{v_{pr}}$$

| Vrijeme $\Delta t$ | Masa (kg) |
|--------------------|-----------|
| 0.0001             | 1         |
| 0.0002             | 10        |
| 0.0005             | 100       |
| 0.0010             | 1000      |
| 0.0022             | 10000     |
| 0.0046             | 100000    |

Tablica 8. Prikaz mase i vremena sudara za prvi poprečni presjek

| Masa (kg) | Sila (kN) |
|-----------|-----------|
| 1         | 207       |
| 10        | 970       |
| 100       | 4535      |
| 1000      | 4641      |
| 10000     | 99215     |
| 100000    | 464063    |

Tablica 9. Prikaz ekvivalentne sile za određenu masu za prvi poprečni presjek



$v = 16.20$  m/s očitana maksimalna brzina za drugi poprečni presjek

| Vrijeme $\Delta t$ | Masa (kg) |
|--------------------|-----------|
| 0.000068           | 1         |
| 0.000146           | 10        |
| 0.000312           | 100       |
| 0.000666           | 1000      |
| 0.001425           | 10000     |
| 0.003046           | 100000    |

Tablica 10. Prikaz mase i vremena sudara za drugi poprečni presjek

| Masa (kg) | Sila (kN) |
|-----------|-----------|
| 1         | 314       |
| 10        | 1468      |
| 100       | 6866      |
| 1000      | 32115     |
| 10000     | 150213    |
| 100000    | 702600    |

Tablica 11. Prikaz ekvivalentne sile za određenu masu za drugi poprečni presjek

### 3.3. Usporedba rezultata RocFall-a v5.0

U ovom odjeljku biti će prikazani rezultati RocFall v5.0. Kao što je već opisano namjena je vidjeti utjecaje na rezultate s obzirom na promjenu načina modeliranja bloka. U konačnici rezultati su ostali isti u pogledu odabira kapaciteta barijere. No, utjecaj na brzinu i ukupnu kinetičku energiju su vidljivi. Bitno je za napomenuti da novija verzija RocFall-a ne uzima kao ulazi parametar kut trenja materijala.

Karakteristike kosine za prvi poprečni presjek (lokacija 39 m):

$H_0 = 70$  m visina kosine

$L = 120$  m duljina kosine

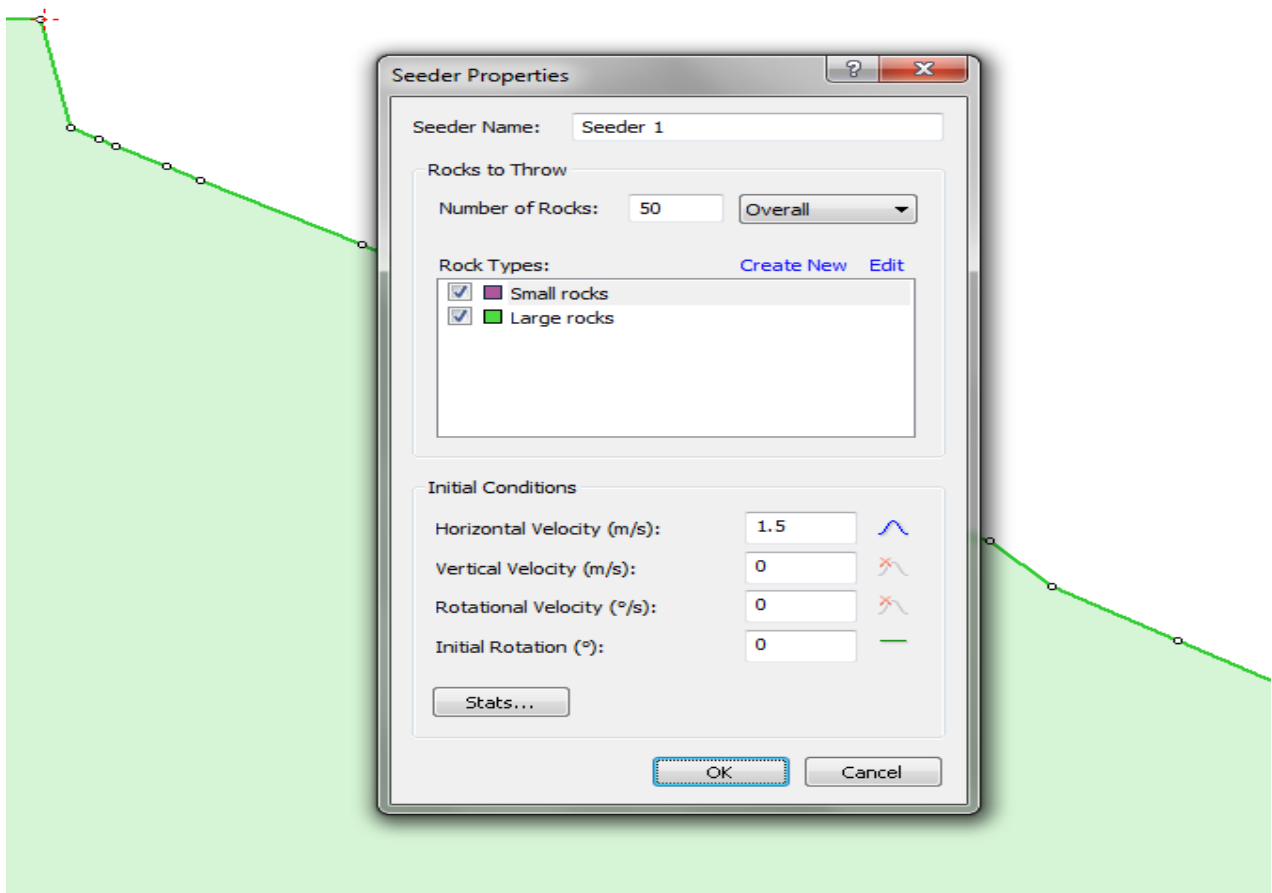
$\beta = 30^\circ$  nagib kosine

Koeficijente restitucije smo odabrali kao i kod ranije verzije.

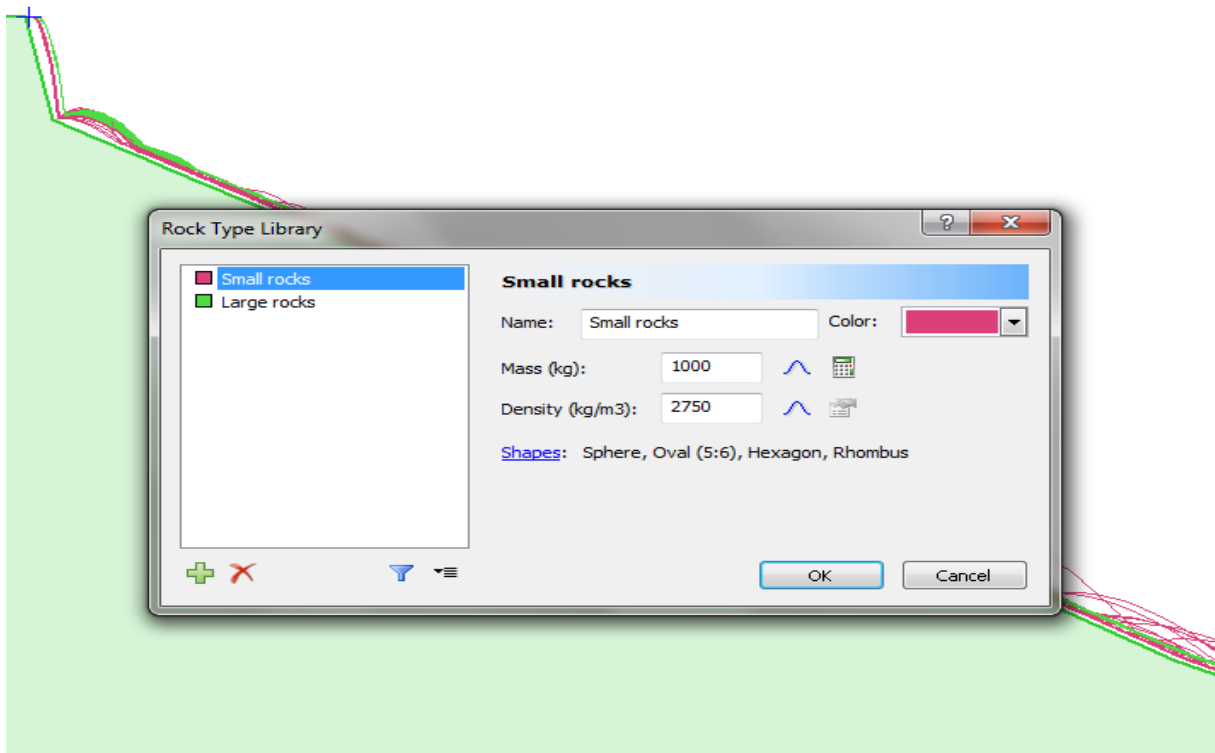
Koeficijent restitucije u smjeru normale:  $R_n = 0.4$

Koeficijent restitucije u smjeru tangente:  $R_t = 0.8$

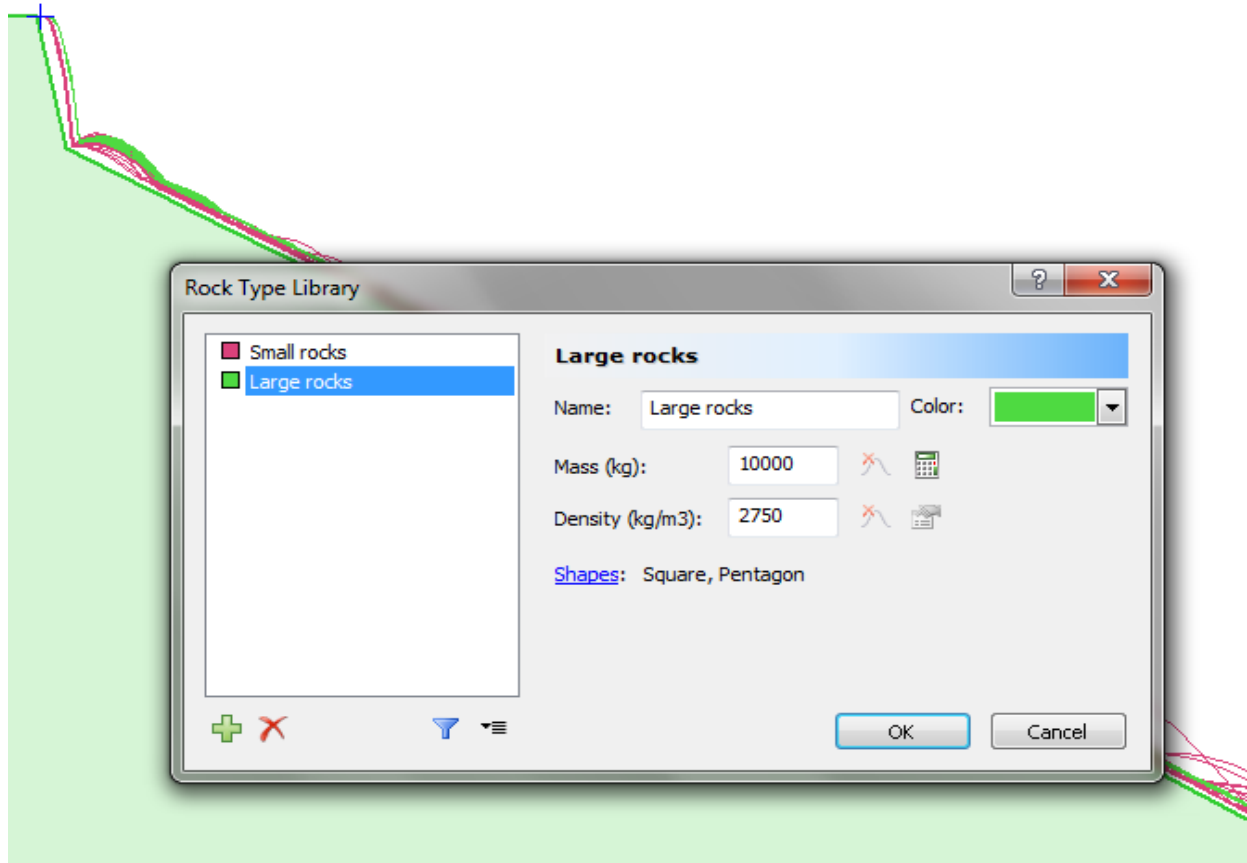
Što se tiče karakteristika bloka način zadavanja početnih uvjeta je drugačiji. Ovdje nemamo raspon mase od 1 – 100000 kg već imamo dvije kategorije blokova. Prva kategorija su tzv. „mali blokovi“ koji su mase 1000 kg sa standardnom devijacijom 100 te određenih oblika. Druga kategorija su veliki blokovi mase 10000 kg također karakterističnih oblika. Početni uvjeti su isti, dakle početna brzina je 1.5 m/s sa standardnom devijacijom 0.4.



