

Zaštita od odrona na stijenskim kosinama primjenom fleksibilnih barijera

Rojnić, Nikolina

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:938518>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Nikolina Rojnić

**Zaštita od odrona na stijenskim kosinama primjenom fleksibilnih
barijera**

Diplomski rad

Rijeka, 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij
Hidrotehnika
Stabilnost kosina**

**Nikolina Rojnić
JMBAG: 0114026389**

**Zaštita od odrona na stijenskim kosinama primjenom fleksibilnih
barijera**

Diplomski rad

Rijeka, veljača 2021.

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

Tema diplomskog rada

ZAŠTITA OD ODRONA NA STIJENSKIM KOSINAMA PRIMJENOM FLEKSIBILNIH BARIJERA

ROCKFALL PROTECTION AT ROCK SLOPES USING FLEXIBLE ROCKFALL BARIERRS

Kandidatkinja: **NIKOLINA ROJNIĆ**

Kolegij: **STABILNOST KOSINA**

Diplomski rad broj: **H-2020-43**

Zadatak:

Odroni na stijenskim kosinama predstavljaju jedan od tipova klizišta koji zbog svoje brzine i iznenadne pojave predstavljaju veliku opasnost po ljudske živote i imovinu u naseljima i na prometnicama smještenim u nožicama stijenskih kosina. U novije vrijeme razvijena su brojna tehnička rješenja za prihvaćanje odronjene stijenske mase niz kosinu, a od kojih su najefikasnije fleksibilne barijere čija je primjena postala uobičajene na brojnim kosinama u svijetu. U ovom diplomskom radu potrebno je prikazati primjenu fleksibilnih barijera na stijenskom pokosu na Lujzinskoj cesti na lokaciji odrona Banska vrata, na izlazu iz Rijeke. Rad treba sadržavati: općeniti opis nastanak i mehanizma odrona stijenske mase, opis metoda zaštite od odrona stijenske mase na kosinama, opis lokacije Banska vrata i mogućnosti nastanka odrona na istoj, analizu odabira mjera zaštite od odrona i analize uspješnosti primjene fleksibilnih barijera za zaštitu od odrona na lokaciji Banska vrata.

Tema rada je uručena: 25. veljače 2020.

Mentor:

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

IZJAVA

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

Nkolina Rojnić

U Rijeci, 15. veljače 2021.

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta:
Istraživanje procesa i procjena hazarda od odrona u stijenskoj masi

Voditelj projekta: prof. dr. sc. Željko Arbanas

Financijer projekta: Sveučilište u Rijeci

Pravna nadležnost: Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

U Rijeci, 12. 02.2021.

Mentor:

prof. dr. sc. Željko Arbanas

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Željku Arbanasu na vodstvu, pomoći i razumijevanju tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Najveće hvala upućujem svojoj obitelji i najbližima na pruženoj podršci tijekom cijelog studiranja.

Naslov rada: Zaštita od odrona na stijenskim kosinama primjenom fleksibilnih barijera

Studentica: Nikolina Rojnić

Mentor: prof. dr. sc. Željko Arbanas

Studij: Sveučilišni diplomski studij

Kolegij: Stabilnosti kosina

SAŽETAK

Odron na stijenskim kosinama je iznenađujuće kao takav može imati razoran i po ljudski život vrlo opasan ishod. Infrastrukture poput prometnica, željezničkih pruga, industrijskih postrojenja, kamenoloma, naselja i sličnih tome, predstavljaju rizični objekt u području opasnosti od odrona. Državna cesta DC3, točnije njezina dionica Orehovica – Školjić, na lokaciji Banska Vrata (Rijeka) izložena je opasnosti od odrona te predstavlja rizični objekt kojeg je potrebno zaštititi. Na toj su lokaciji zabilježeni česti odroni stijenske mase. Zadnji veći odron stijenskog materijala zabilježen je 27. siječnja 2020. godine. Iz 3D oblaka točaka, koji prikazuje stijensku kosinu, koristeći program CloudCompare definirana je zona potencijalne nestabilnosti odrona te je iz te zone izvučen analizirani profil. Na profilu je provedeno modeliranje odrona metodama sjedinjene mase i diskretnih elemenata – kruto tijelo. Za modelirane su odrone predložena rješenja zaštite prometnice od odrona primjenom fleksibilne barijere. Definirano je kakvi se sve tipovi pasivne zaštite razlikuju, njihovo područje primjene, postupak dimenzioniranja, prednosti i nedostaci. No, prije svega je opisana sama nestabilnost odrona. Mehanika kretanja i udara odrona te zakonitosti i promjene koje su aktualne u tim fazama.