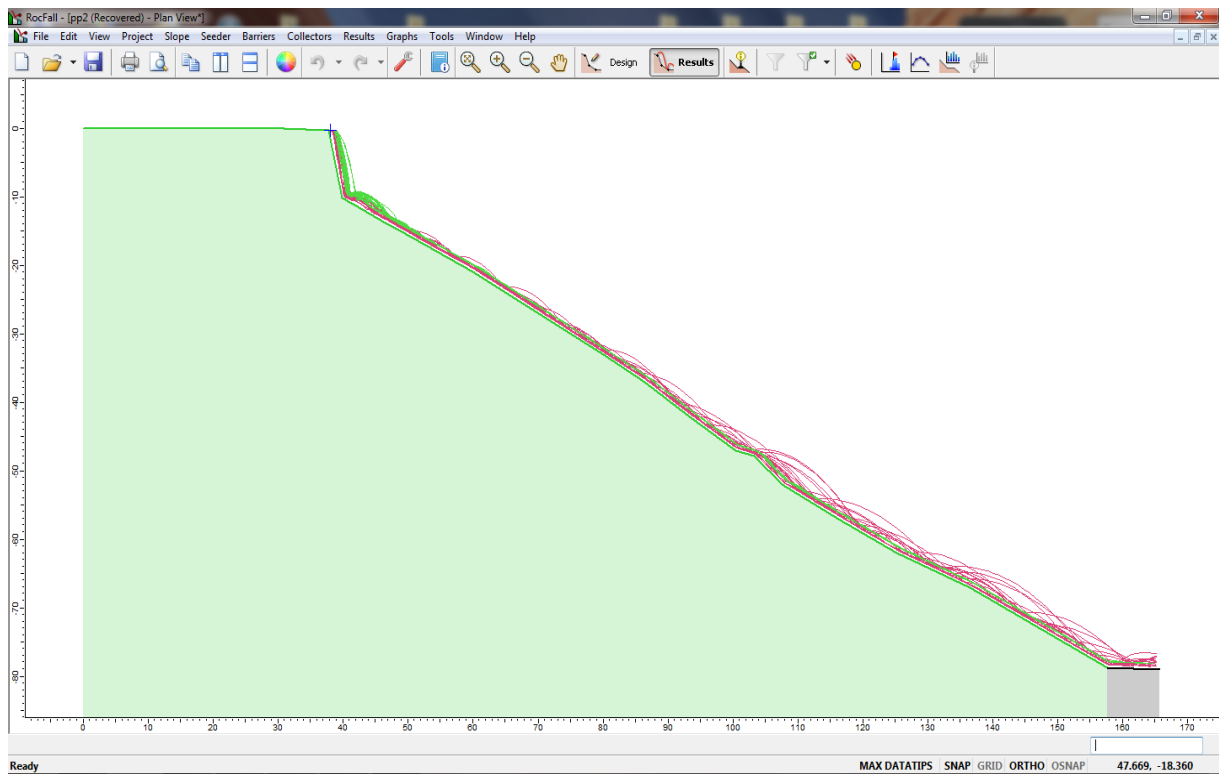
Slika 27. Prikaz karakteristika bloka



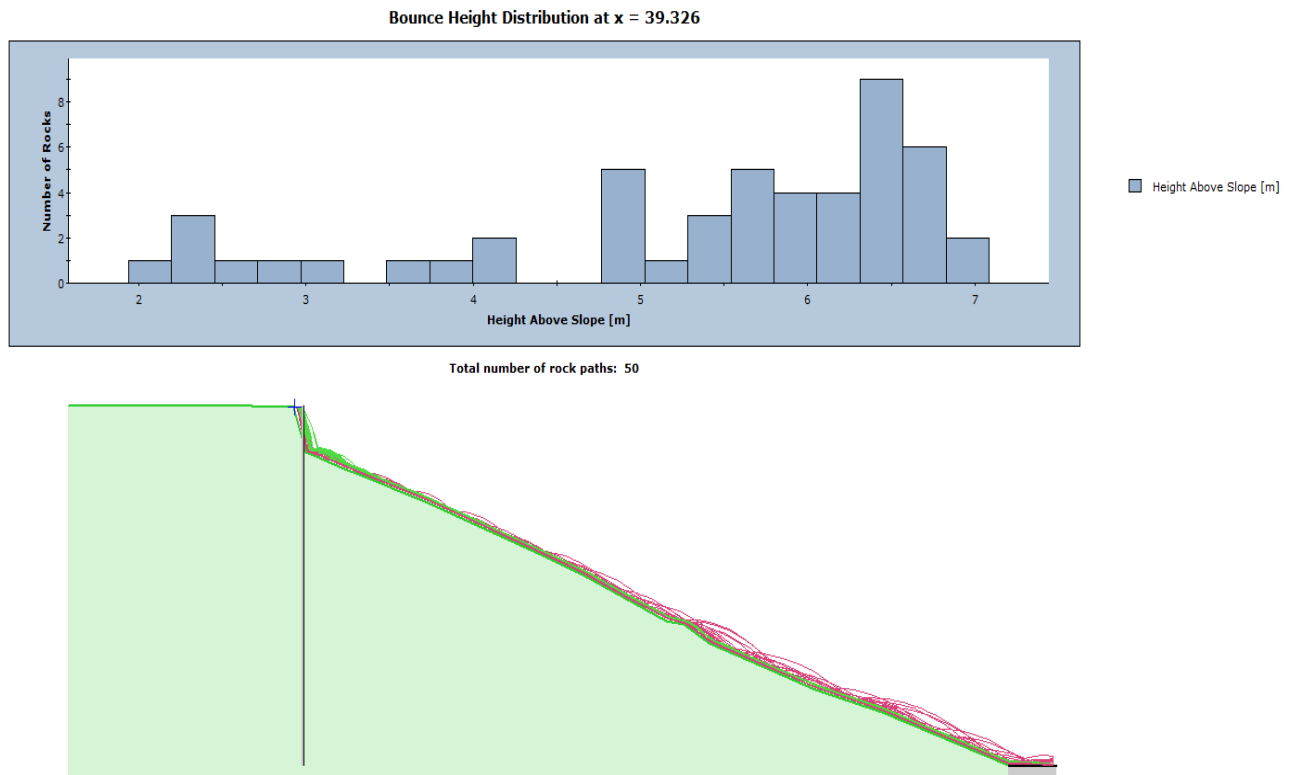
Slika 28. Prikaz karakteristika bloka



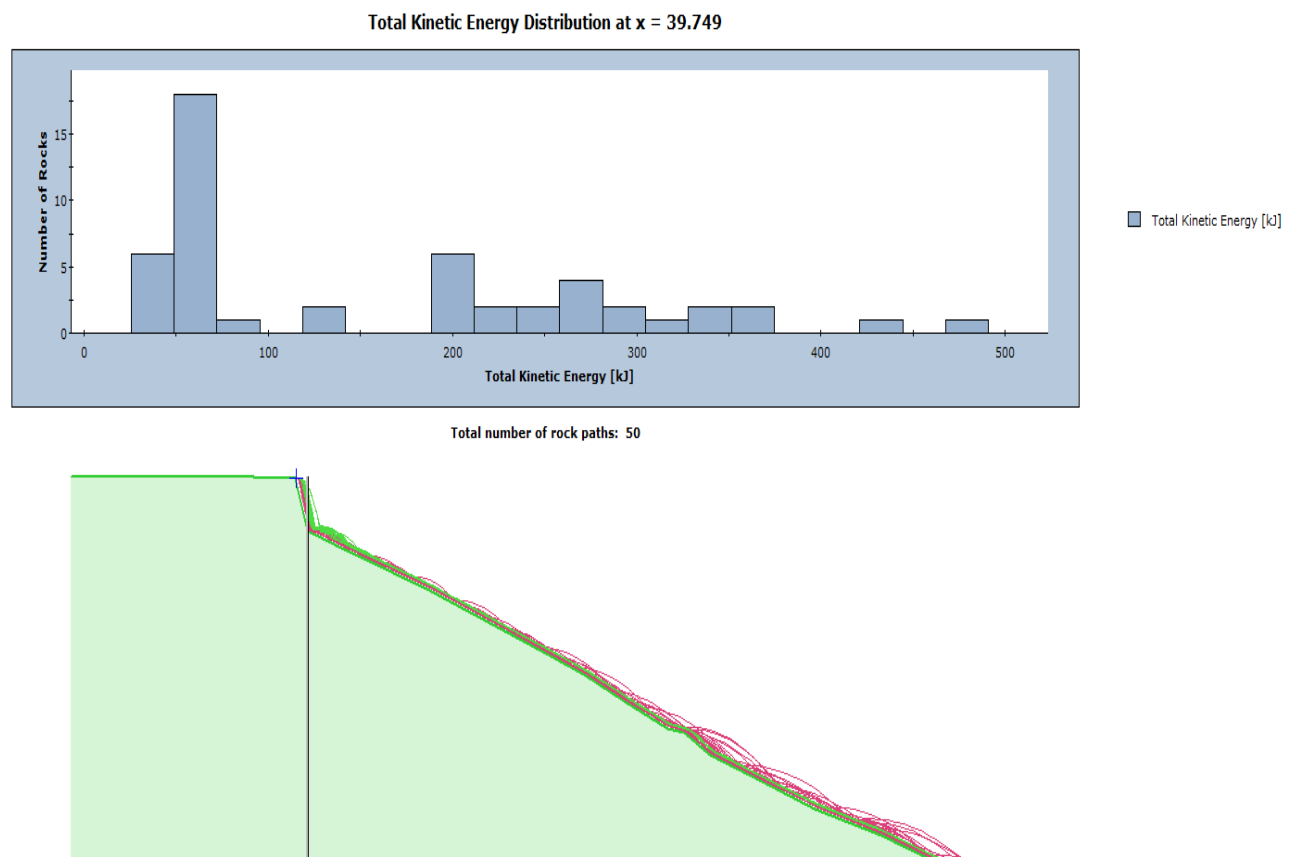
Slika 29. Prikaz karakteristika bloka



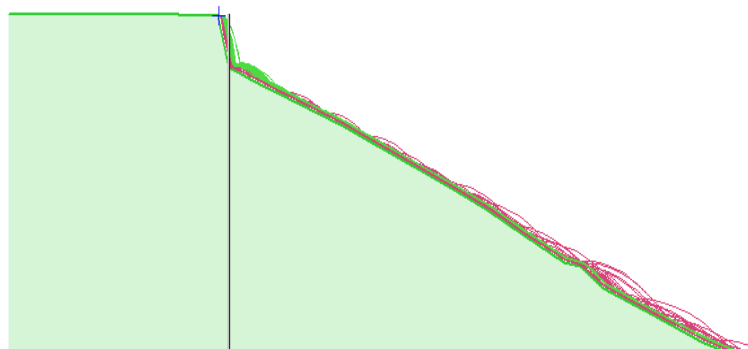
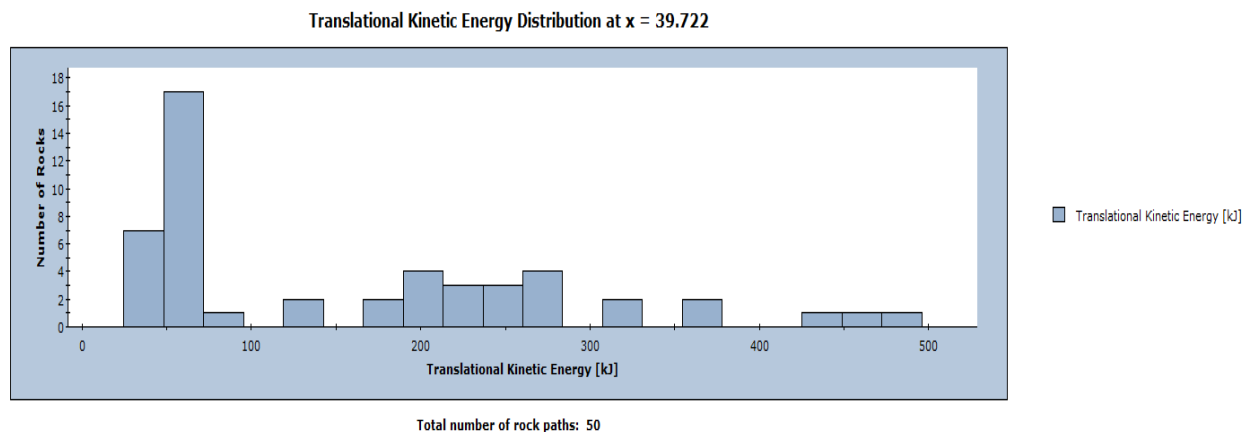
Slika 30. Trajektorija gibanja bloka



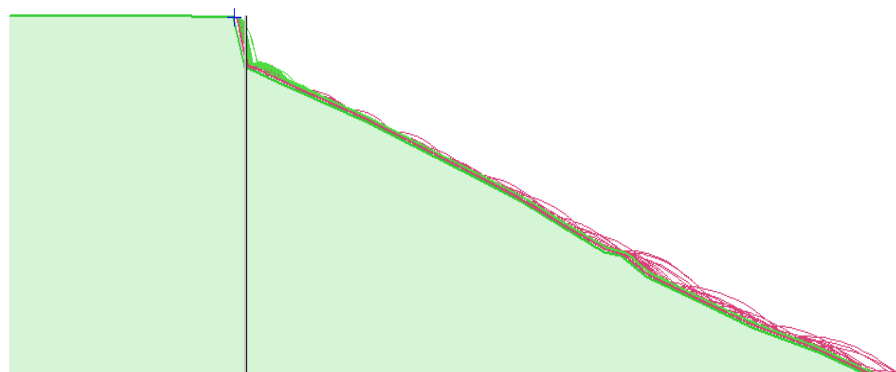
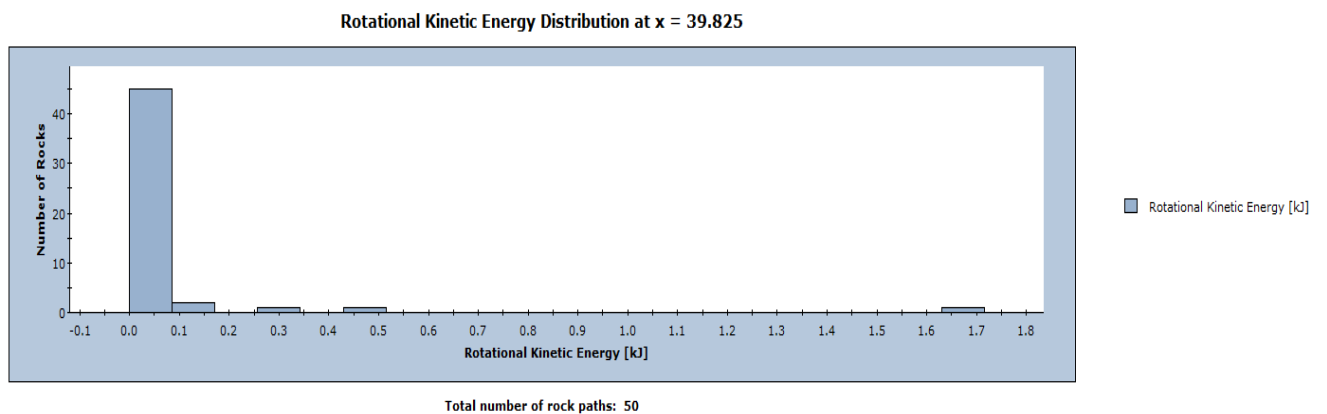
Slika 31. Prikaz odskočne visine



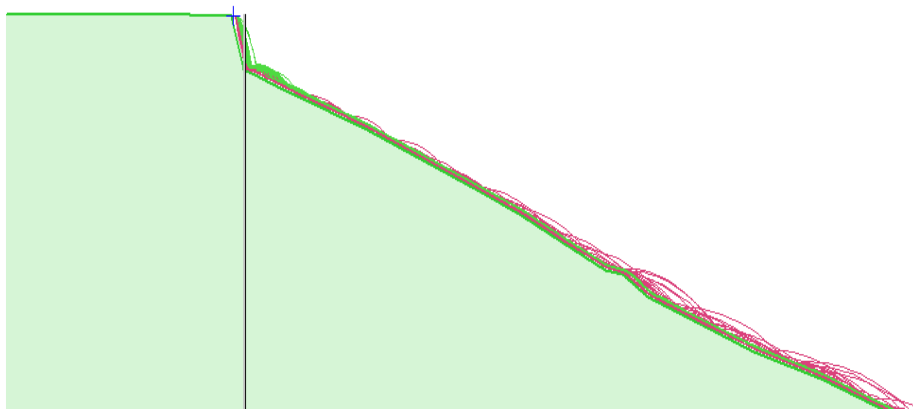
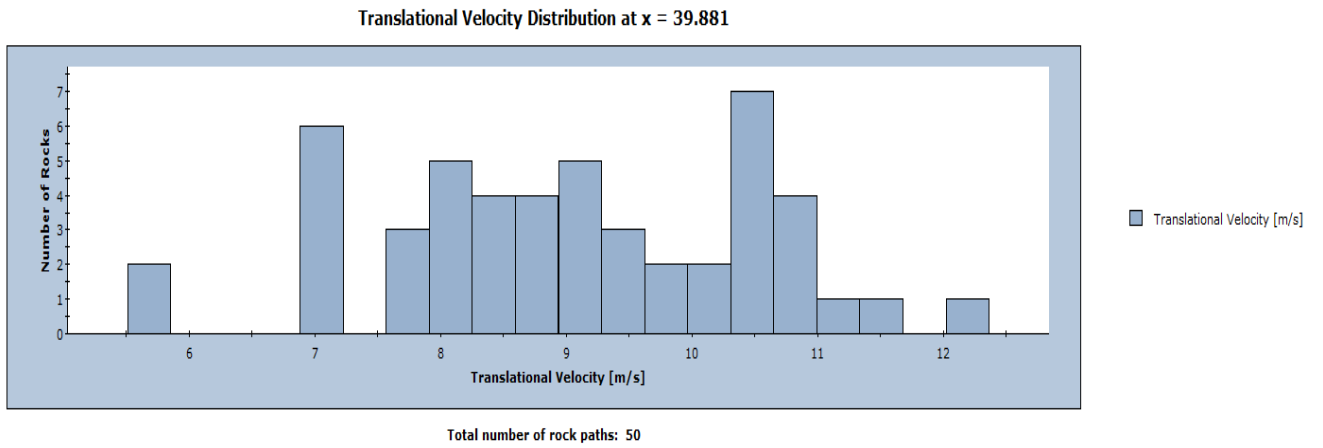
Slika 32. Prikaz ukupne kinetičke energije



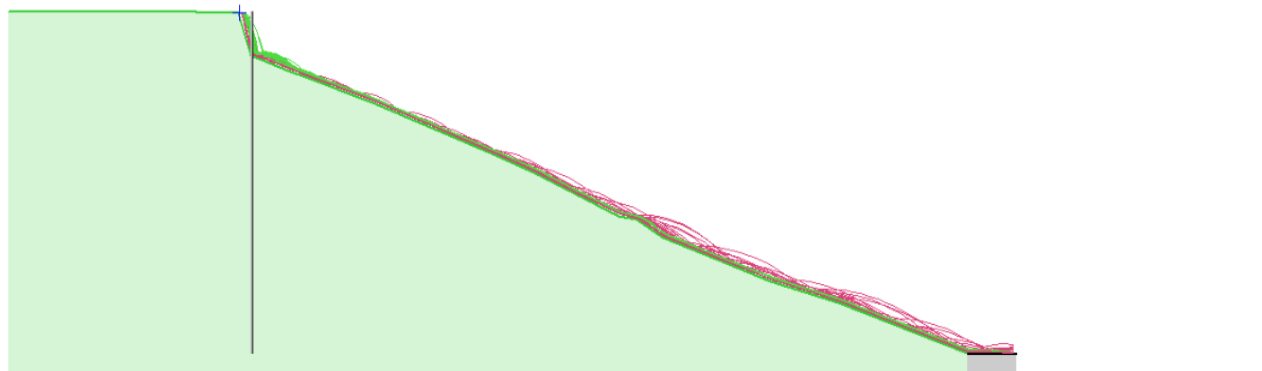
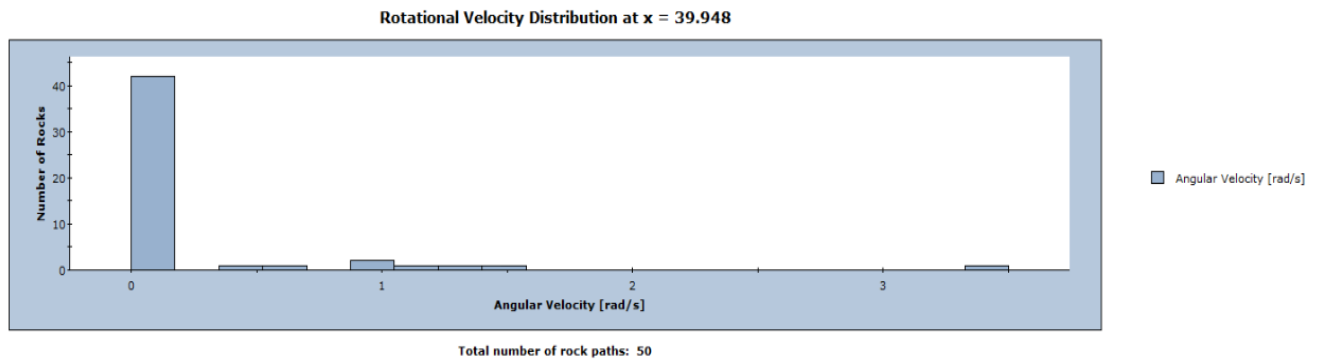
Slika 33. Prikaz translacijske kinetičke energije



Slika 34. Prikaz rotacijske kinetičke energije



Slika 35. Prikaz translacijske brzine



Slika 36. Prikaz rotacijske brzine

Prikazan je samo prvi poprečni presjek za situaciju prije samog sudara. Na temelju rezultata vidimo da je ukupna kinetička energija manja; primjerice za masu od 10 t kod RocFall-a v4.0. imamo energiju od 572 573 J dok kod v5.0. ta vrijednost ide do 500 000 J. Isto tako možemo usporediti brzinu kod verzije v4.0. brzina nam iznosi 10.7 m/s dok kod v5.0. je 12.66 m/s. Na temelju tih kratkih opservacija možemo zaključiti da oblik bloka ipak utječe na rezultate.

### 3.4. Analiza rezultata RocFall-a v5.0 za prvi pukotinski sustav

S obzirom na trenutno detektirano stanje koje se može vidjeti na priloženoj slici postoji veliki pukotinski rasjed. Izvršena je simulacija ukoliko dođe do odrona tih veliki blokova. Uzeta mjerodavna masa je 100000 kg. Također, odabrane su dvije različite lokacije s kojih dolazi do odrona.



Slika 37. Prikaz pukotine



Slika 38. Prikaz lokacije



Karakteristike kosine za prvi poprečni presjek:

$H_0 = 70$  m visina kosine

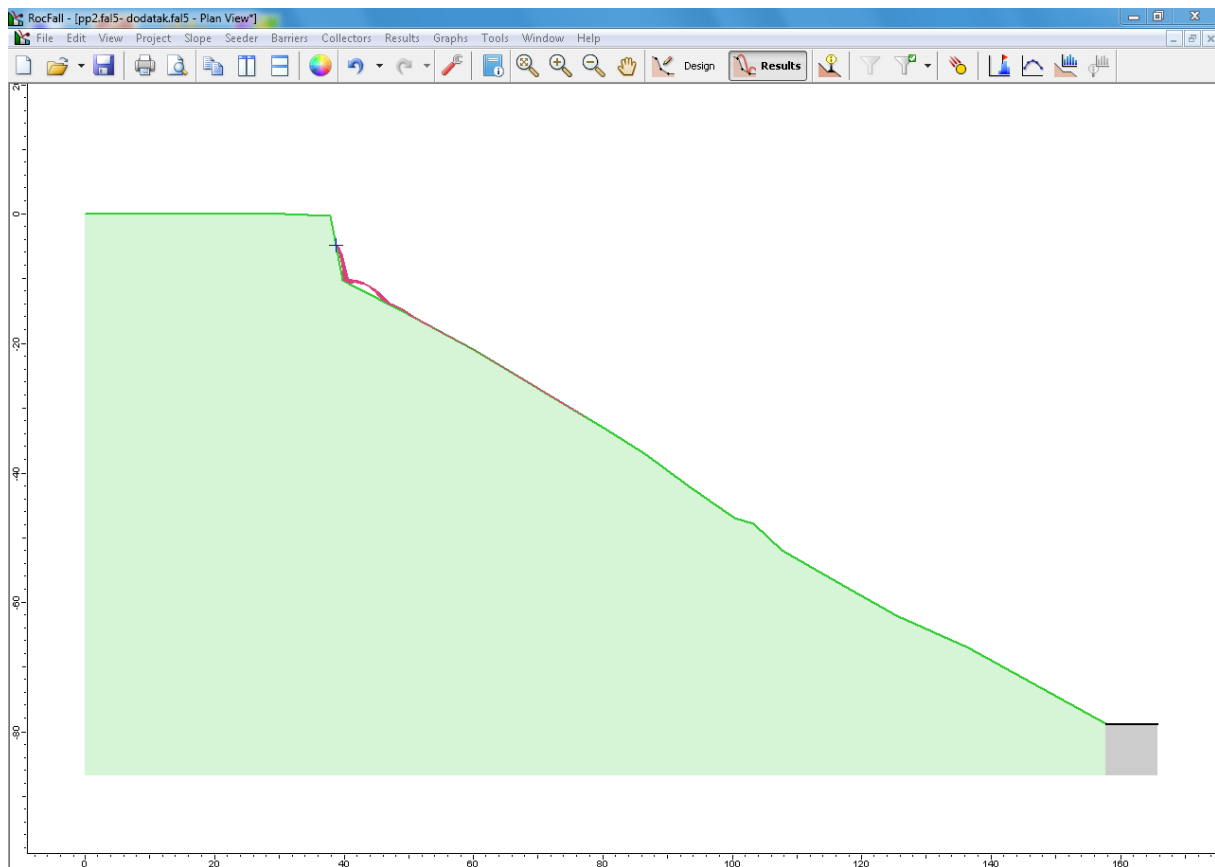
$L = 120$  m duljina kosine

$\beta = 30^\circ$  nagib kosine

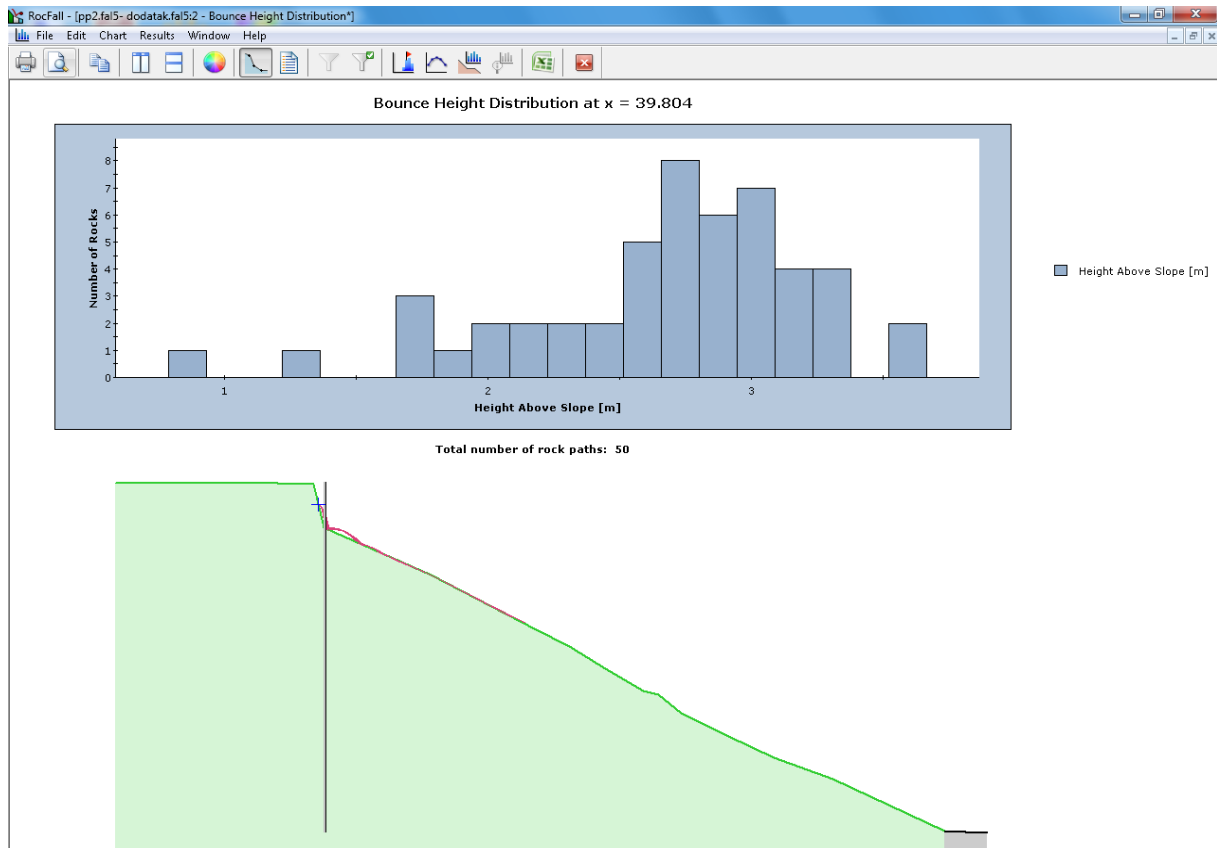
Koeficijent restitucije u smjeru normale:  $R_n = 0.4$