Ključne riječi: odron, zaštita, barijera

Thesis title: Rockfall protection at rock slope using flexible rockfall barriers

Student: Nikolina Rojnić

Mentor: prof. dr. sc. Željko Arbanas

Study: Graduate study of Civil Engineering

Course: Slope stability

ABSTRACT

Rockfall at rocky slopes is sudden and as such can have a devastating and very dangerous outcome for human life. Infrastructure such as roads, railways, industrial plants, quarries, populated places and similar represent a risky object in the area of rockfall hazards. The state road DC3, more precisely its section Orehovica – Školjić, at the location Banska Vrata (Rijeka) is exposed to the danger of rockfall and needs to be protected. Frequent landslides were recorded at this location. The last major landslide of rock material was recorded on January 27, 2020. From the 3D point cloud, which shows the rock slope, using the CloudCompare program, the zone of potential instability of the rockfall was defined and the analyzed profile was extracted from the zone. Rockfall modeling was performed on the profile using the lumped mass and discrete element – rigid body methods. For modeled landslides, solutions for road protection from rockfall have been proposed using a flexible barrier. It is defined what types of passive protections there are, their area of application, sizing procedure, its pros and cons. The instability of the rockfall itself is described. The mechanics of movement and impact of rockfall and the law and changes that are current in the phases.

Key words: rockfall, protection, barriers.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ODRON U STIJENSKOJ MASI.....	3
3. PRORAČUN ODRONA.....	6
3.1. Brzina i putanja odrona	6
3.2. Mehanika udara	10
3.3. Koeficijent restitucije.....	13
3.4. Energija odrona.....	15
4. PASIVNA ZAŠTITA OD ODRONA.....	18
4.1. Jarak.....	18
4.2. Žičane mreže	19
4.2.1. Žičana mreža postavljena po sistemu “zavjese“	19
4.2.2. Prigušne mreže.....	21
4.3. Galerije.....	22
4.3.1. Armiranobetonske galerije	22
4.3.2. Galerije od žičanih mreža	25
5. BARIJERE.....	27
5.1. Nasipi – krute deformabilne barijere	29
5.1.1. Barijere od gabiona.....	34
5.1.2. Barijere od betonskih blokova	34
5.1.3. Barijere od armiranog tla	35

5.2. Fleksibilne barijere - ograde	37
6. PRIMJENA ANALIZE ODRONA I DIMENZIONIRANJE ZAŠTITNE BARIJERE NA PROFILU KOSINE UZ DRŽAVNU CESTU DC3 – DIONICA OREHOVICA – ŠKOLJIĆ, LOKACIJA BANSKA VRATA	43
6.1. RocFall program	46
6.2. Rezultati analize odrona.....	47
6.3. Dimenzioniranje zaštitne barijere	56
6.3.1. Dimenzioniranje barijere – 1. rješenje	56
6.3.2. Dimenzioniranje barijere – 2. rješenje	65
7. ZAKLJUČAK.....	72

POPIS TABLICA

Tablica 1: Karakteristike zona kosine na kojem je aktivan odron [3 2].....	5
Tablica 2: Vrijednosti parametara materijala definiranih zona profila (kruto tijelo)..	48
Tablica 3: Vrijednosti parametar materijala definiranih zona profila (sjedinjena masa)	48

POPIS SLIKA

Slika 1: Mehanizmi kretanja odrona [15].....	3
Slika 2: Pokretački čimbenici odrona [6 - modificirano].....	4
Slika 3: Zone kosine na kojoj je aktivan odron [16 - modificirano].....	4
Slika 4: Ekscentrični uvjeti udara [2]	11
Slika 5: Krivulja odnosa kuta udara i normalnog koeficijenta restitucije [2 - modificirano].....	15
Slika 6: Promjena kinetičke energije tijekom odrona [17 - modificirano]	16
Slika 7: Utjecaj geometrije kosine na dimenzije jarka [2 - modificirano]	19
Slika 8: Žičana mreža postavljena po sistemu "zavjese"[9 - modificirano].....	20
Slika 9: Prigušna mreža [10 - modificirano].....	21
Slika 10: Prijenos sile kroz amortizirajući sloj [11 - modificirano].....	23
Slika 11: Odnos trajanja udarnog kontakta i sile generirane u krutim nedefomabilnim, krutim deformabilnim i fleksibilnim strukturama [2 - modificirano]	28
Slika 12: Nasip i jarak [8 - modificirano]	30
Slika 13: Udarno opterećenje nasipa [2].....	31
Slika 14: Pomaci uslijed proboja nasipa [2 - modificirano].....	32
Slika 15: Shema fleksibilne ograde [18 - modificirano].....	38
Slika 16: Energetski kapacitet fleksibilnih barijera [12 - modificirano]	39
Slika 17: Prostorna lokacija kosine izvučenog profila [19]	43
Slika 18: Dio analizirane stijenske kosine	44
Slika 19: Sustavi diskontinuiteta	45

Slika 20: Profil izvučen iz 3D oblaka točaka u programu CloudCompare (zelena linija)	46
Slika 21: Oblik bloka podložnog nestabilnosti odrona.....	49
Slika 22: Model odrona modeliran metodom diskretnih elemenata –kruto tijelo.....	50
Slika 23: Dijagram promjene visine putanje na profilu kosine (kruto tijelo).....	51
Slika 24: Dijagram promjene ukupne kinetičke energije na profilu kosine (kruto tijelo)	51
Slika 25: Dijagram promjene translacijske kinetičke energije na profilu kosine (kruto tijelo).....	51
Slika 26: Dijagram promjene rotacijske kinetičke energije na profilu kosine (kruto tijelo).....	52
Slika 27: Dijagram promjene translacijske brzine na profilu kosine (kruto tijelo)	52
Slika 28: Dijagram promjene rotacijske brzine na profilu kosine (kruto tijelo)	52
Slika 29: Histogram raspodjele vjerojatnosti zaustavljanja na profilu kosine (kruto tijelo).....	53
Slika 30: Model odrona modeliran metodom sjedinjene mase.....	53
Slika 31: Dijagram promjene visine putanje na profilu kosine (sjedinjena masa).....	54
Slika 32: Dijagram promjene ukupne kinetičke energije na profilu kosine (sjedinjena masa)	54
Slika 33: Dijagram promjene translacijske kinetičke energije na profilu kosine (sjedinjena masa).....	54
Slika 34: Dijagram promjene rotacijske kinetičke energije na profilu kosine (sjedinjena masa).....	55

Slika 35: Dijagram promjene translacijske brzine na profilu kosine (sjedinjena masa)	55
Slika 36: Dijagram promjene rotacijske brzine na profilu kosine (sjedinjena masa) ..	55
Slika 37: Histogram raspodjele vjerojatnosti zaustavljanja na profilu kosine (sjedinjena masa).....	56
Slika 38: Model odrona krutog bloka presretnutog barijerom GBE-1000A	57
Slika 39: Dijagram visine putanje odrona krutog bloka do barijere GBE-1000A	58
Slika 40: Histogram učestalosti visine udara odrona krutog bloka na barijeri GBE-1000A	58
Slika 41: Dijagram energije odrona krutog bloka do barijere GBE-1000A	59
Slika 42: Histogram učestalosti energije udara odrona krutog bloka na barijeri GBE-1000A	59
Slika 43: Histogram učestalosti kuta udara odrona krutog bloka na barijeri GBE-1000A	60
Slika 44: Dopuštena deformacija (otklon) mreže barijere GBE-1000A.....	61
Slika 45: Model odrona sjedinjene mase presretnutog barijerom GBE-1000A.....	62
Slika 46: Dijagram visine putanje odrona sjedinjene mase do barijere GBE-1000A....	63
Slika 47: Histogram učestalosti visine udara odrona sjedinjene mase na barijeri GBE-1000A	63
Slika 48: Dijagram energije odrona sjedinjene mase do barijere GBE-1000A.....	64
Slika 49: Histogram učestalosti energije udara odrona sjedinjene mase na barijeri GBE-1000A	64
Slika 50: Histogram učestalosti kuta udara odrona sjedinjene mase na barijeri GBE-1000A	64

Slika 51: Model odrona krutog bloka presretnutog barijerom RXE-500	65
Slika 52: Dijagram visine putanje odrona krutog bloka do barijere RXE-500	66
Slika 53: Histogram učestalosti visine udara odrona krutog bloka na barijeri RXE-500	66
Slika 54: Dijagram energije odrona krutog bloka do barijere RXE-500	67
Slika 55: Histogram učestalosti energije udara odrona krutog bloka na barijeri RXE-500	67
Slika 56: Histogram učestalosti kuta udara odrona krutog bloka na barijeri RXE-500	67
Slika 57: Model odrona sjedinjene mase presretnutog barijerom RXE-500	68
Slika 58: Dijagram visine putanje odrona sjedinjene mase do barijere RXE-500	69
Slika 59: Histogram učestalosti visine udara odrona sjedinjene mase na barijeri RXE-500	69
Slika 60: Dijagram energije odrona sjedinjene mase do barijere RXE-500	70
Slika 61: Histogram učestalosti energije udara odrona sjedinjene mase na barijeri RXE-500	70
Slika 62: Histogram učestalosti kuta udara odrona sjedinjene mase na barijeri RXE-500	71