Koeficijent restitucije u smjeru tangente:  $R_t = 0.8$

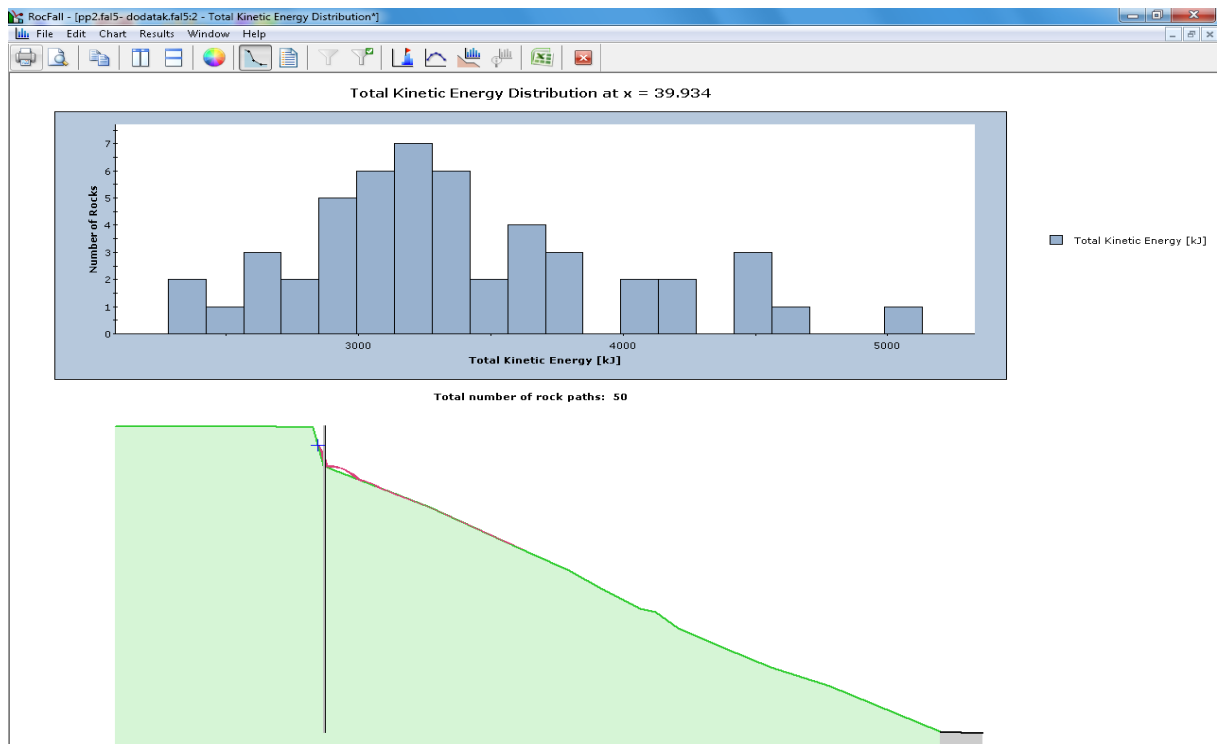
Karakteristike pukotinskog sustava su : dužina je 45 m, dubina 8 m, a pukotina široka 0.5 – 1 m, udaljenost od kraja 7 – 11 m.



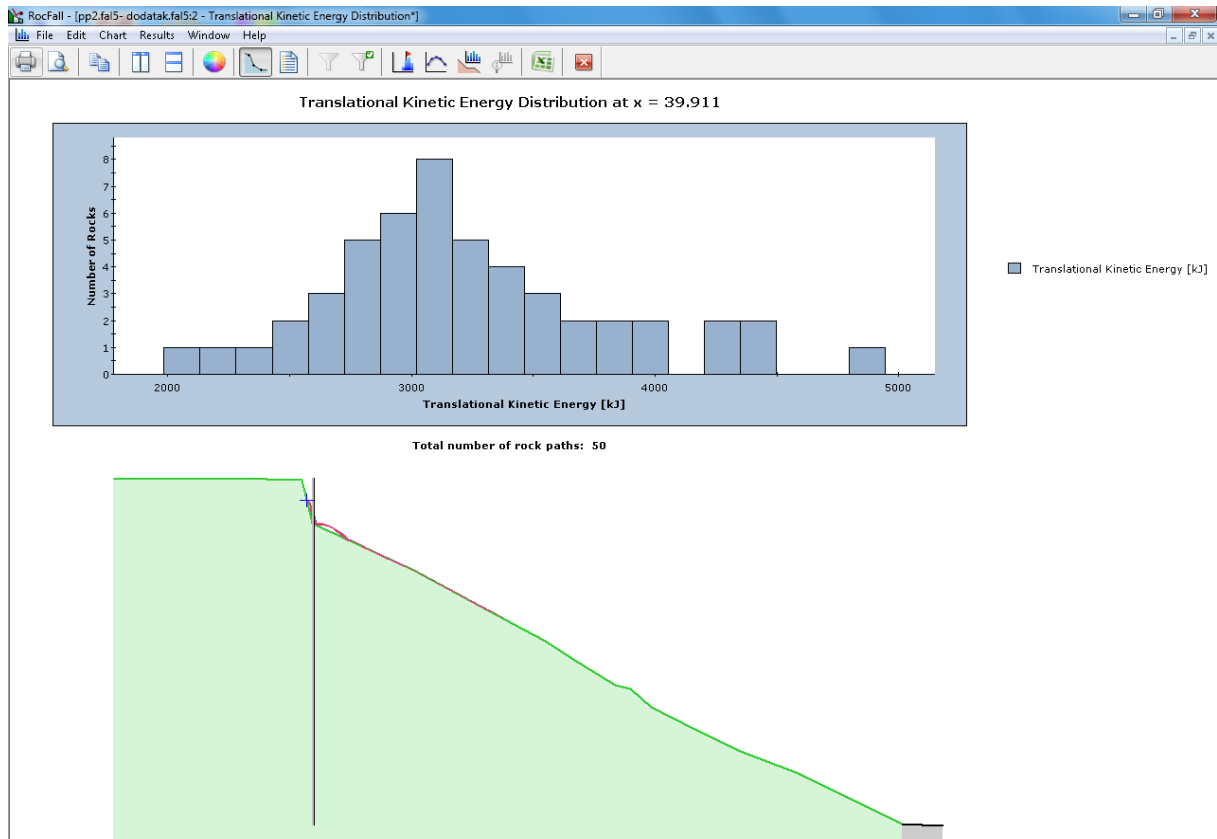
Slika 39. Trajektorija gibanja bloka



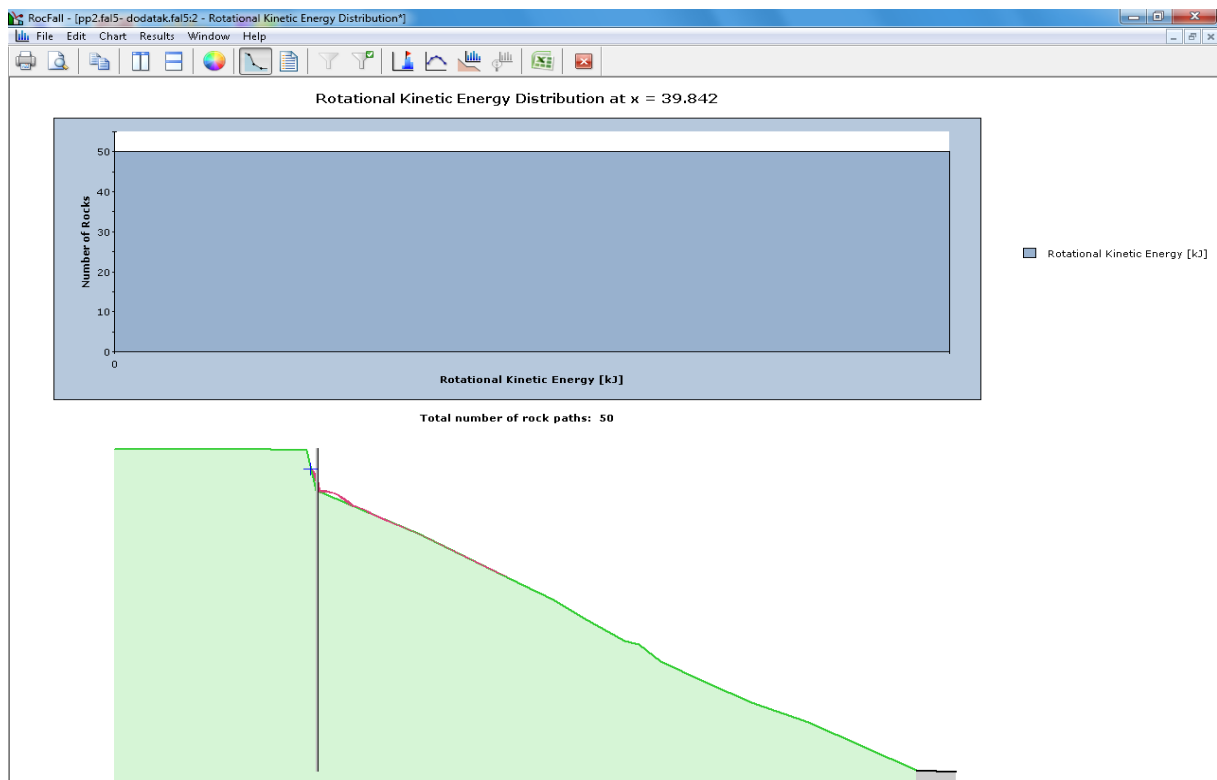
Slika 40. Prikaz odskočne visine



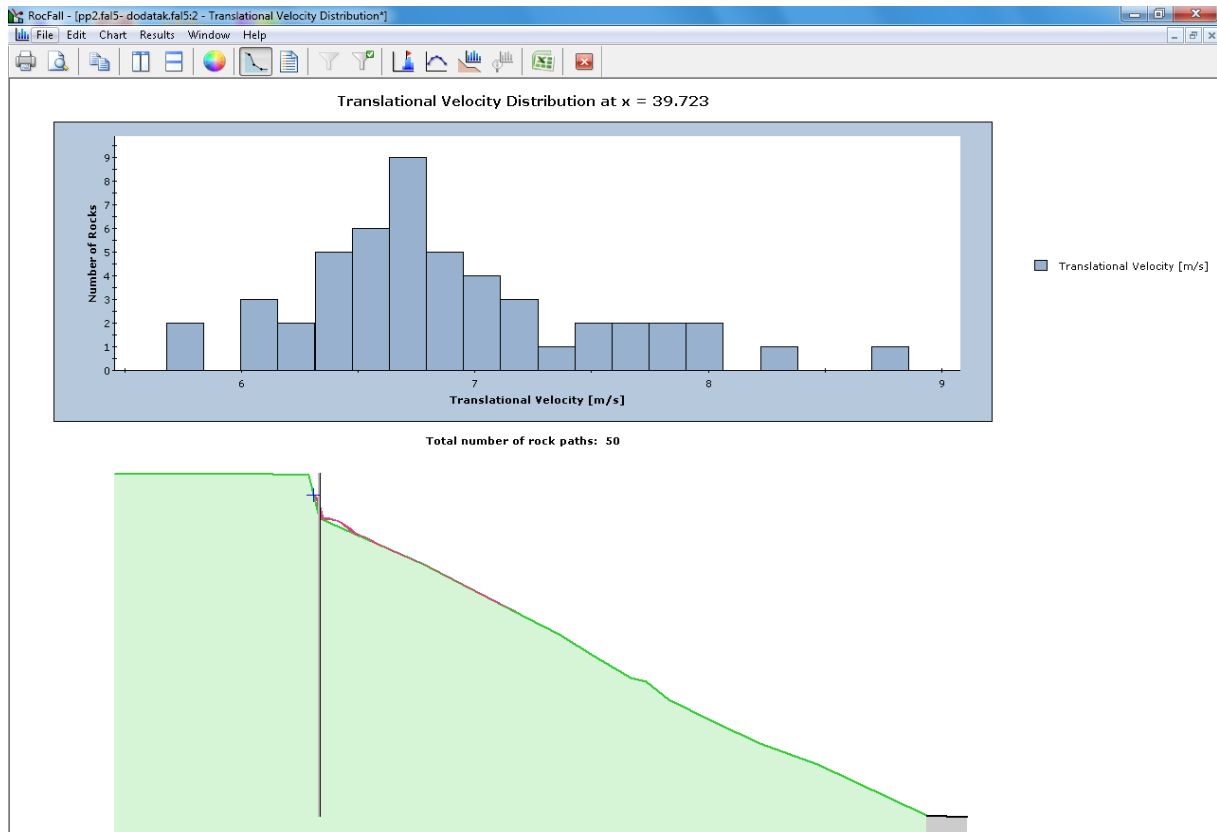
Slika 41. Prikaz ukupne kinetičke energije



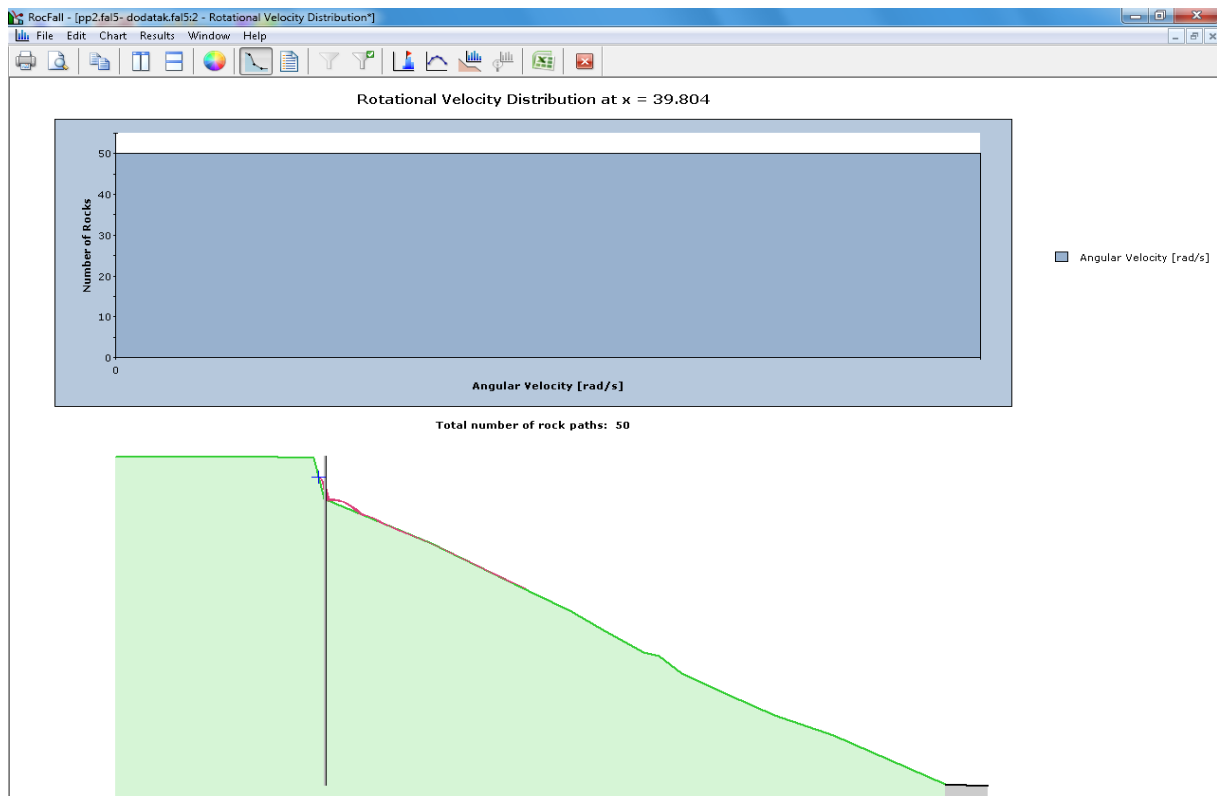
Slika 42. Prikaz translacijske kinetičke energije