1. UVOD

Odron je prema Varnesu (1978) jedan od tipova nestabilnosti koje se mogu dogoditi u stijenskoj masi ili tlu. Uz njega se tu ubrajaju još i prevrtanje, klizanje, širenje i tok. Odron je najčešća pojava nestabilnosti u stijenskim masama. "Prema definiciji (Cruden, 1977): klizište (nestabilnost) predstavlja "svaki pomak stijenske mase, nevezanog ili vezanog tla niz kosinu"" [1]. Duž površine na kojoj je došlo do nestabilnosti odrona uglavnom uopće nema smicanja, već dolazi do slobodnog pada stijenskog materijala odvojenog sa kosine [1]. Mehanizam slobodnog pada nakon prvog udara u kosinu prelazi u mehanizme odskakivanja, kotrljanja i klizanja. Proračun odrona temelji se na algoritmu kosog hitca i algoritmu klizanja čija je izmjena definirana minimalnom brzinom kosog hitca [5]. Proračun odrona pojednostavljen je zanemarivanjem otpora zraka tijekom putanje i pomaka odronjenog materijala tijekom udarnog kontakta. Također zanemaruje se promjena mase generirana razlamanjem na manje fragmente prilikom udara, odnosno definirana masa je konstantna [2]. Najjednostavnija metoda sjedinjene mase modelira odron na temelju spomenutih pretpostavki. Rigoroznije metode u proračun odrona uvrštavaju masu, dimenzije i oblik bloka te njegovo razlamanje na manje fragmente prilikom udara. Ujedno, to je razlog njihove složenosti, no i veće pouzdanosti [4]. Metoda diskretnih elemenata – kruto tijelo koja kao dodatni ulazni parametar uvrštava oblik bloka također je korištena u modeliranju odrona na istom profilu kosine. Razlikuju se 2D i 3D modeli odrona. Spomenute metode sjedinjene mase i krutog tijela definiraju 2D modele odrona te su dostupne kao postavke proračuna u programu RocFall. RocFall program korišten je za 2D modeliranje odrona i dimenzioniranje barijere kao zaštite od odrona na profilu stijenske kosine uz državnu cestu DC3, točnije njezine dionice Orehovica – Školjić, na lokaciji Banska Vrata (Rijeka).

Zaštita od odrona može biti izvedena kao aktivna ili pasivna [7]. U sklopu ovog rada obrađena je pasivna zaštita od odrona s naglaskom na barijerama. Prema krutosti se razlikuju krute nedeformabilne, krute deformabilne i fleksibilne barijere. Osnovna karakteristika koja definira barijeru je njezin energetska kapacitet. S obzirom na apsorpciju energije odrona barijere mogu biti zaustavne i prigušne.

Dimenzioniranje barijere temelji se na proračunatim parametrima modela odrona, prvenstveno visini putanje i energiji odrona [2]. Iterativnim postupkom dimenzioniranja, odabire se optimalno rješenje.

2. ODRON U STIJENSKOJ MASI

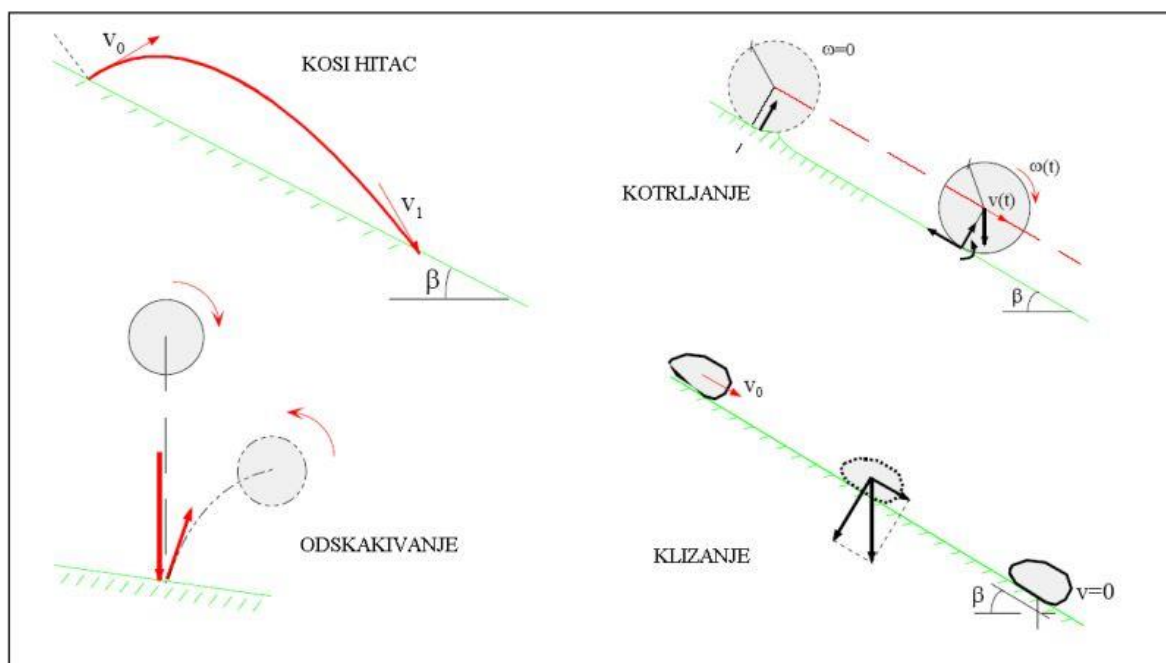
Odron u stijenskoj masi podrazumijeva odvajanje nestabilnih dijelova stijene zbog prisutstva pokretačkih čimbenika na kosini. Pokretački čimbenici, prikazani na slici 2, mogu biti geološkog, geomorfološkog, hidrološkog, seizmičkog i antropogenog karaktera [4]. Odroni su s geološkog aspekta vrlo opasni u čvrstim stijenskim masama (granit, vapnenac, bazalt,...) kod kojih se odronjena stijenska masa pri udaru neće razlomiti u bezopasne fragmente kao što je to slučaj u stijenskim masama manje čvrstoće (škriljevac, filit,...) [2]. Uz spomenutu čvrstoću vrlo bitnu ulogu imaju i karakteristike diskontinuiteta (postojanost, razmak, orijentacija,...) koje definiraju veličinu bloka odronjenog stijenskog materijala te mehanizam njihovog kretanja [4]. Odronjeni dio stijenske mase u padu nizbrdo može se kretati mehanizmima [5], shematski prikazanim na slici 1:

→ kosi hitac – slobodan pad (eng. free falling)

→ odskakivanje (eng. bouncing)

→ kotrljanje (eng. rolling)

→ klizanje (eng. sliding)



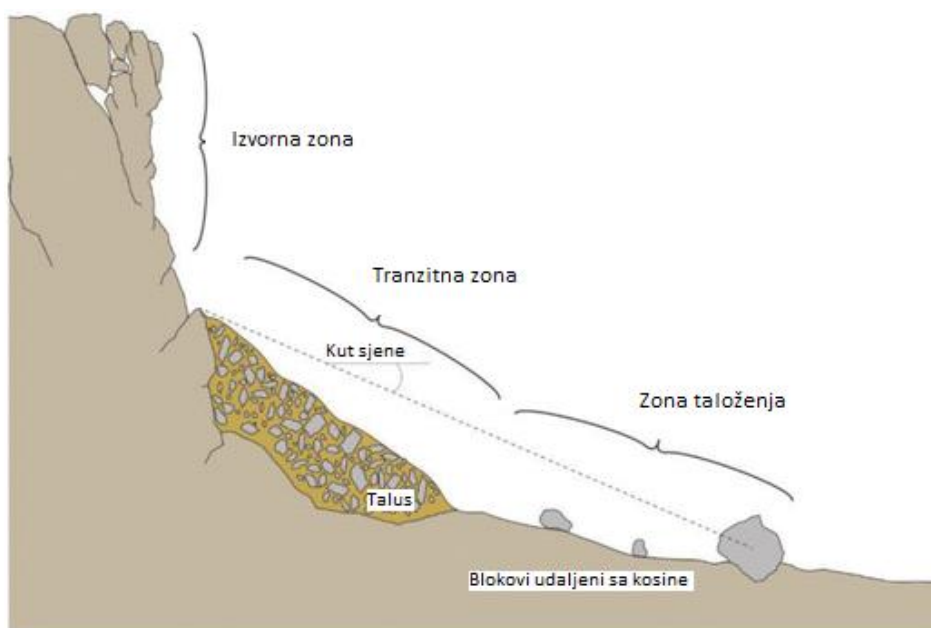
Slika 1: Mehanizmi kretanja odrona [15]

Procesi koji mogu izazvati odron su infiltracija obilnih količina oborina, ciklus smrzavanja – otapanja, rast korijenja vegetacije, seizmička aktivnost te ljudska aktivnost u vidu iskopa, nasipavanja, miniranja i sl. [6]. Iz spomenutih pokretačkih procesa može se zaključiti da najnepovoljniji utjecaj ima voda, koja u porama i pukotinama stijenske mase stvara pritisak.



Slika 2: Pokretački čimbenici odrona [6 - modificirano]

Utvrđeno je da odron na strmim kosinama ima karakteristično ponašanje koje se poistovjećuje sa protokom vode na njima, odnosno karakterističnim ponašanjem slivnog područja. Odronjeni stijenski materijal s visokih predjela kosine koncentrira se u jarugu te se akumulira u podnožju kosine. Razlikujemo tri zone karakteristične konfiguracije kosine definirane na slici 3 uz koje se veže karakteristično ponašanje odrona na njima, opisano u tablici 1 [2].



Slika 3: Zone kosine na kojoj je aktivan odron [16 - modificirano]

Tablica 1: Karakteristike zona kosine na kojem je aktivan odron [3|2]