Slika 43. Prikaz rotacijske kinetičke energije

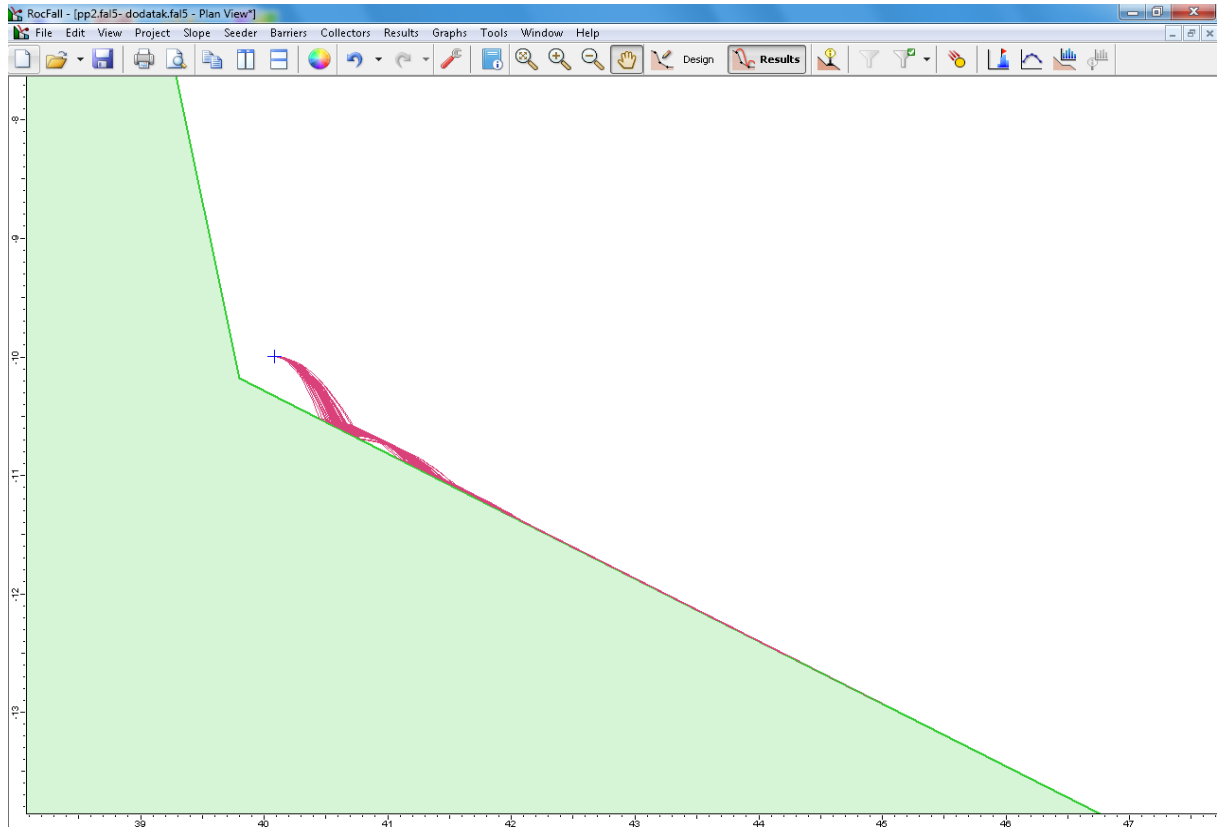


Slika 44. Prikaz translacijske brzine

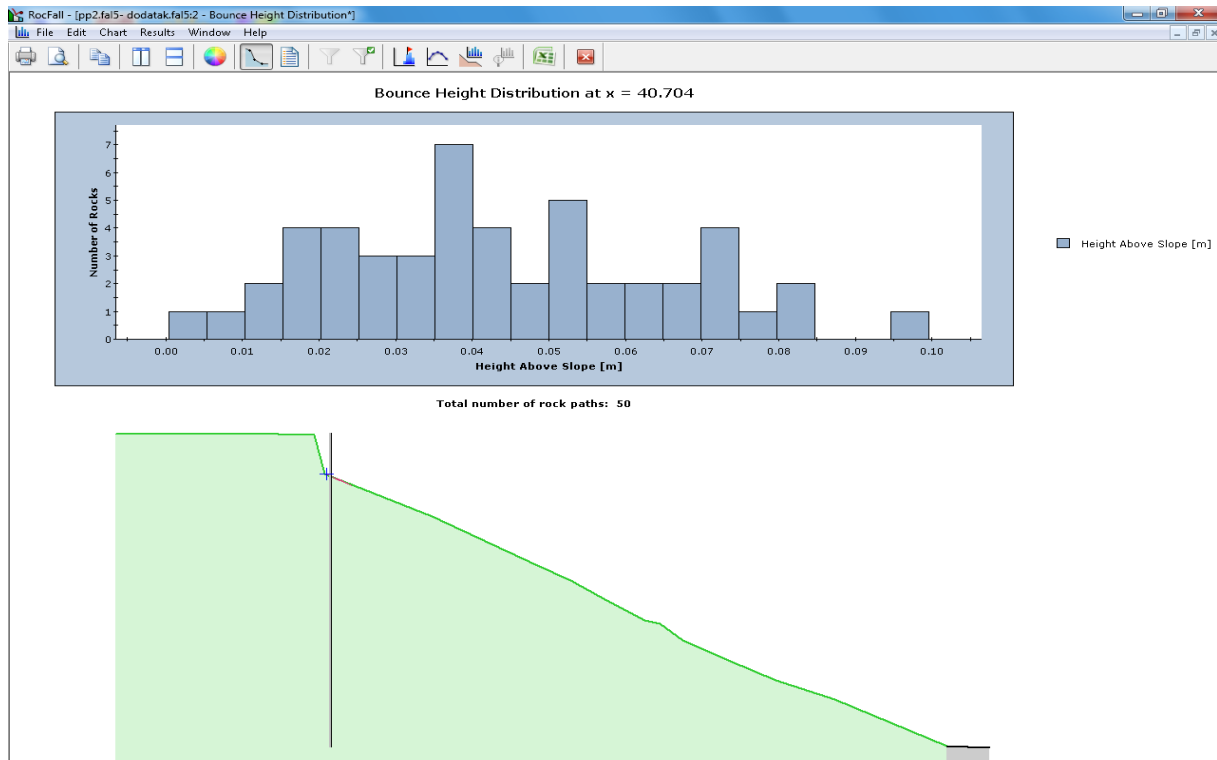


Slika 45. Prikaz rotacijske brzine

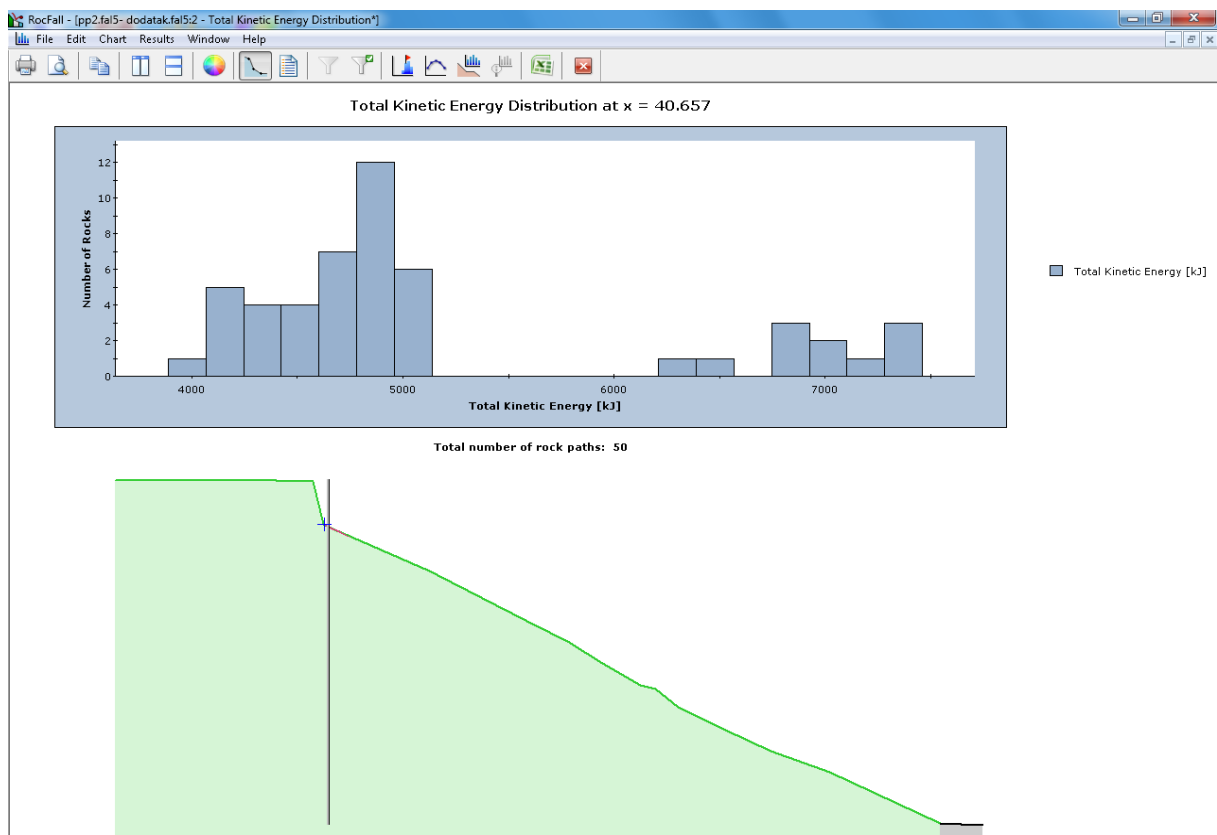
Na prethodnim dijagramima je prikazana prva odabrana lokacija s koje dolazi do odrona. U sljedećim dijagramima će biti prikazana druga lokacija, s tim da karakteristike pukotina i terena ostaju iste. Mijenja se samo početna lokacija s koje dolazi do odrona.



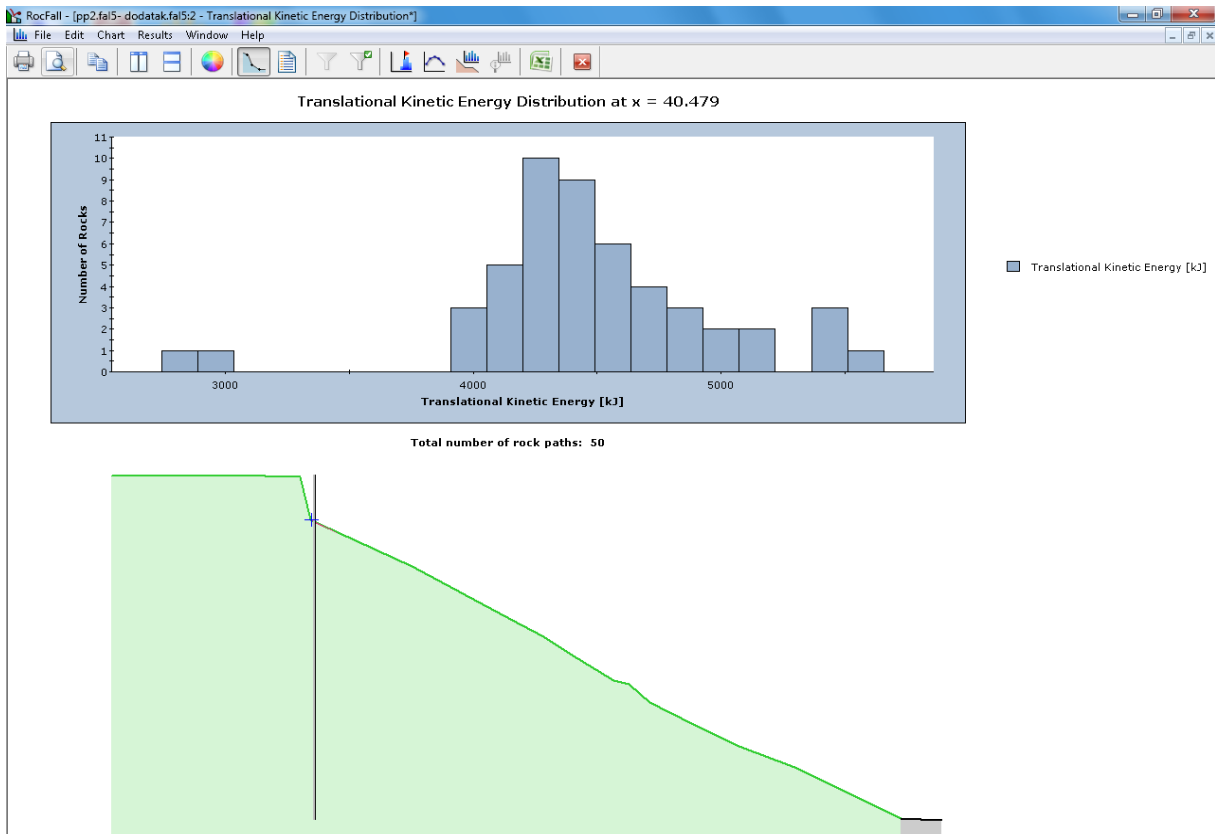
Slika 46. Trajektorija gibanja bloka



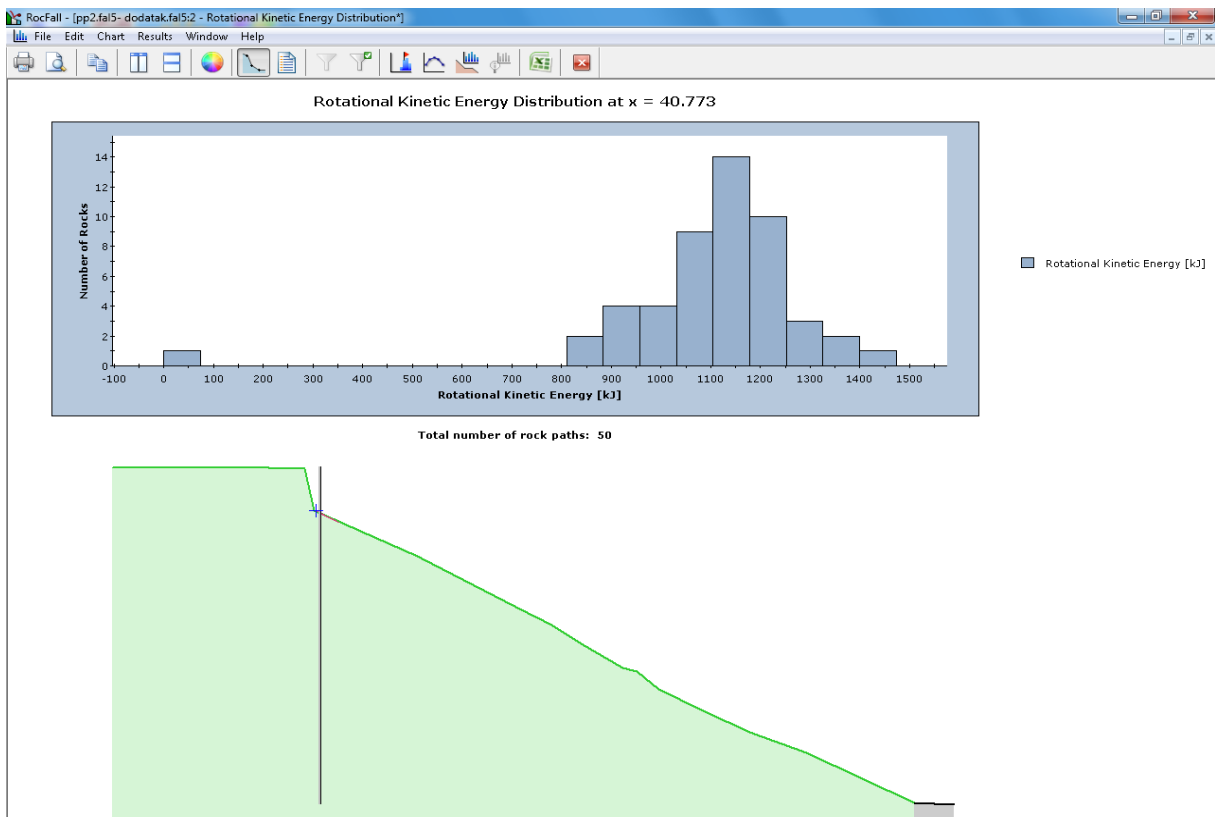
Slika 47. Prikaz odskočne visine



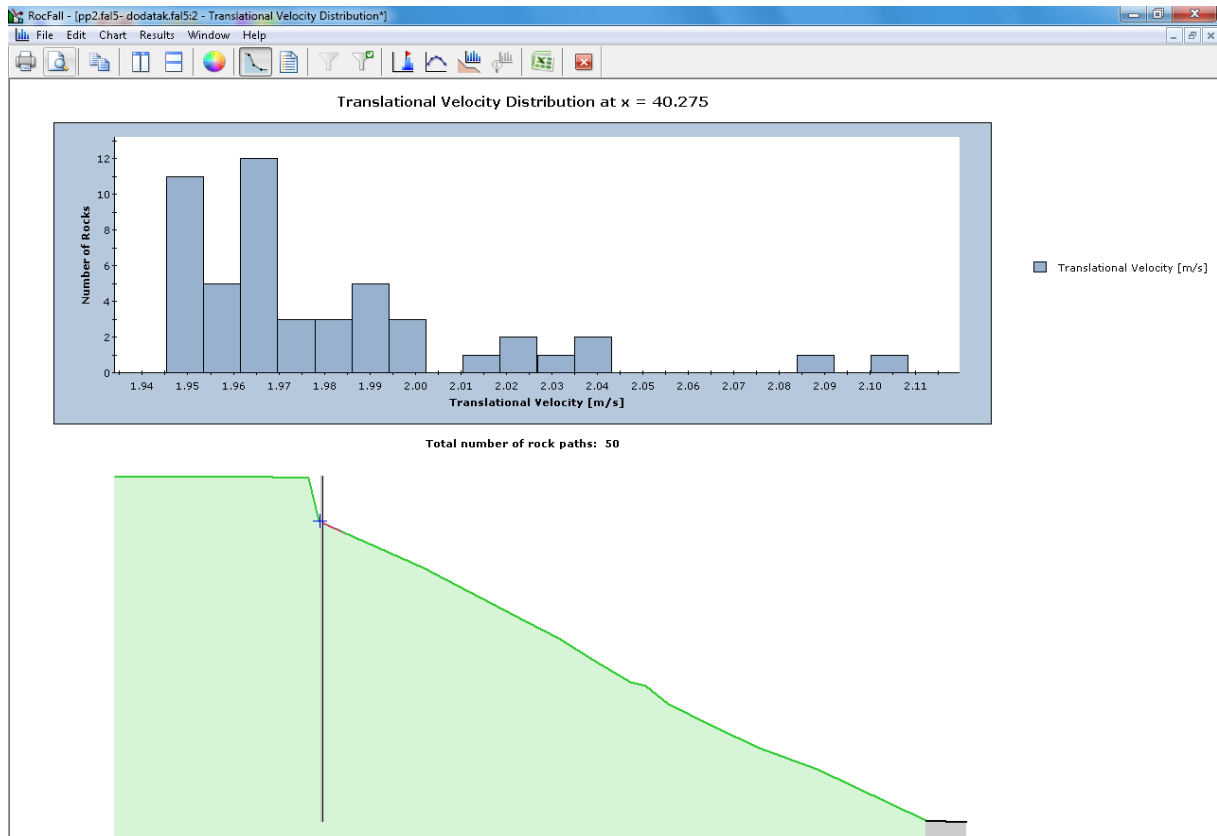
Slika 48. Prikaz ukupne kinetičke energije



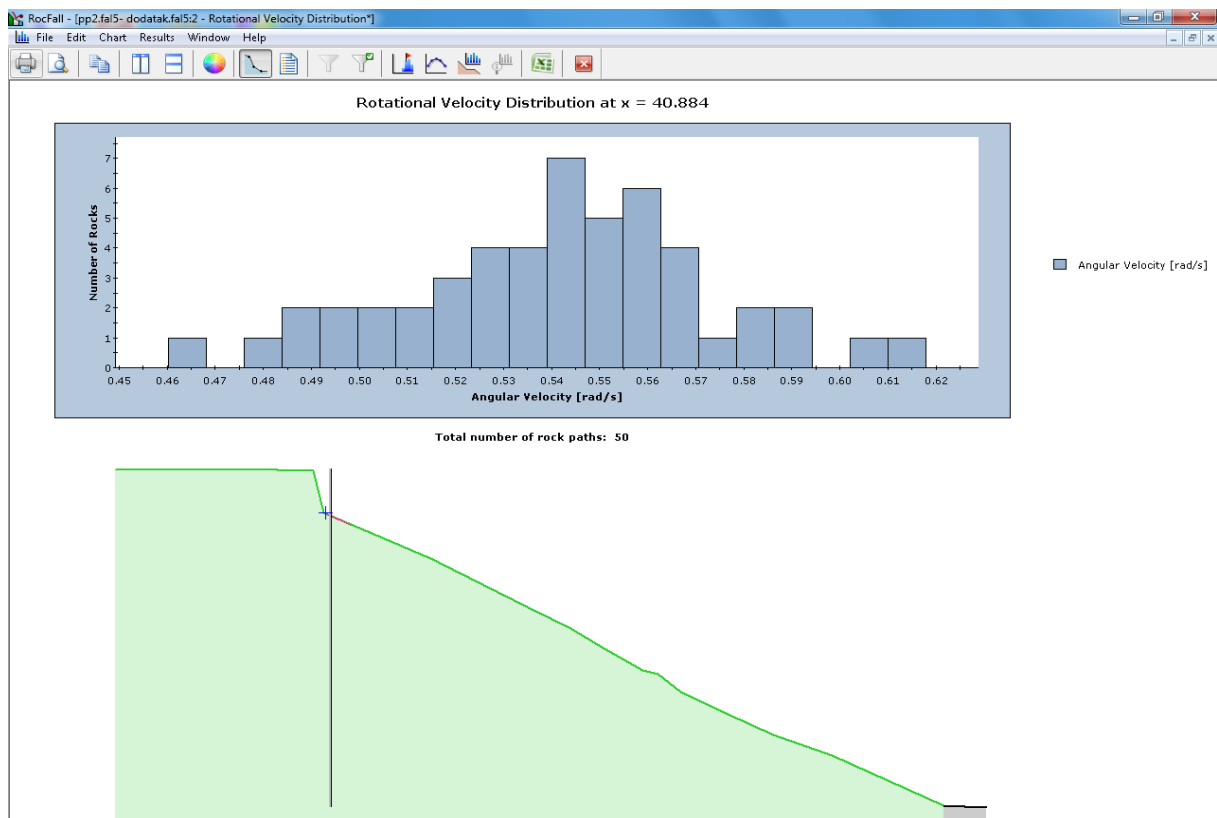
Slika 49. Prikaz translacijske kinetičke energije



Slika 50. Prikaz rotacijske kinetičke energije



Slika 51. Prikaz translacijske brzine



Slika 52. Prikaz rotacijske brzine



## 4. RJEŠENJA PROBLEMA

### 4.1. Odabir zaštite – barijere

#### 4.1.1. Elastične barijere

Danas je najučestalija zaštita od odrona upravo sa elastičnim barijerama. Barijere su zapravo ograde postavljene duž neke infrastrukture ili ispred građevina kao pasivna zaštita od odrona, da zaustave padajući blok. One apsorbiraju kinetičku energiju bloka i zaustavljaju njegovu trajektoriju. Barijere mogu zadržati veliku kinetičku energiju i kod ponovljenih odrona.

Na početku istraživanja su se uglavnom fokusirala na to da se postigne što veća sposobnost fleksibilnosti i sigurnost zaštite. Kasnije su se istraživanja proširila na unaprjeđenje dosadašnjih znanja u pogledu sistematičnog ispitivanja, numeričkih simulacija. Rezultati postignuti takvim istraživanjem su poručila određenu standardizaciju, formiranje normi i propisa.

Danas nakon desetljeća ispitivanja, razvoja i napretka, tipične fleksibilne barijere se sastoje od čeličnih mreža longitudinalno povezanih u tzv. potpornu užad. Mreže imaju otvore 5 -35 cm i otvori su lančano povezani u mrežu, pletena užad povezana u mrežu ili čelični krugovi. Takva vrsta mreža su u lukama služile kao zaštita od torpeda za vrijeme drugog svjetskog rata. Potporna užad ( promjera 12 – 22 mm ) koja su razapeta između čeličnih stupova koji su duljine 2 – 7 m i međusobnog razmaka oko 5 – 12 m. Stupovi su temeljeni sa temeljnim pločama bilo sa zategnutim ili ovješanim poduporom sa užadi čije su „glave“ postavljene uz kosinu poviše mreža. Učvršćenje sa tlom je uglavnom postignuto sa bušenim sidrima. Za jače udare sustavi uglavnom imaju dodatne elemente koji služe za apsorpciju energije koji su povezani sa užadi. Ti elementi se plastično deformiraju i imaju velike pomake (do 2 m) povećavajući fleksibilnost potporne konstrukcije. Barijere se uglavnom postavljaju preko uputa proizvođača. Primjerice, konkretno za naš slučaj odabrali smo barijere „Trumerschutzbauten“ apsorbirajuće energije do 2000 kJ.

Elastične barijere apsorbiraju energiju kroz deformaciju materijala (čeličnih mreža) i kroz zaustavne elemente. Najčešći tip mreža su tkane žičane užadi ili mreže sa sigurnosnim prstenovima. Kao što je već gore opisano.

Testiranja su pokazala da mreže sa prstenovima omogućuju najveću deformaciju i mogućnost apsorpcije energije. Mreže su uglavnom poduprte sa serijama čeličnih nosivih stupova koji su sidreni sa injektirajućim sidrima. Temelj je uglavnom betonska kapa osigurana sidrima ili velikim betonskim temeljom. Zaustavni elementi su povezani sa čeličnom užadi sa gornje strane koji se aktiviraju pojavom trenja kod jakih udara te apsorbiraju energiju i pružaju određenu zaštitu ogradi. Najveće mogućnosti apsorpcije su do 5000 kJ.

Postavljanje mrežnih zaštita zahtjeva određenu opremu za postavljanje. Stupovi i kablovi su usidreni u tlo sa injektirajućim sidrima. Čelični stupovi H- profila se uglavnom koriste kao stupovi koji služe kao podupora ogradi. Velika količina pletenih čeličnih kablova se koristi kako bi se napravili zaustavni sistemi, da bi se zakačila mreža za ogradu te kako bi se spojile serije mreža jedna za drugu.

Generalno govoreći, nisu možda toliko prihvatljive sa estetske strane kao neke druge mjere zaštite, mada uz dobar odabir lokacije postavljanja mogu se uklopiti u okruženje. Barijere moraju biti postavljene na područja koja su prohodna da bi se mogao ukloniti nakupljeni materijal.

#### **4.1.2. Prednosti i nedostaci**

Postoje različite pozitivne strane korištenja fleksibilnih mreža za zaštitu od odrona. Cijenom su prihvatljivije od ostalih mjera zaštite. Brže se postavljaju, naravno uz potrebnu opremu. One su djelotvorne, učinkovite i pouzdane. Utjecaj na okoliš za vrijeme postavljanja je gotovo pa neznan. S obzirom da imaju široki spektar mogućnosti apsorpcije energije mogu se koristiti za različite namjene.

Također, postoje i neki limiti ovog načina zaštite. Moramo osigurati zaštitu od korozije svih dijelova zaštitnog sustava. Ukoliko je na mrežu pao i kamen srednje veličine od maksimalnog očekivanog dogoditi će se deformacija koja će rezultirati smanjenom sposobnošću prihvaćanja budućih odrona za koje je u početku dimenzionirana. Potrebne su česta pražnjenja nakupljenog materijala iza barijera. Fleksibilne barijere ne smijemo koristiti ukoliko ne

zadovoljavaju proračune te ukoliko blok preskoči barijeri, jer su objekti ispod barijera direktno ugroženi, a barijere nemaju svoju svrhu.

#### 4.1.3. Standardizacija

Kako bi se moglo vršiti unaprjeđenje sustava zaštite u ovom slučaju, barijera, potrebno je dobro poznavati ponašanje fleksibilnih barijera te ih detaljno ispitati.

Prve smjernice po kojima se ravnala svaka zemlja koja je koristila fleksibilne barijere kao zaštitu, bila je inicirana u Švicarskoj 2000. godine. Smjernice definiraju proceduru i način testiranja prema kojima se kasnije valorizira efikasnost barijere u smislu maksimalne energije retencije, sile u užadi, zastavni put, preostala visina barijere, kako se ponašanje prilikom udara malog i srednjeg bloka te održavanje barijera.

2008. godine Europska smjernica ETAG 027 je objavljena. ETAG 027 definira proceduru testiranja slično kao švicarska smjernica.

Uvijek je potrebo imati na umu da će uvijek postojati slučajevi opterećenja koji nisu obuhvaćeni smjericama kao što su ekscentrične sile, otkazivanje stupova ili užadi, brzi ili spori odroni sa istom udarnom energijom, itd.

#### 4.1.4. Dimenzioniranje barijera

Prvi korak u dimenzioniranju zaštitnih barijera za bilo koji slučaj je poznavanje ponašanja barijera i te poznavanje mogućih opasnosti od odrona. Barijere bih se uvijek trebale postaviti na najizgledniju putanju odrona. Do informacija o lokaciji na kojoj postoji mogućnost opasnosti od odrona se mogu prikupiti na temelju razgovora sa lokalnim stanovništvom te promatranje kosine ili skeniranje područja. Kada smo odredili putanju gibanja blokova barijere bismo trebali postaviti na mjesto gdje je visina odraza i prosječna kinetička energija najmanja ali za najveću energiju udara kako bismo maksimizirali prihvaćanje blokova.

Kao što je već navedeno i objašnjeno, kompjuterski modeli su se pokazali kao vrlo koristan alat za evaluaciju ponašanja odrona. Preko modela možemo odrediti lokaciju postavljanja

zaštitnih barijera. Nijedan sustav zaštite ne može nam garantirati sto postotnu zaštitu, ali sustavi su dimenzionirani da zaustave aproksimativno dani postotak. Današnje barijere su dimenzionirane da prihvate oko 85% mogućeg odrona, s tim da je svaka kosina drugačija i uvijek treba težiti balansu između troška i sigurnosti.

Postavljanje barijere na pravo mjesto je izrazito bitno jer na taj način reguliramo visinu i kapacitet barijere te za uzvrat imamo manje troškove i bolje uklapanje u okoliš. Mogu se postaviti visoko na kosinu s tim da treba imati na umu da put do barijera mora biti prohodan jer se one moraju prazniti.

Barijere koje se moraju postavljati na teško dostupnim mjestima zahtijevaju posebnu ugradnju. Temeljenje se može vršiti sa sidrima ili pilotima.

## 4.2. RocFall v4.0 – rješenje

Za prvi poprečni presjek koji ima nagib terena  $30^{\circ}$ , visinu 70 m, a duljinu 120 m, na temelju rezultata RocFall-a odabrali smo barijere „Trumerschutzbauten“ mogućnosti apsorpcije 2000 kJ. Visina barijere 2 m. Duljina postavljanja 200 m. Lokacija barijere 43 m od kraja. Detalji odabrane barijere u daljnjem tekstu. Lokacije barijera i poprečnih presjeka mogu se vidjeti na AutoCad prikazu.





Slika 53. Prikaz lokacije

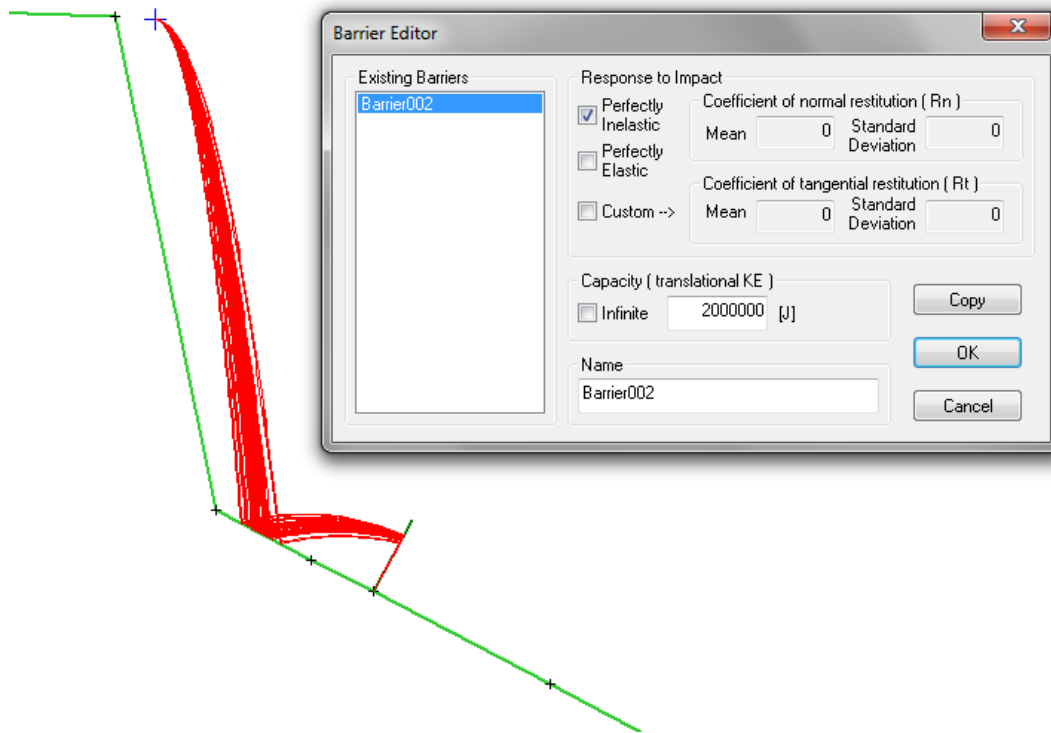


Slika 54. Prikaz lokacije

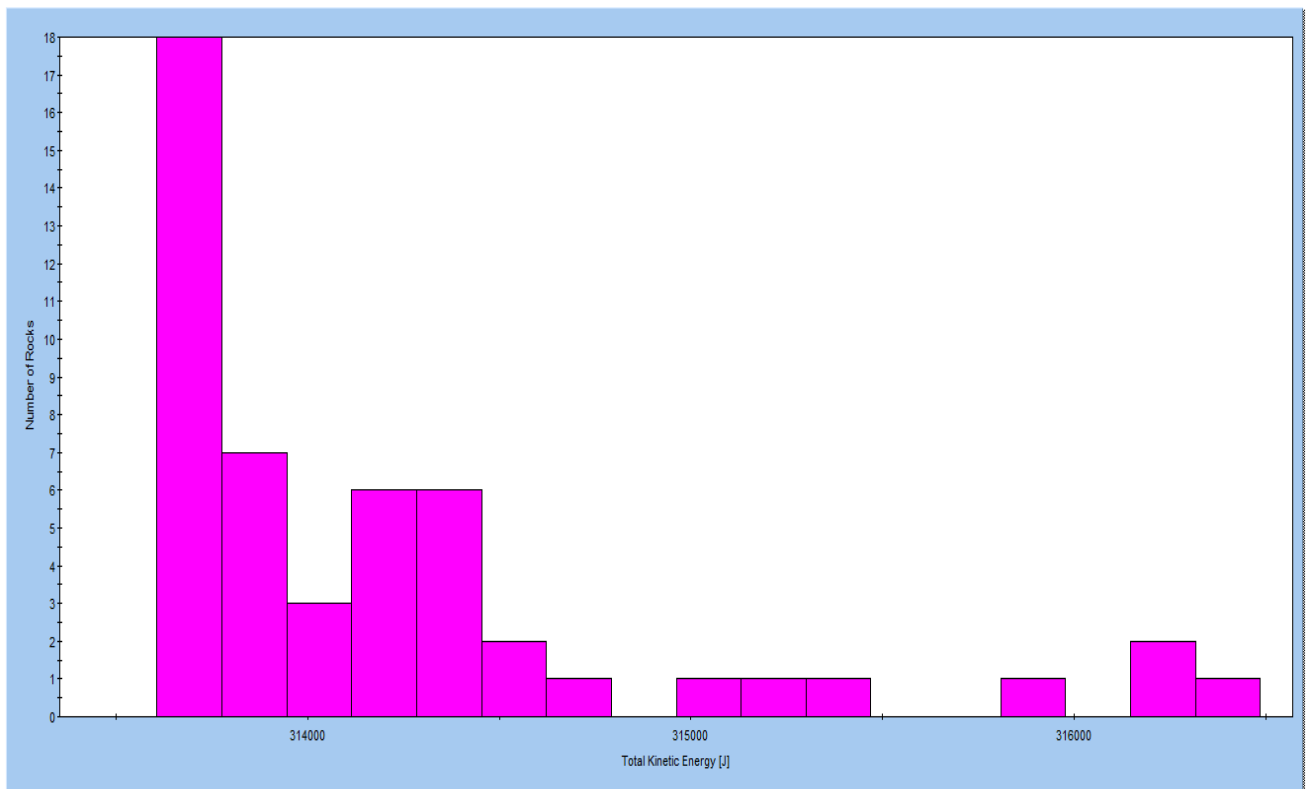


Slika 55. Prikaz barijere u RocFall-u i trajektorija gibanja

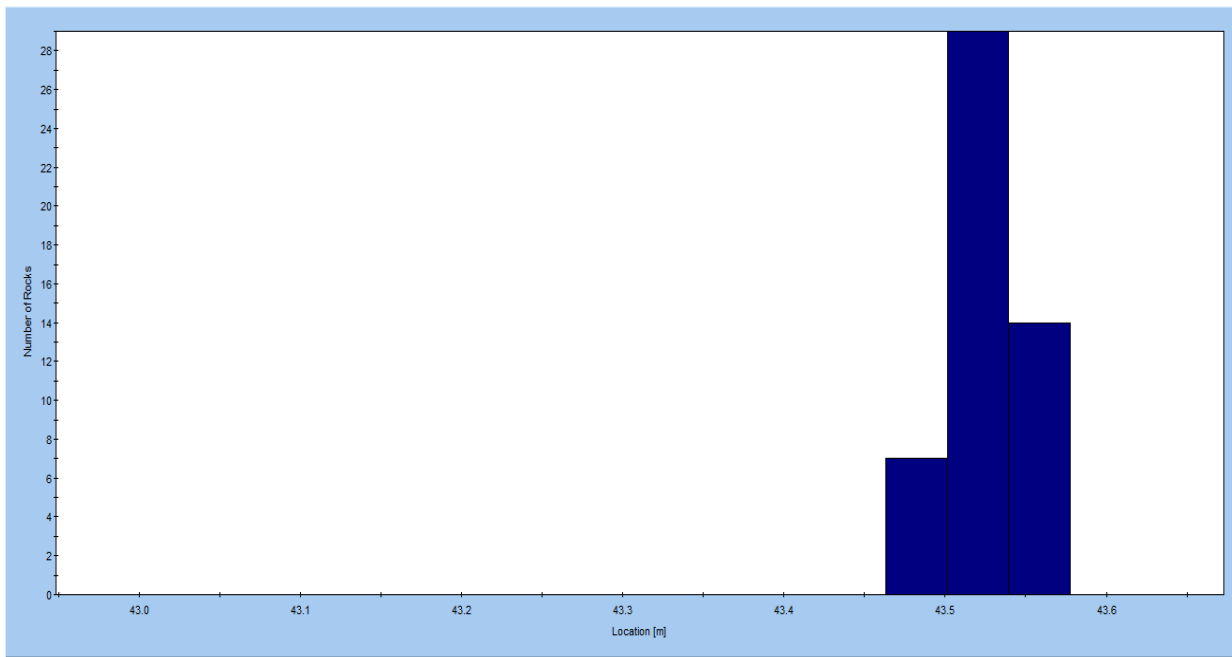
Iz prethodne slike možemo vidjeti početne uvjete. Naime, odabrana početna brzina je 1.5 m/s sa standardnom devijacijom od 15 %. S obzirom da samo na temelju uspoređivanja rezultata ukupne kinetičke energije iz RocFall-a te izračunate energije pri kojoj dolazi do loma vidjeli da za masu u intervalu od 1 – 10 t dolazi do loma, za kritični slučaj smo odabrali 10 t. Iz priložene slike vidimo da odabrana barijera prihvaća i blokove od 10 t.



Slika 56. Prikaz odabira kapaciteta barijere



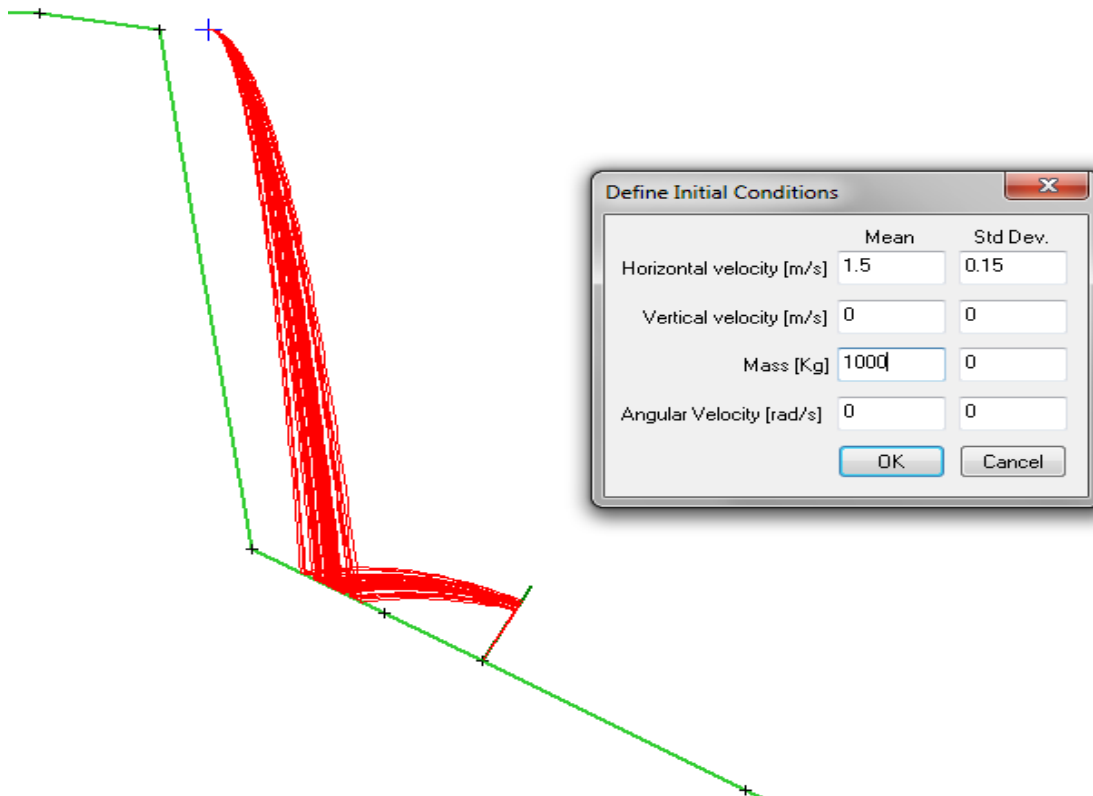
Dijagram 36. Prikaz ukupne kinetičke energije na barijeru



Dijagram 37. Prikaz odabira lokacije barijere

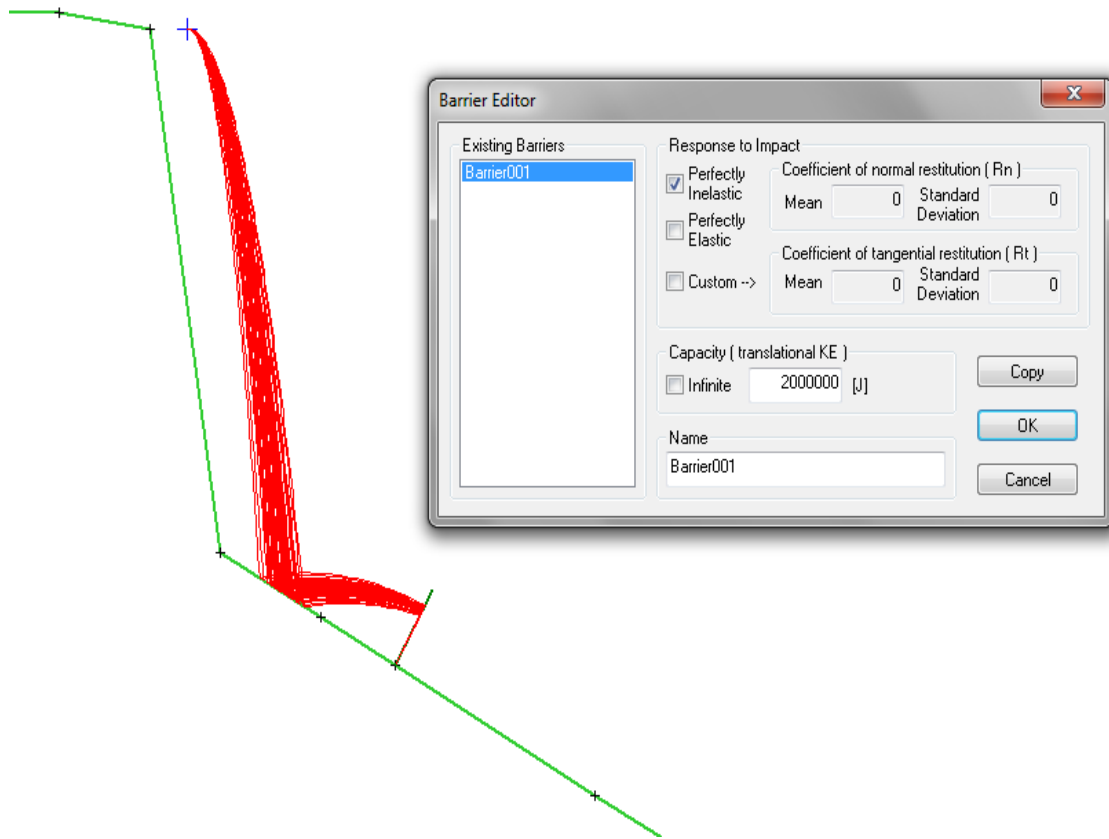
Za drugi poprečni presjek nagiba  $35^\circ$ , visine 74 m, duljine 110 m odabrali smo barijere istog proizvođača, 2000 kJ apsorpcijske energije na lokaciji 39 m.