Izvorna zona	<ul style="list-style-type: none"> - <i>stijenski nagib</i> ; strmi stijenski izdanak (litica) - zona u kojoj započinje odron stijenske mase - široko razmaknuti udari; velike brzine translacije i rotacije odrona
Tranzitna zona	<ul style="list-style-type: none"> - <i>nagib koluvija</i> ; kut nagiba kosine $\Psi_s > 37^\circ$ - usko razmaknuti udari - nema akumulacije odronjenih stijenskih blokova, akumulacija sitnozrnatog materijala koji se pri udaru odlomi od velikih blokova stijenske mase
	<ul style="list-style-type: none"> - <i>nagib talusa</i> ; kut nagiba kosine 37° (gore) $< \Psi_s < 32^\circ$ (dole) - usko razmaknuti udari - akumulacija odlomljenog stijenskog materijala → manji fragmenti pri vrhu, veći pri dnu → ravnomjerno, konusno uvećanje naslage talusa
Zona taloženja	<ul style="list-style-type: none"> - kosina blažeg nagiba od talusa - taloženje većih blokova, blokova veće energije - maksimalna udaljenost taloženja definirana je linijom nagiba $27,5^\circ$ od podnožja strmog stijenskog izdanka; kut ujedno predstavlja koeficijent trenja kotrljanja - usko raspoređeni udari ili mehanizam kotrljanja i klizanja

Poznavanje konfiguracije kosine i ponašanja odronjenog stijenskog materijala kroz zone bitno je zbog definiranja zona opasnosti u podnožju kosina te pozicioniranja i odabira zaštite od odrona [2].

3. PRORAČUN ODRONA

Mehanizam kretanja odrona određuju uvjeti na kosini, odnosno najveći utjecaj ima sama geometrija kosine te materijal njezine površine koji značajno utječe na promjenu brzine. U visokom predjelima kosine gdje prevladava gola stijena neće doći do značajnog smanjenja brzine. No već u nižim predjelima kosine gdje su površine prekrivene trošnim materijalom, šljunkom ili tlom doći će do apsorpcije energije te smanjenja brzine a moguće i potpuno zaustavljanje. Promjena brzine uzrokovana uvjetima udara izražena je koeficijentom restitucije [2].

Na početku putanje parametri brzine i kutova imaju index ili subscript "0". Kako se tijekom putanje ti isti parametri mijenjaju, na kraju putanje odnosno na početku udarnog kontakta označeni su indexom "i". Parametri označeni indexom "f" definirani su na kraju udarnog kontakta odnosno početka nove putanje, iz čega slijede jednakosti $V_f = V_0$ i $\theta_f = \theta_0$. Ti se parametri još nazivaju i restitucijski ili povratni parametri [2].

3.1. Brzina i putanja odrona

Putanja odrona koji se kreće mehanizmom kosog hitca je definirana udaljenošću između udarnih točaka te vertikalnim visinama od površine kosine do parabolične putanje kojom odronjena stijenska masa putuje. Proračun putanje odrona definiran je jednadžbama temeljenim na pretpostavkama izraženim jednadžbama (1) i (2) [2].

$$\text{Vertikalna akceleracija} \quad a_z = -g \quad (1)$$

$$\text{Horizontalna akceleracija} \quad a_x = 0 \quad (2)$$

Translacijska brzina stijenskog bloka koji se kreće mehanizmom kosog hitca određuje se integracijom akceleracije u granicama od početka putanje u vremenu $t=0$ do promatranog trenutka t . Promjena normalne translacijske brzine (3) uzrokovana je gravitacijskim ubrzanjem, dok je tangencijalna translacijska brzina (4) kao i kutna brzina tijekom putanje konstantna jer na tijelo ne djeluju nikakve sile koje bi mogle uzrokovati promjenu [2].

$$V_{tz} = \int_0^t a_z dt = -gt + V_{0z} \quad (3)$$

$$V_{tx} = \int_0^t a_x dt = V_{0x} \quad (4)$$

Koordinate stijenskog bloka odrona $[x, z]$, definirane jednačbama (5) i (6), određuju se integracijom prethodno definirane translacijske brzine u granicama od početka putanje u vremenu $t=0$ do promatranog trenutka t [2].

$$z = \int_0^t (-gt + V_{0z}) dt = -\frac{1}{2}gt^2 + V_{0z}t + z_0 \quad (5)$$

$$x = \int_0^t (V_{0x}) dt = V_{0x}t + x_0 \quad (6)$$

Jednačba putanje stijenskog bloka odrona (10) definirana je jednačbama koordinata $[x_0, z_0]$ (7) i (8), početnom brzinom V_0 te kutom što ga vektor te iste brzine zatvara sa osi apscisa α_0 (9) [2].

$$z = -\frac{1}{2}gt^2 + V_{0z}t \quad (7)$$

$$x = V_{0x}t \quad ili \quad t = \frac{x}{V_{0x}} \quad (8)$$

$$V_{0x} = V_0 \cos \alpha_0 \quad (9)$$

$$z = -\frac{g}{2} \left(\frac{x}{V_0 \cos \alpha_0} \right)^2 + x \tan \alpha_0 \quad (10)$$