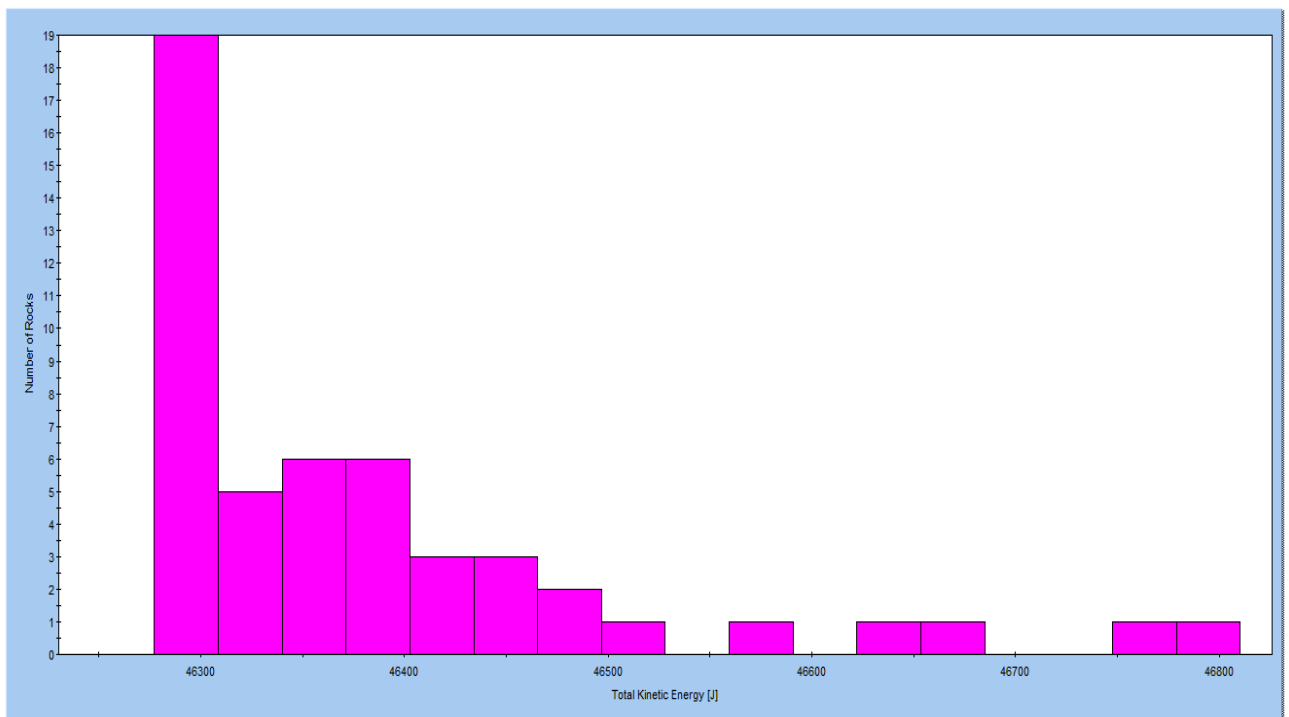


Slika 57. Prikaz barijere u RocFall-u i trajektorija gibanja

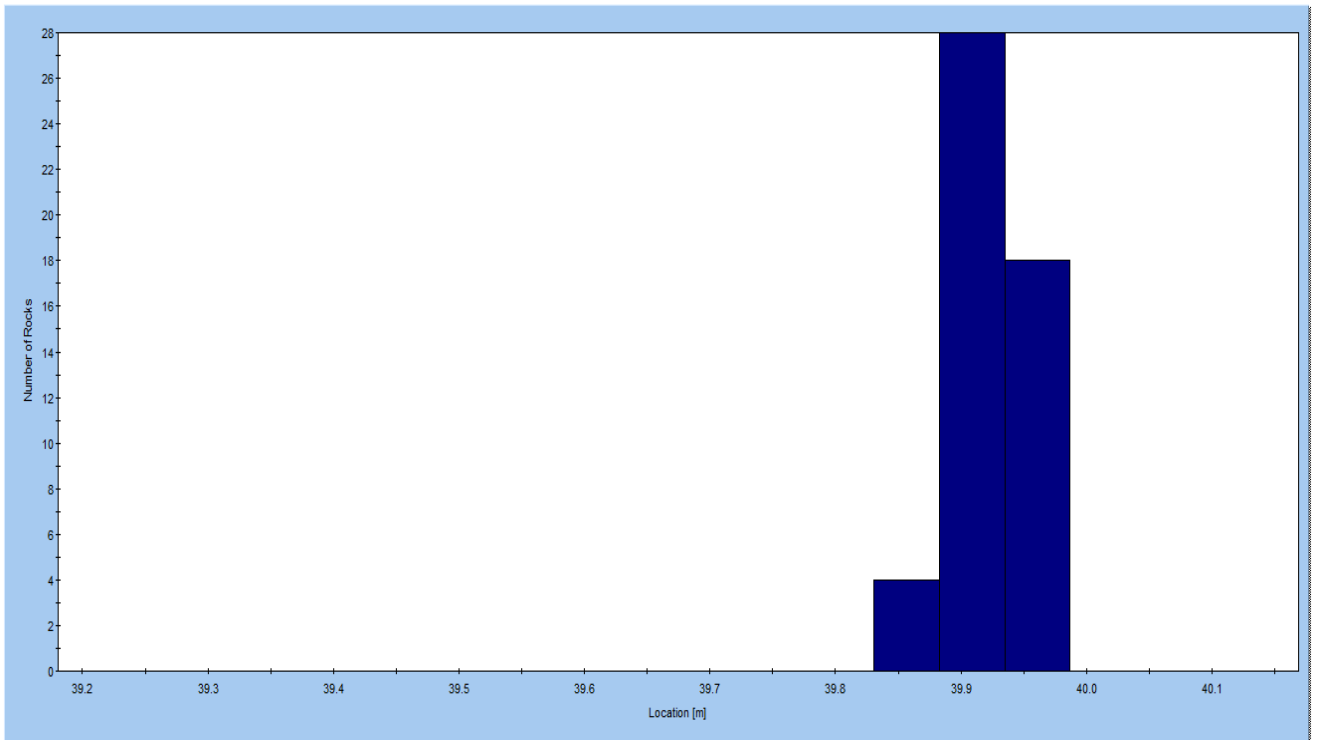
Iz prethodne slike možemo vidjeti početne uvjete. Početna brzina je 1.5 m/s sa standardnom devijacijom od 15 %. S obzirom da smo na temelju uspoređivanja rezultata ukupne kinetičke energije iz RocFall-a te izračunate energije pri kojoj dolazi do loma vidjeli da za masu od 1 t dolazi do loma, za kritični slučaj smo odabrali 1 t. Iz priložene slike vidimo da odabrana barijera prihvaća i blokove od 1 t.



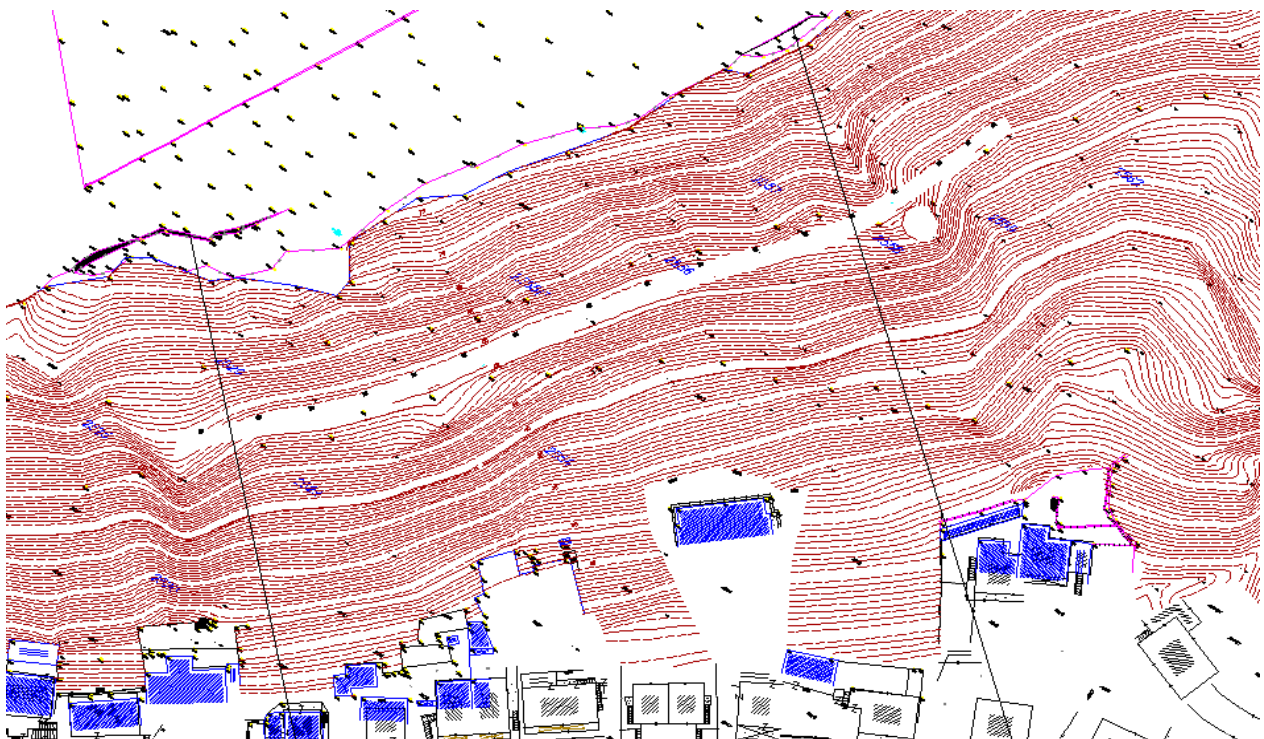
Slika 58. Prikaz odabira kapaciteta barijere



Dijagram 38. Prikaz ukupne kinetičke energije na barijeru



Dijagram 39. Prikaz odabira lokacije barijere



Slika 59. Prikaz karakterističnih poprečnih presjeka



## **Tested Rockfall Protection Systems** **Energy level: 1000 – 2000 kJ**

### ***Text for invitation of tender***

#### ***Rockfall protection systems TS-1000, TS-1500, TS-2000***

*Rockfall protection systems with retaining ropes*

#### **General information**

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| Energy level [kJ]:                  | e.g. 1000 |
| Nominal height [m]:                 | e.g. 4.0  |
| Total length [m]:                   | e.g. 250  |
| Number of rows:                     | e.g. 5    |
| Average distance between posts [m]: | e.g. 10   |

The fitness for use of the offered rockfall protection system must be tested successfully in a 1:1 field test for a minimum energy impact (energy level indicated above), supervised by an independent authorized technical institute. As part of the certification, no breakage may occur in key structures (e.g. break in wire/rope of primary net, in the bearing rope, seam ropes or other system specific ropes; no fracture of posts, etc.) Test report, as well as test summary and the list of monitored anchor forces must be added to the tender.

#### **Design of the Main Structure and Individual Components**

The design of main structures and of single components must be such as described below (or equal / better). Individual components not cited herein must correspond to the appropriate technical standards (e.g. DIN).

##### Interception structure

- Primary net: Type: **Omega-Net**  
Corrosion protection: **Zinc coated class A acc. EN 10244-2**  
Maximum mesh size: **185 mm**  
Connection to bearing ropes: **threaded**
- Additional layer: Type: **Rectangular netting**  
(optionally) Corrosion protection: **Zinc coated class A acc. EN 10244-2**  
Maximum mesh size: **50 mm**  
Minimum wire diameter: **2.5 mm**

##### Support structure

- Post: Corrosion protection: **hot dip galvanized according to EN ISO 1461**  
Design: **Pendulum support (hinge base plate)**

Slika 60. Prikaz karakteristika odabranih barijera



- Base plate: Corrosion protection: hot dip galvanized according to EN ISO 1461  
Connection to underground: anchored installation

#### Connection components

- Bearing ropes: Type: according to EN 12385-4  
Corrosion protection: hot dip galvanized
- Middle ropes: Type: according to EN 12385-4  
Corrosion protection: hot dip galvanized
- Retaining ropes: Type: according to EN 12385-4  
Corrosion protection: hot dip galvanized

#### Energy absorbing elements (brake elements)

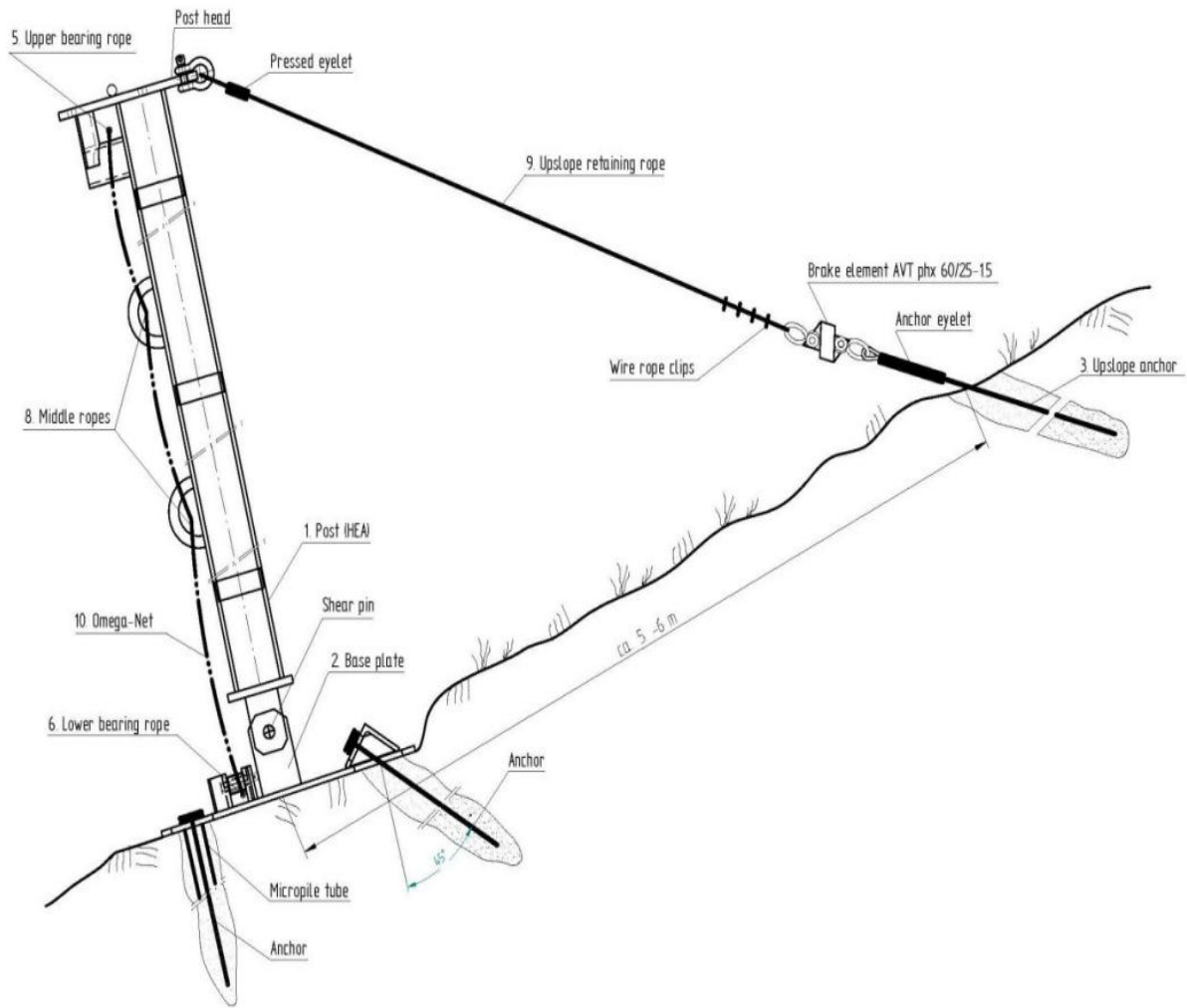
- Operating mode: Energy dissipation: plastic deformation
- Position: close to anchors, so that can be carried out without dismantling the fence
- Corrosion protection: hot dip galvanized according to EN ISO 1461

#### Anchoring

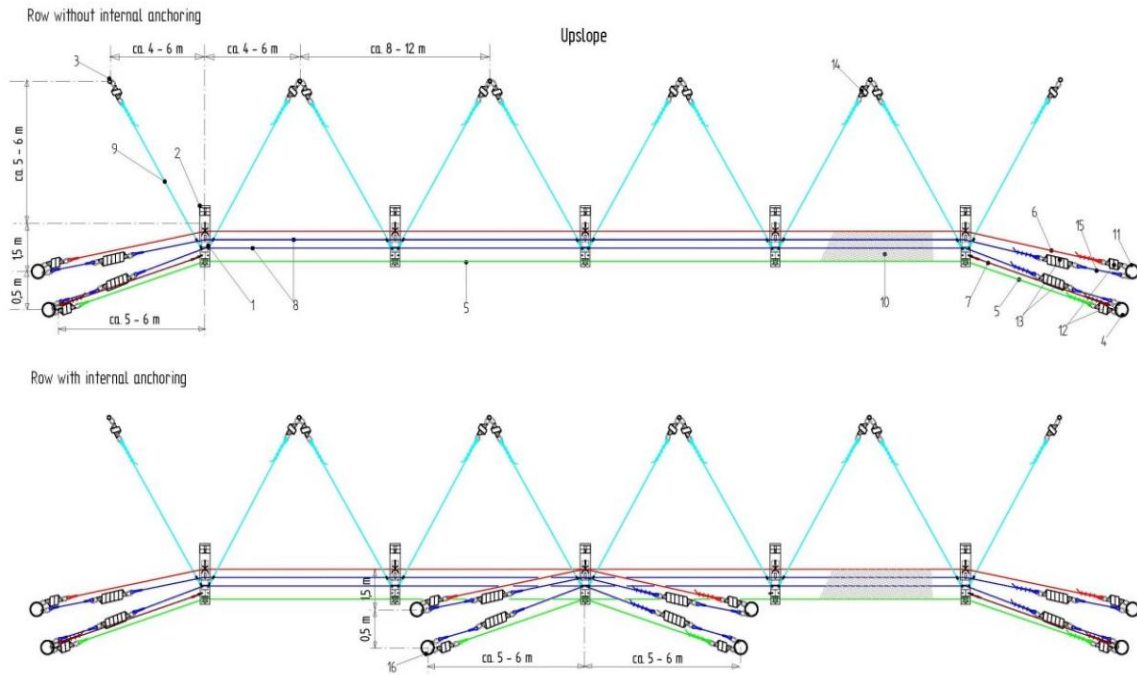
- of ropes: using anchor bars and eyelet frames
- of posts: using anchor bars (2 pieces per base plate)

---

Slika 61. Prikaz karakteristika odabranih barijera



Slika 62. Prikaz zaštitne mreže

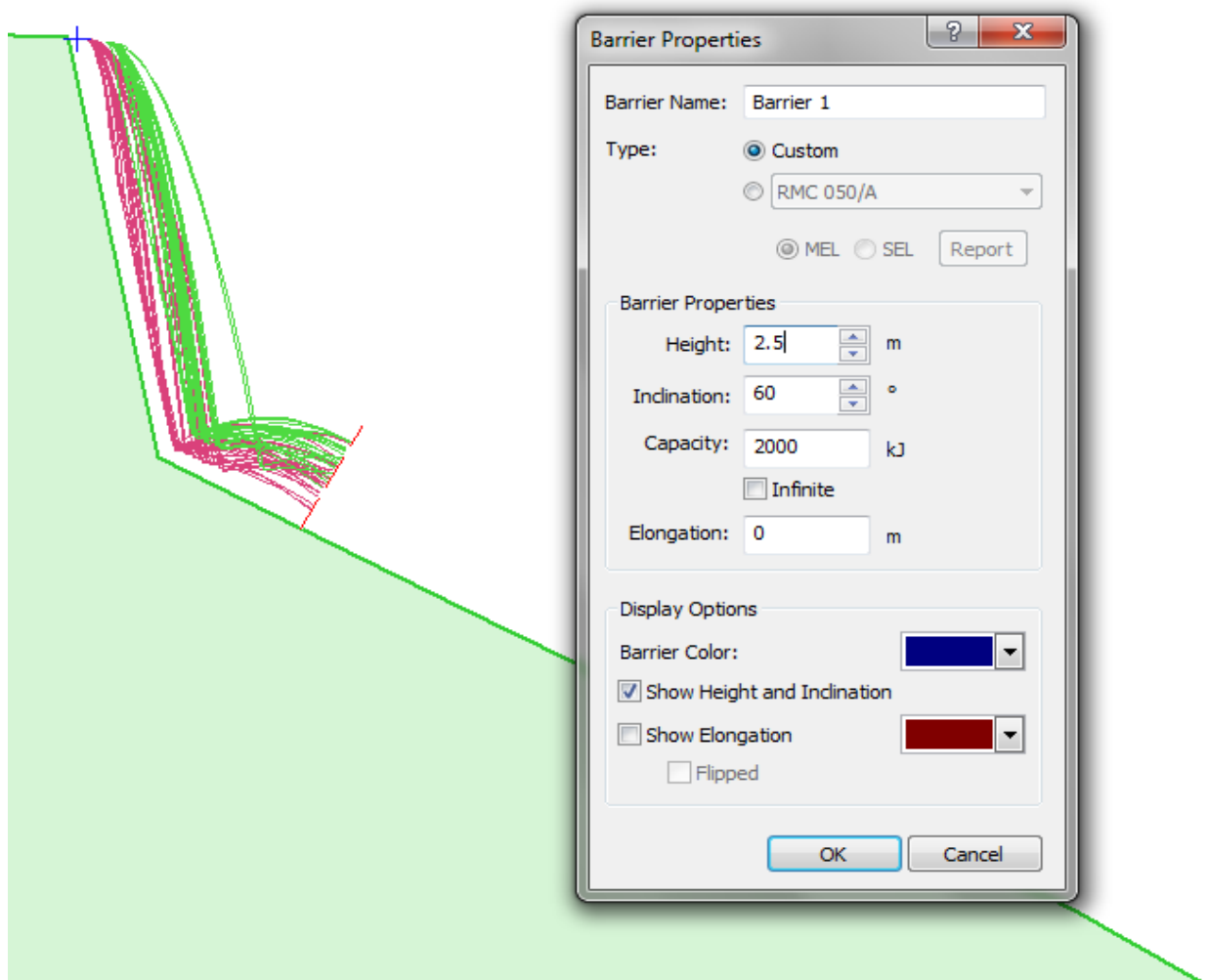


Slika 63. Zaštitne mreže u tlocrtu



### 4.3. RocFall v5.0 – rješenje

Za prvi poprečni presjek koji ima nagib terena  $30^{\circ}$ , visinu 70 m, a duljinu 120 m, na temelju rezultata RocFall-a v5.0. odabrali smo barijere mogućnosti apsorpcije 2000 kJ.

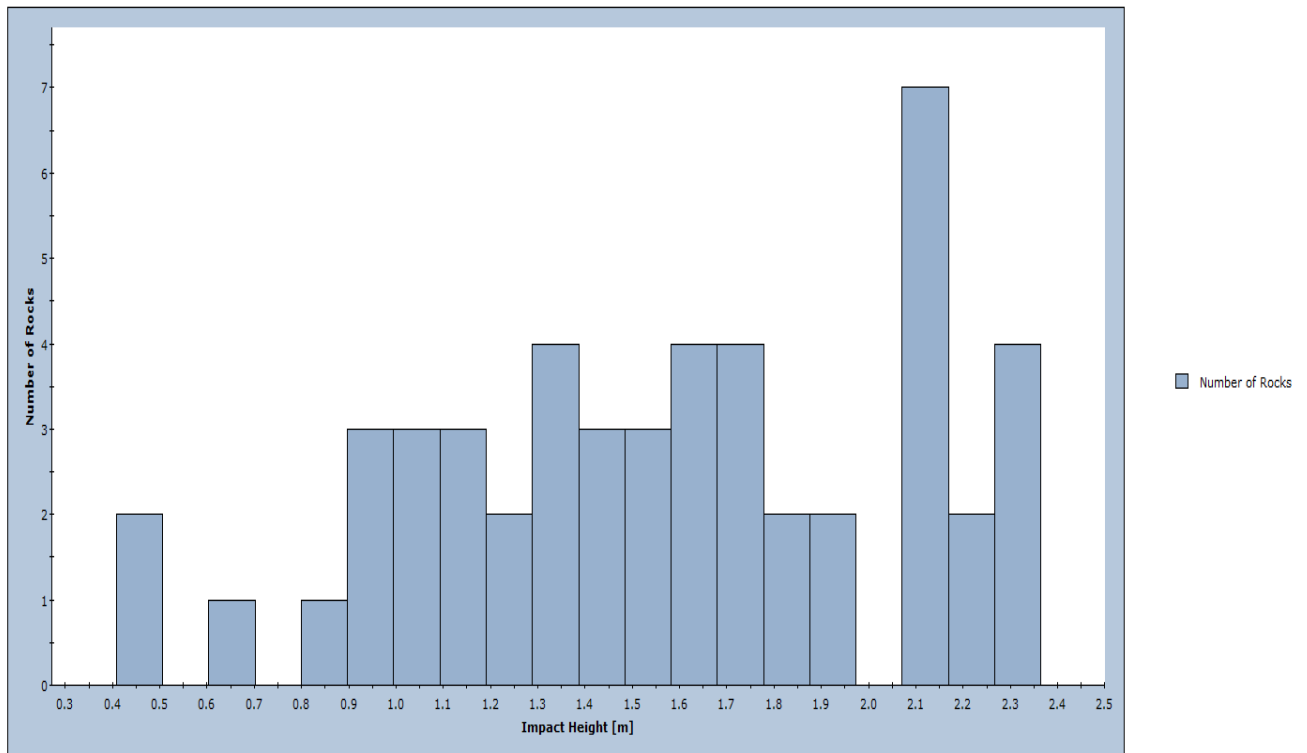


Slika 64. Odabir kapaciteta barijere

Iz prikaza vidimo da možemo točno odrediti visinu i nagib barijere. Lokacija barijere je na istom mjestu kao i kod prethodne verzije software-a, 43 m od ruba.



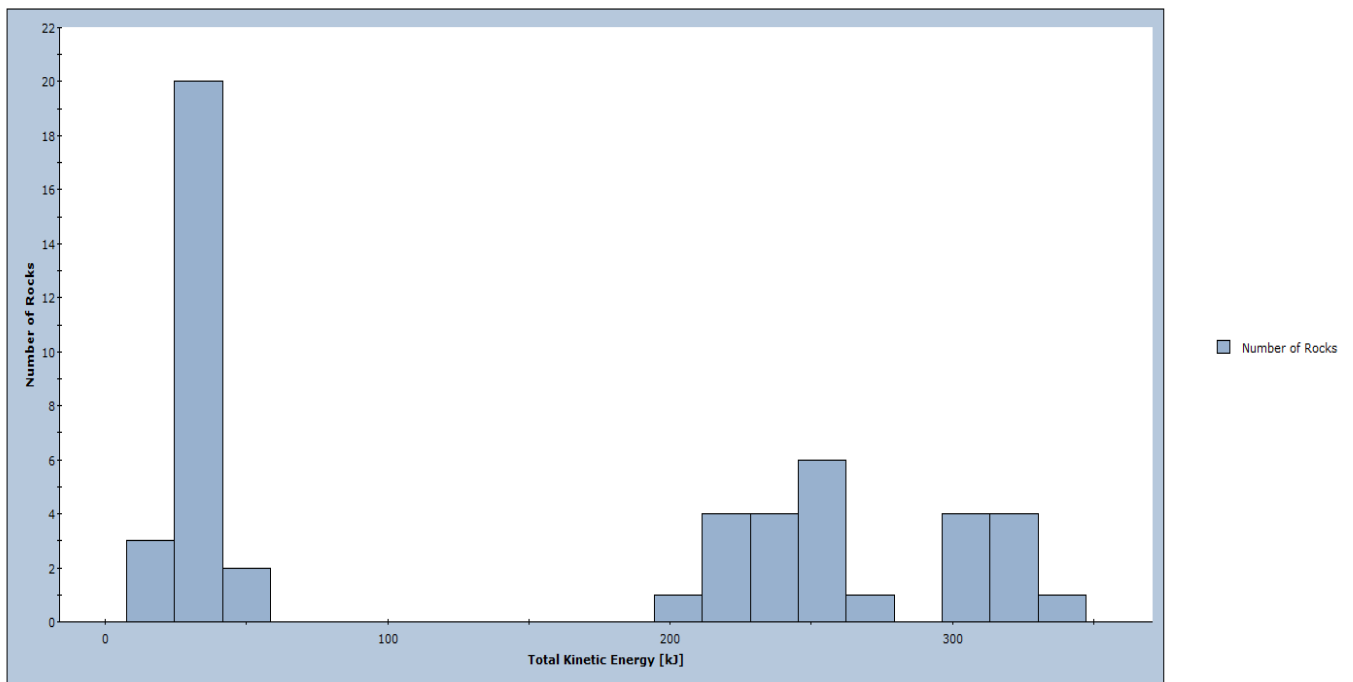
Impact Height on Barrier 1



Total number of rocks on Barrier 1: 50  
 Impact Height: min = 0.457363, max = 2.31534

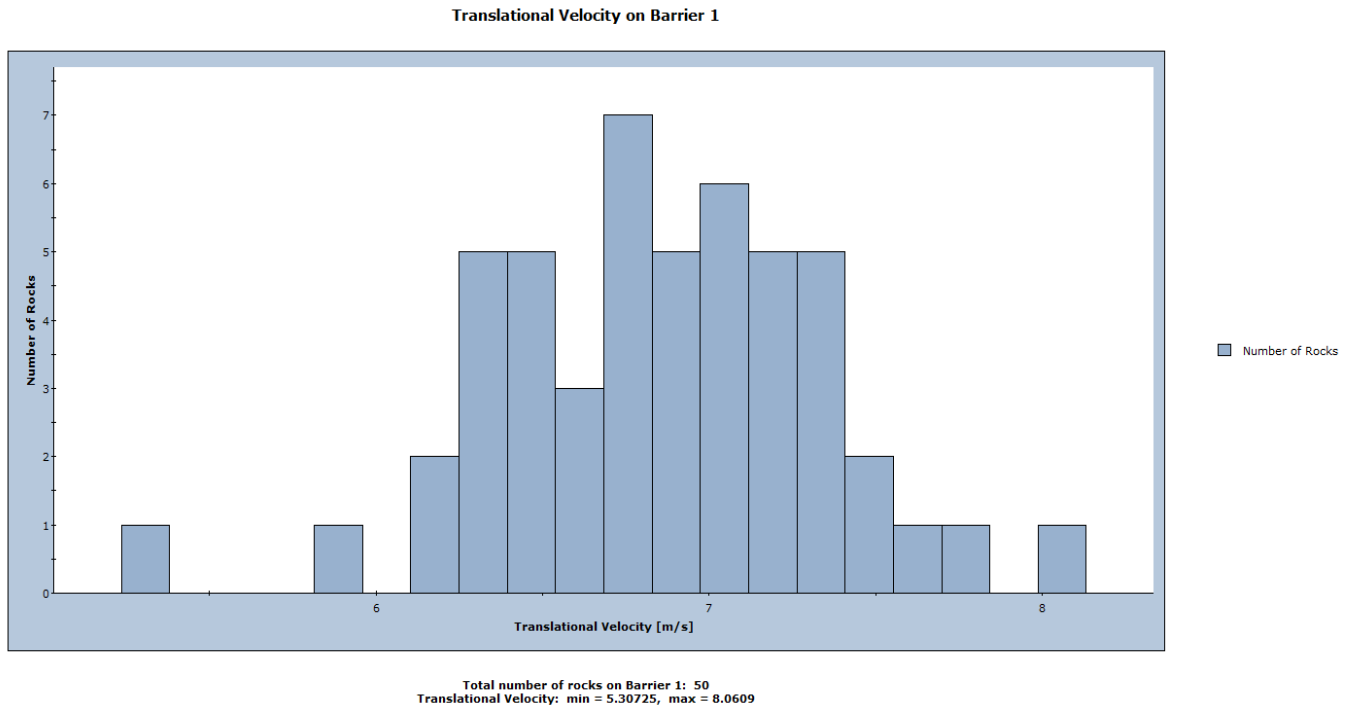
Dijagram 40. Visina odskoka

Total Kinetic Energy on Barrier 1



Total number of rocks on Barrier 1: 50  
 Total Kinetic Energy: min = 16.0668, max = 338.709

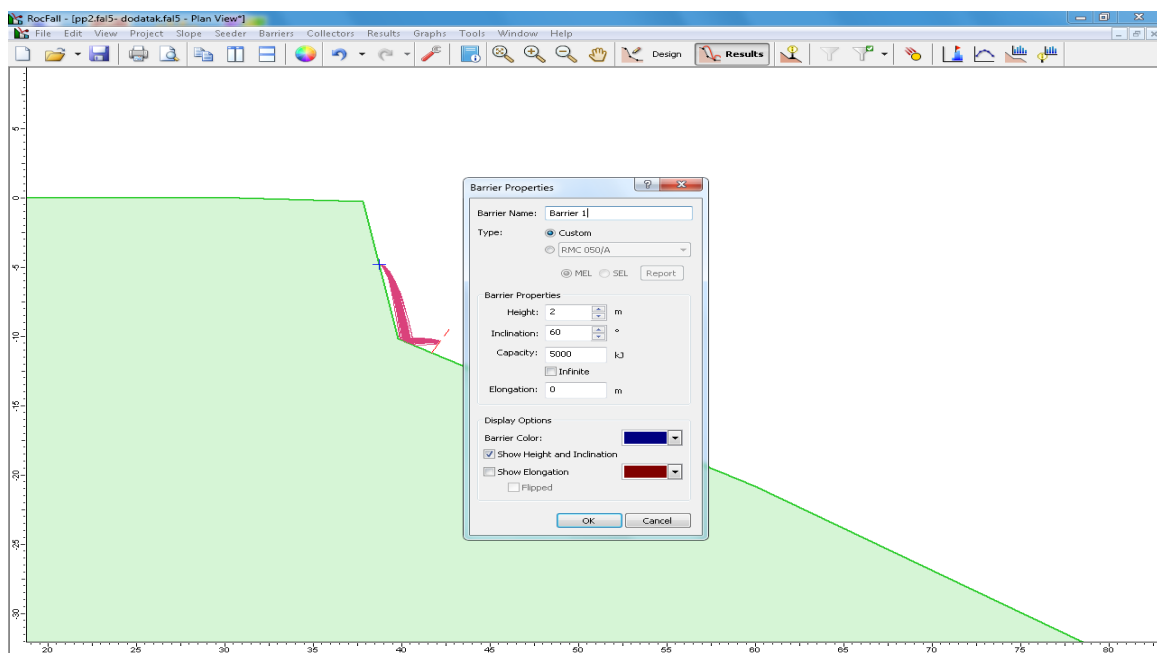
Dijagram 41. Ukupna kinetička energija na barijeru



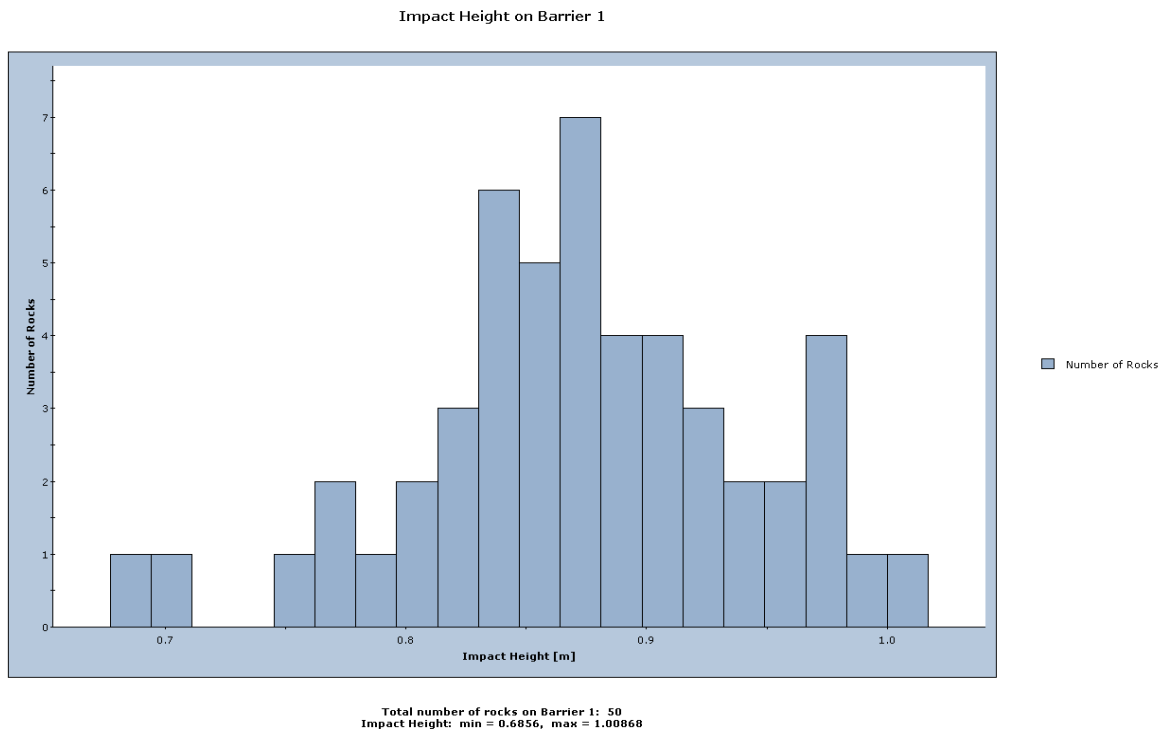
Dijagram 42. Translacijska brzina na barijeru

#### 4.4. RocFall v5.0 – rješenje za prvi pukotinski sustav

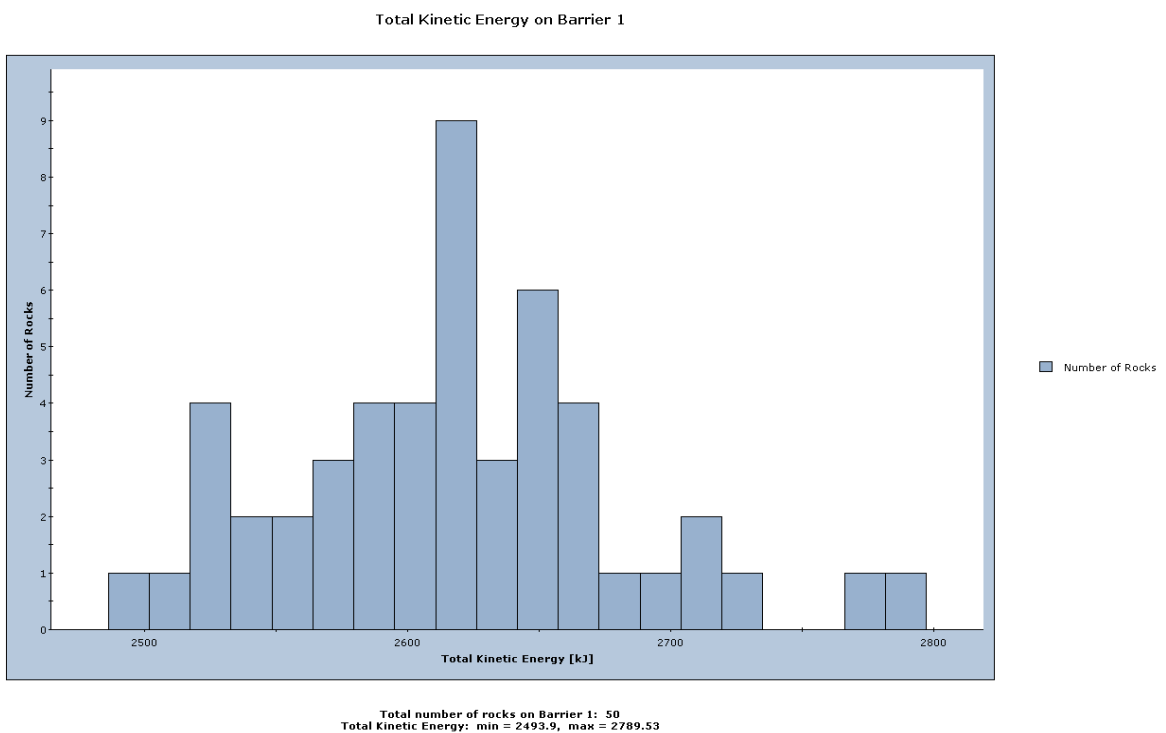
S obzirom da se u ovom slučaju radi o izrazito velikim blokovima bilo je za očekivati da će rezultati ukazivati da barijere za prethodne slučajeve od 2000 kJ neće biti zadovoljavajuće, stoga su odabrane barijere od 5000 kJ.