Putanja odrona je parabola, a segment kosine se može zapisati jednačbom pravca gradijenta nagiba K ($z=K \cdot x$). Točka sjecišta putanje odrona i definiranog segmenta kosine određuje se izjednačavanjem jednačbi istih (parabola – pravac). Ujedno točka presjeka predstavlja kraj putanje, odnosno sljedeću točku udara. Poznavanjem početne i krajnje točke putanje poznata je i njezina duljina [5]. Da bi putanja bila definirana u potpunosti potrebno je još odredit njezinu visinu. Visina putanje h u bilo kojem horizontalnom položaju (x) predstavlja razliku vertikalne kote (z) putanje i kosine. Izjednačavanjem derivacije jednačbe visine putanje h sa nulom određuje se horizontalan položaj (x) u kojem je visina putanje maksimalna. Uvrštavanjem dobivenog horizontalnog položaja (x) u jednačbu visine putanje h

dobije se vrijednost maksimalne visine putanje h_{\max} . Osim vertikalne visine h razlikuje se i normalna visina h' koja je okomita na kosinu i određuje se prema izrazu (11) [2].

$$h' = \frac{(V_0 \sin \theta_0)^2}{2g \cos \psi_s} \quad (11)$$

Kut θ_0 je kut što ga vektor početne brzine V_0 zatvara sa površinom kosine, te je kao takav sa kutom nagiba kosine ψ_s i kutom što ga vektor početne brzine V_0 zatvara sa osi apscisa α_0 u odnosu definiranom jednažbom (12) [2].

$$\theta_0 = (\psi_s + \alpha_0) \quad (12)$$

Prema analizama putanja odrona dokazano je da visina putanje ne utječe značajno na udaljenost između točaka udara, jer kako se visina putanje odnosno kut θ_0 povećava tako se brzina V_0 smanjuje [2].

Kada odron uključuje niz udara i putanja, kao što je slučaj kod kretanja mehanizmom kosog hitca tada se translacijska brzina određuje prema jednažbama (3) i (4). U takvom slučaju brzina će se smanjiti ako je energija izgubljena uslijed plastične deformacije kosine tijekom udara veća od energije stečene gravitacijskim ubrzanjem sljedeće putanje. Također smanjenju brzine odrona pospješit će smanjenje kuta nagiba kosine te povećanje svojstva apsorpcije energije prijelazom iz visokih stijenskih predjela u područje tla u podnožju kosine. Prema tome promjena brzine ovisi o visini pada, kutu nagiba te materijalu na površini kosine. Male brzine karakteristične su za kosine blagog nagiba te mekog materijala na površini kosine koji pri udaru apsorbira dobar dio energije. Odnosno, suprotno tome strme kosine i tvrdi materijal na površini kosine uzrokuje velike brzine [2].

Ukoliko se stijenski blok odrona niz kosinu kreće mehanizmom klizanja proračun putanje se provodi metodama granične ravnoteže koje uspoređuju relativne veličine aktivnih i otpornih sila. Razlika aktivne i otporne sile jednaka je neravnotežnoj sili ($m \cdot a$) koja uzrokuje promjenu brzine. Ako je aktivna sila veća od otporne sile doći će do ubrzanja, odnosno do pozitivne vrijednosti akceleracije koja se određuje prema jednažbi (13).

$$m \cdot a = (\text{aktivna sila} - \text{otporna sila}) = (m \cdot g \cdot \sin \psi_s - \mu' \cdot m \cdot g \cdot \cos \psi_s) \rightarrow$$

$$a = g \cdot \sin \psi_s \left(1 - \frac{\mu'}{\tan \psi_s}\right) \quad (13)$$

Akceleracija i prijeđeni put klizanja S definiraju jednadžbu brzine klizanja (14),

$$V = \sqrt{2aS} = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{\mu'}{\tan \psi_s}\right)} = \eta \sqrt{2gH} \quad (14)$$

gdje je prijeđeni put klizanja S raspisan u jednadžbi (15) kao funkcija kuta nagiba kosine ψ_s i vertikalne komponente puta klizanja H .

$$S = \frac{H}{\sin \psi_s} \quad (15)$$

Parametar η o kojem ovisi brzina klizanja predstavlja karakteristike kosine, odnosno kut nagiba ψ_s i efektivni kut trenja μ' koji ovisi o materijalu i hrapavosti površine kosine [2].

Kutna brzina se na terenu mjeri koristeći kamere velikih brzina ili ugrađenim akcelerometrima u sam nestabilan blok stijenske mase. Prema analizama pravilni blokovi, sferični i kubični, imaju veću kutnu brzinu od nepravilnih blokova. Uspostavljen je teorijski odnos (16) koji se može koristiti za procijenu vrijednosti kutne brzine ukoliko je poznata translacijska brzina i dimenzija bloka r [2].

$$\omega_0 = \frac{V_0}{r} \quad \text{odnosno} \quad r = \frac{\omega_0}{V_0} \quad (16)$$

Pri svakom uzastopnom udaru, kutna brzina može se povećati ili smanjiti, ovisno o uvjetima udara odnosno položaju bloka pri udaru o kosinu. Promjenu kutne brzine pri udaru generiraju normalna i tangencijalna translacijska brzina. U trenutku udara rotirajućeg bloka o kosinu, u točki udara se razvija otpor trenja te dolazi do elastoplastične kompresije materijala kosine što rezultira promjenom parametara restitucije [2].