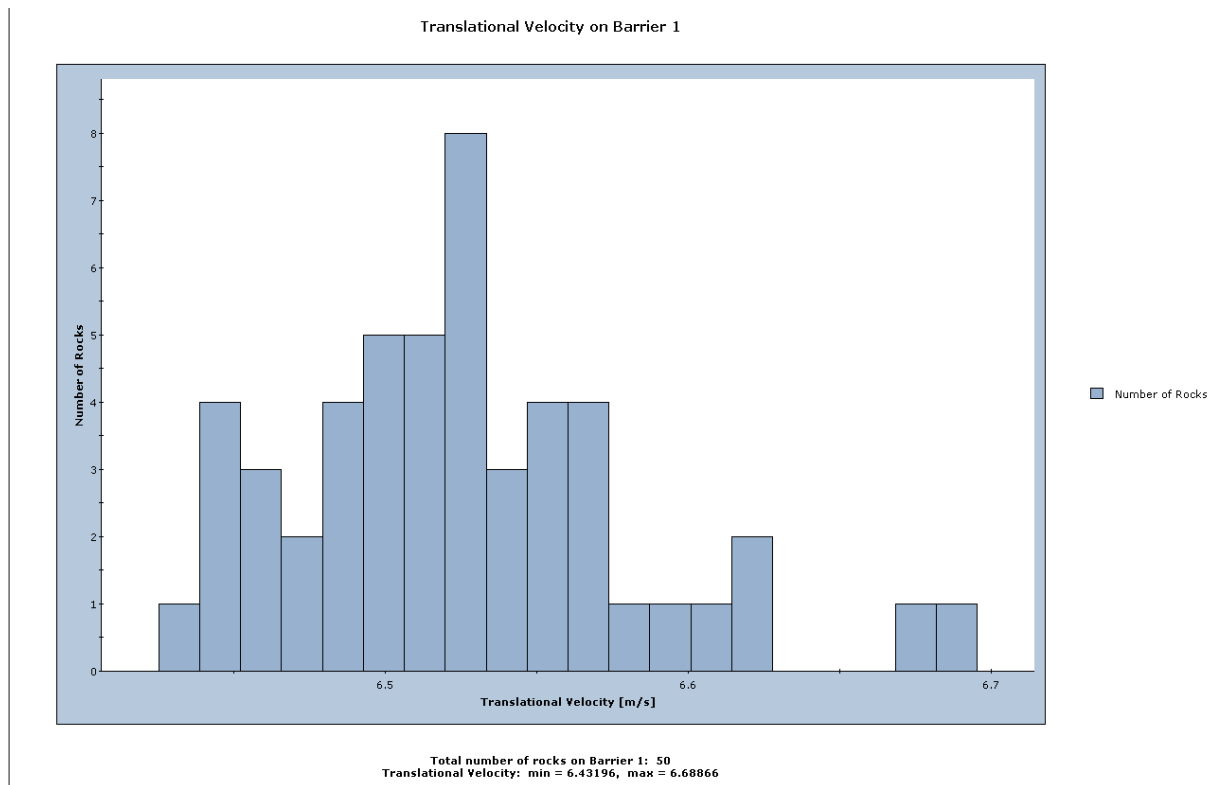
Slika 65. Odabir kapaciteta barijere



Dijagram 43. Visina odskoka

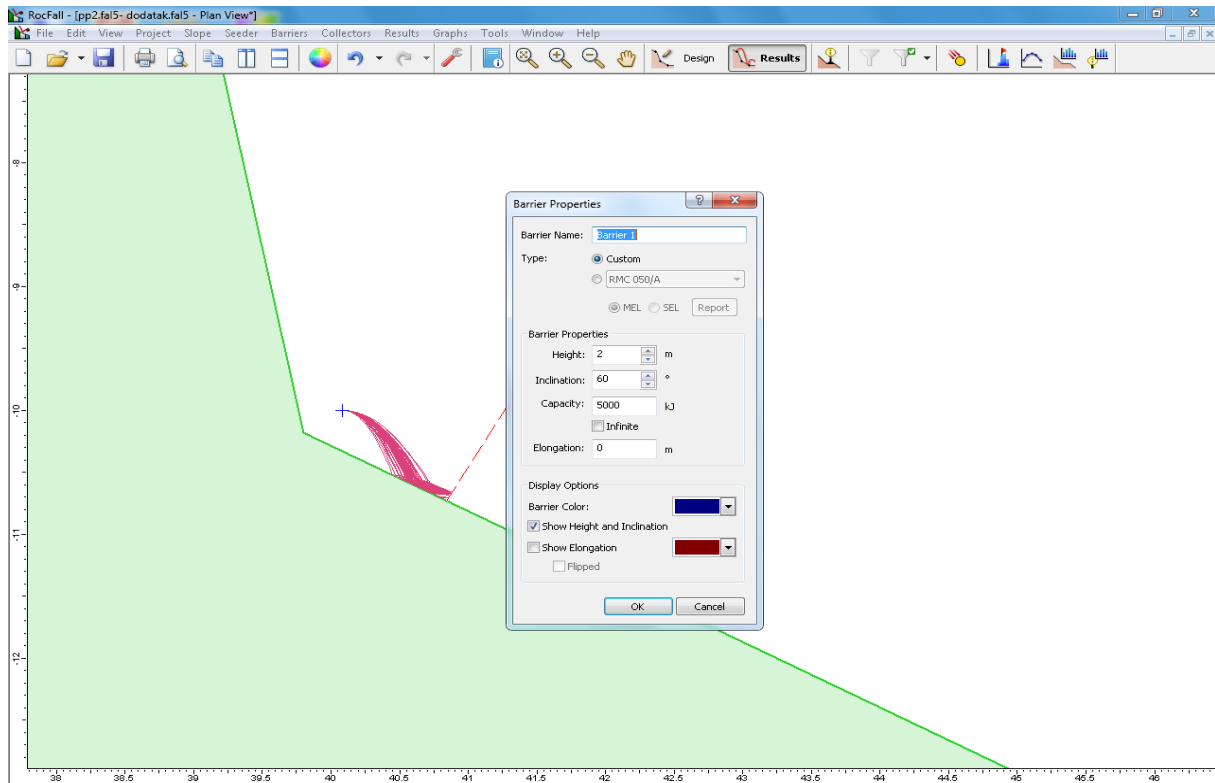


Dijagram 44. Ukupna kinetička energija na barijeru

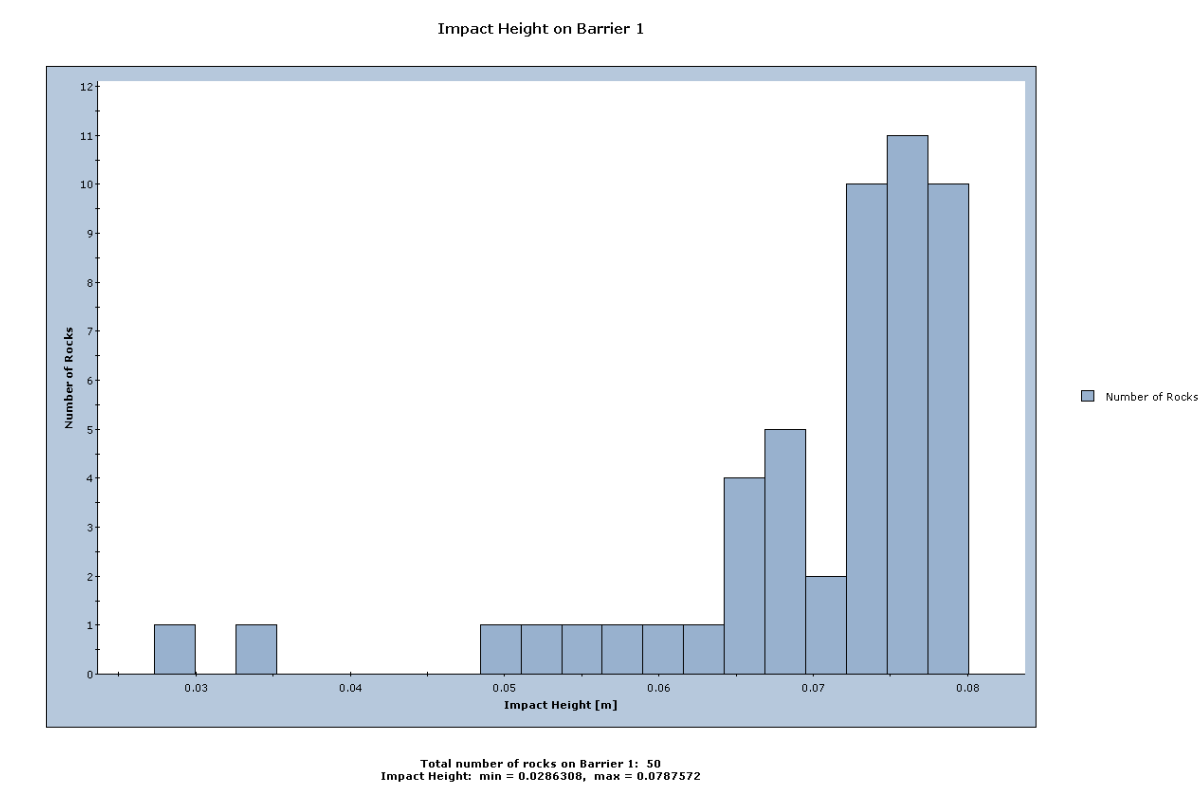


Dijagram 45. Translacijska brzina na barijeru

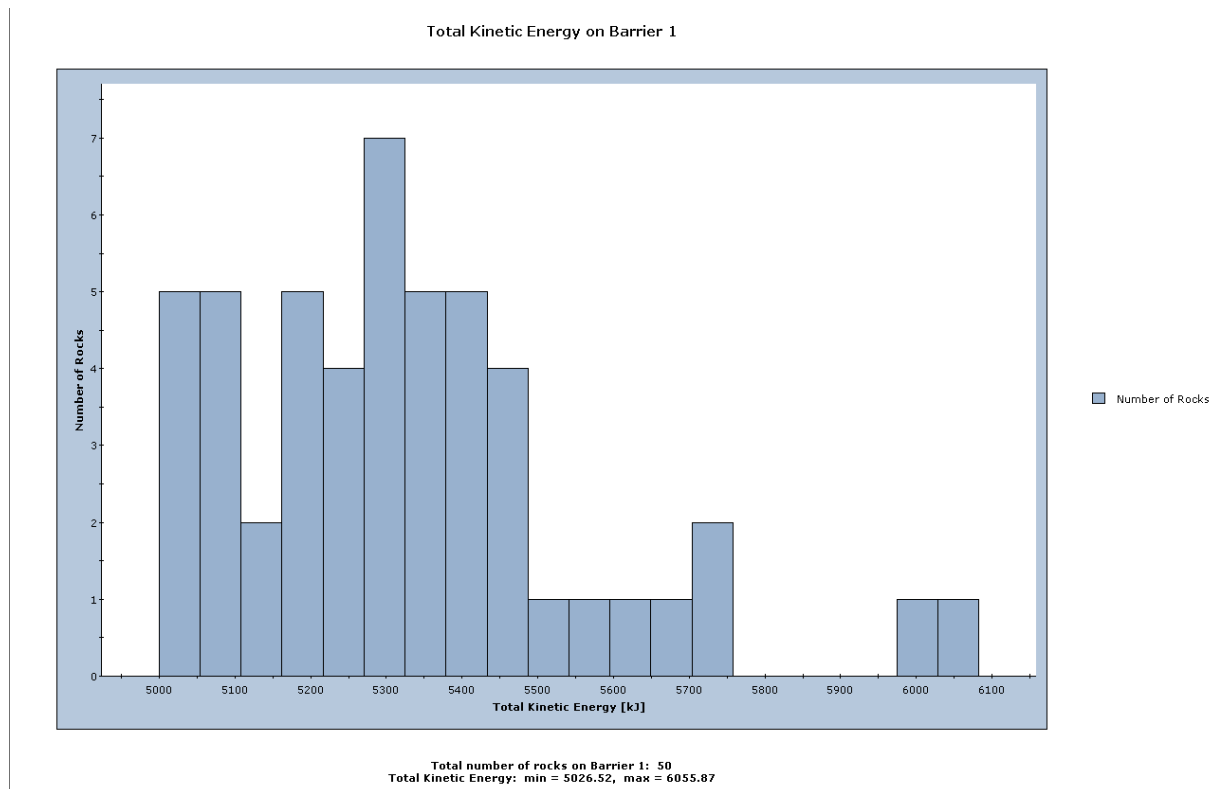
Na prethodnim dijagramima je prikazan slučaj prve lokacije s koje dolazi do odrona, na sljedećim dijagramima će biti prikazana druga lokacija.



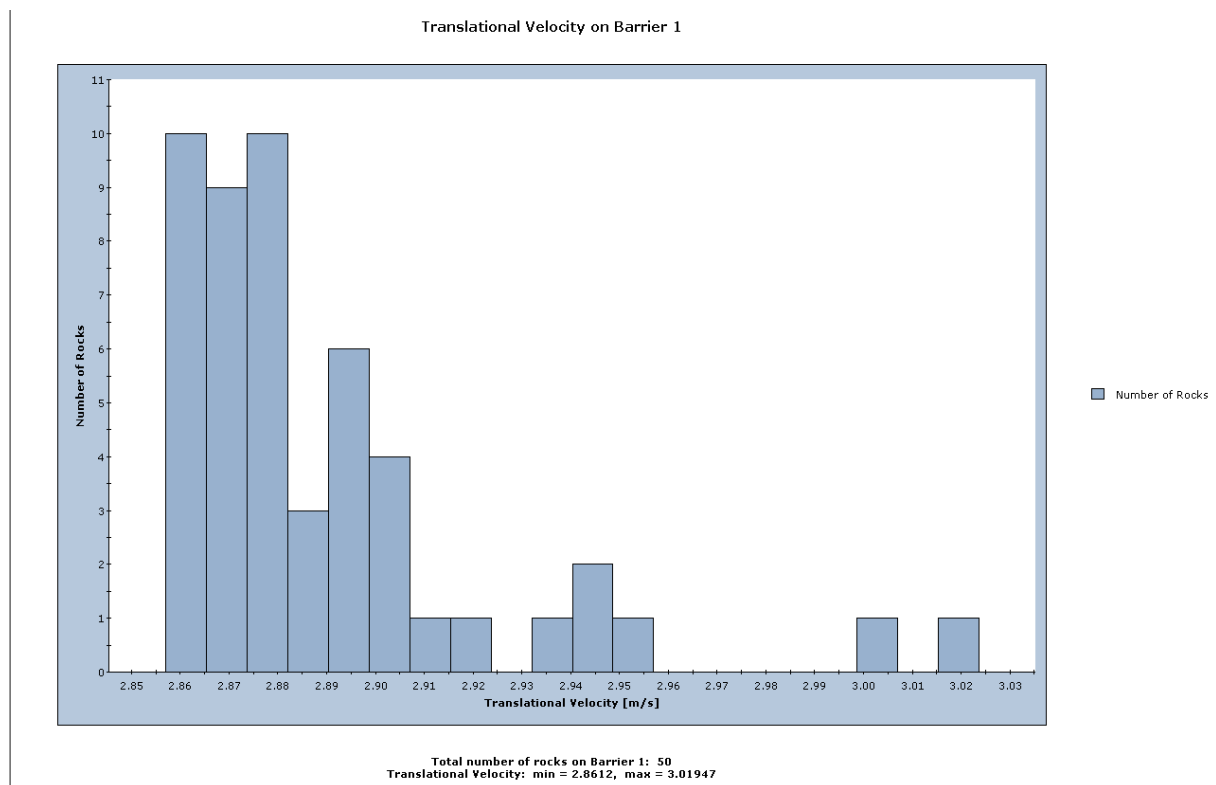
Slika 66. Odabir kapaciteta barijere



Dijagram 46. Visina odskoka



Dijagram 47. Ukupna kinetička energija na barijeru



Dijagram 48. Translacijska brzina na barijeru

## 5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Proučavanje i analiziranje problema odrona je od iznimne važnosti, prvenstveno jer se radi o zaštiti ljudskih života. U ovom radu je obrađena jedna potencijalno opasna kosina na području Duća te je dano rješenje zaštite od odrona.

Istraživanja pokazuju da ponekad nema potrebe za sofisticiranim simulacijama brzina blokova niz kosinu. Dovoljno je da imamo podatke o lokaciji sa područja koje analiziramo i koristeći osnovne matematičke proračune možemo dobiti trajektoriju gibanja. Primjerice, početne koordinate padajućeg bloka, nagib kosine uz pripadajuće formule sasvim su dovoljne za proračun.

Pitanja i problemi kojima bi se trebalo baviti u budućnosti zaštite od odrona su:

Kao prvo potrebno je poboljšati sustav praćenja odnosno predvidjeti potencijalne odrone. Potrebno je razviti metodologiju koja će omogućiti mapiranje područja opasnosti od odrona. Kvantitativna klasifikacija trebala bi omogućiti standardiziran način određivanja prioriteta za radove sanacije na područjima opasnosti od odrona. U Hrvatskoj je potrebno razviti metodologiju klasifikacije stijenskih odrona u kršu koja će biti prilagođena značajkama procesa koji su važni u nastajanju ovog reljefnog tipa.

Razvoj klasifikacije stijenskih odrona u Hrvatskoj omogućio bi razvoj sustava upravljanja rizicima povezanih s odronima preko projekata sanacije odrona. Nedavni odroni velikih razmjera pokazali su potrebu proaktivnog pristupa kod rješavanja problema odrona.

U Republici Hrvatskoj ne postoji sustavno prikupljanje podataka o odronima koji mogu dati korisne informacije o veličini i frekvenciji odrona za potrebe mapiranja područja opasnosti od odrona, te projektiranja mjera zaštite od odrona u područjima koja su najugroženija. Stoga je potrebno razviti strategiju zaštite od odrona koja bi iskoristila dostupne podatke o dosadašnjim odronima, klimi i posebno klimatskim promjenama, te iz toga razvila smjernice za sustav zaštite od odrona koji bi odgovarao hrvatskom podneblju i geologiji.

Drugo, način definiranja ulaznih i izlaznih parametra prilikom simulacija računalnim programima moraju biti uniformno definirani zbog mjera zaštite. To se može postići sa koeficijentom rizika, osjetljivosti zaštitnih mjera, potrebnih troškova za održavanje postavljenje zaštite te ukupno smanjenje rizika, s tim da se sve standardizacije i norme moraju uzeti u obzir.

Koristeći RocFall računalni program padajući blok je aproksimiran infitezimalnim krugom čija veličina nije bitna, ali blokovi imaju masu koja je određena konstantnom vrijednosti. Rezultirajući parametar je kinetička energija koju blok „posjeduje“ tijekom gibanja. No, postavlja se pitanje što je bolja aproksimacija, promatrati energiju u kJ ili impuls sile u Ns. Energija je uobičajeni način no impuls možda nekad daje bolje projekcije kada se promatra sami sudar i odskakivanje.

Na posljatku važna napomena, bavljenje i proučavanje problema odrona zahtjeva interdisciplinarnost struka. Naime, sami geotehnički inženjeri nisu dovoljni da bih se napravila objektivna analiza problema.

Kao što je već spomenuto osnovna zadaća ovog rada bila je kinematička analiza nestabilnih blokova i određivanje njihovih trajektorija gibanja. Na temelju rezultata računalnog programa odabrane su elastične barijere mogućnosti apsorpcije energije do 2000 kJ.

Kod primjene analiza vjerojatnosti, obično se u projektiranju koristi konzervativan pristup jer nije sigurno da će stvarni ishod biti predviđen simulacijom i „najgori slučaj“ se možda neće pojaviti u simulaciji.

Na primjer, barijera koja je dovoljna (u pogledu visine) da zaustavi sve blokove u simulaciji, možda neće biti dovoljno visoka da uhvati blokove koji su na samom kraju distribucije vjerojatnosti. Koliko će projektiranje biti konzervativno ovisi isključivo o projektnom zahtjevu. Na primjer, ako se projektira rijetko prometna cesta možda će biti dovoljno zaustaviti 95% blokova predviđenih simulacijom (kako bi zaštitili cestu od krhotina). Suprotno, kada se projektira pokos iznad prometne autoceste može se zahtijevati da projektno rješenje štiti od svih blokova predviđenih simulacijom i da uključuje dodatne konzervativne mjere.



## 6. LITERATURA

- [1] Borut Macuh, Bojan Žlender, Vpliv mehanskih lastnosti kamnine na odboj kamnitega kosa, Geološki zavod – Slovensko geološko društvo, 2007.
- [2] Predrag Miščević, Goran Vlastelica, Stabilnost u vremenu kosine iskopane u laporu, Građevinar, 2012.
- [3] A. Volkwein, K. Schellenberg, V. Labiouse, F. Agliardi, F. Berger, F. Bourrier, L. K. A. Dorren, W. Gerber and M. Jaboyedoff, Rockfall characterisation and structural protection, Natural Hazard and Earth System Sciences, 2011.
- [4] A. Volkwein, K. Schellenberg, V. Labiouse, F. Agliardi, F. Berger, F. Bourrier, L. K. A. Dorren, W. Gerber and M. Jaboyedoff, Rockfall characterisation and structural protection, Natural Hazard and Earth System Sciences, 2011.
- [5] H. Saroglou, V. Marinos, P. Marinos, and G. Tsiambaos, Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece, Natural Hazard and Earth System Sciences, 2012.
- [6] Željko Arbanas, Mirko Grošić, Dalibor Udovič and Snježana Mihalić, Rockfall Hazard Analyses and Rockfall Protection along the Adriatic Coast of Croatia, David publishing, 2012.
- [7] Luuk K.A. Dorren, A review of rockfall mechanics and modelling approaches, Progress in Physical Geography 27, 2003.
- [8] Axel Volkwein, Werner Gerber, Stronger and lighter – evolution of flexible rockfall protection, Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection, Morschach - Switzerland, June 23-25, 2008.
- [9] M. Cano, R. Tomás, Assessment of corrective measures for alleviating slope instabilities in carbonatic Flysch formations: Alicante (SE of Spain) case study, Springer Berlin Heidelberg, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Volume 72, Issue 3-4, pp 509-522, 2013.
- [10] Determining input parameters for a rockfall analysis, Article prepared for RocNews Fall 2003.

- [11] Goran Vlastelica, Predrag Mišćević, Hiroshi Fukuoka, Gen Furuya, Branko Kordić, Overview of Activities at Duće and Omiš Pitol Sites, Risk identification and land-use planning for disaster mitigation of landslides and floods in croatia, 4th project workshop, prosinac 2013.