Putanja bloka znatno ovisi o kutnoj brzini. Ako kutna brzina djeluje u smjeru kazaljke na satu tada će putanja biti niska, imat će manji kut restitucije θ_0 , veću

translacijsku brzinu bloka i suprotno. Kutna brzina se pri udaru može povećati ili smanjiti, no tijekom putanje ona je konstantna, nepromjenjiva [2].

3.2. Mehanika udara

Kod odrona teorija mehanike udara je malo pojednostavljena time što vrijedi da jedno tijelo – kosina miruje i ima beskonačnu masu. Tijekom udara na kontaktnom se području razvijaju normalne i posmične sile te posmični pomak duž kosine. Trajanje udara je vrlo kratko. Zbog čega se posmični pomaci bloka zanemaruju. Također, kako se tijekom putanje zanemaruje otpor zraka tako se tijekom udara zanemaruje utjecaj gravitacije. Razlog tome su vrlo male tjelesne sile s obzirom na sile generirane u točki udara. Kontaktno područje se poistovjećuje sa kratkom, krutom oprugom ili beskonačno malom deformabilnom česticom. Na tom području djeluju kompresija i trenje. Udar se s obzirom na djelovanje kompresije dijeli na dvije faze: faza kompresije i faza restitucije. Rezultat faze kompresije je deformacija kosine δ_c koja se u fazi restitucije, zahvaljujući elastičnim svojstvima materijala, djelomično oporavlja δ_f . [2].

Prema geometriji udara razlikuju se kolinearan i ekscentrični udar. Kolinearan udar je karakterističan za odron sfernog oblika tijela, no nije isključen ni kod odrona nepravilnog oblika tijela samo što je vrlo male vjerojatnosti. Linija koja spaja središte mase sfernog bloka i njegovu dodirnu točku sa kosinom leži na normali tangente oba tijela, bloka i kosine. U tim se geometrijskim uvjetima mogu razdvojiti utjecaji na normalan i tangencijalan smjer, tako da trenje i rotacija ne utječu na konačnu normalnu komponentu translacijske brzine v_{fN} . Kada linija koja spaja središte mase bloka i točku udara ne leži na normali kosine onda je to ekscentrični udar odrona nepravilnog oblika tijela. U tim je uvjetima nemoguće razdvojiti utjecaje normalnih i tangencijalnih sila [2].

U trenutku udara na kontaktnom se području javljaju suprotne kolinearne sile akcije i reakcije $-F$, F koje su paralelne smjeru brzine udara v_i . Reakcija kosine F mijenja impuls tijela odrona ($dp=F dt$). Djelovanje impulsa na kontaktnom području uzrokuje impulsni moment oko središta mase tijela odrona, koji uzrokuje promjenu rotacijske i translacijske brzine tijekom udarnog kontakta [2].

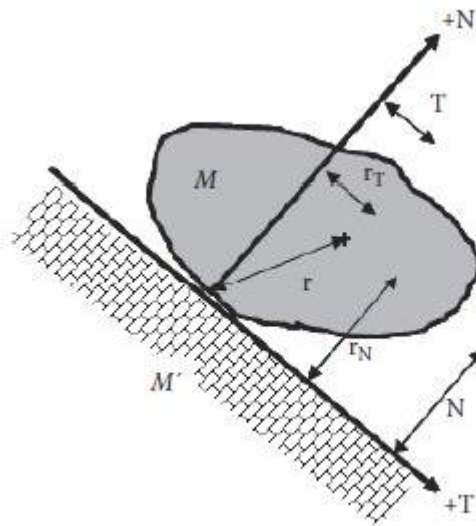
U ekscentričnim uvjetima koji prevladavaju na terenu, prikazanim na slici 4, komponente relativne translacijske brzine se proračunavaju prema izrazima danim u jednadžbama (17) i (18) [2].

$$v_N = v_{iN} + \frac{(\beta_3 + \mu \cdot \beta_2)}{m} \cdot p_N \quad (17)$$

$$v_T = v_{iT} - \frac{(\beta_2 + \mu \cdot \beta_1)}{m} \cdot p_N \quad (18)$$

gdje su β_1, β_2 i β_3 koeficijenti inercije: $\beta_1 = 1 + \frac{r_N^2}{k^2}$; $\beta_2 = \frac{r_N \cdot r_T}{k^2}$; $\beta_3 = 1 + \frac{r_T^2}{k^2}$

definirani normalnim i tangencijalnim krakom r_N i r_T te radijusom vrtnje k .



Slika 4: Ekscentrični uvjeti udara [2]

U kolinearnim uvjetima udara odrona sfernog oblika tijela tangencijalni krak ne postoji, odnosno jednak je nuli, a normalni krak jednak je radijusu tijela r . Pa jednadžbe komponenta relativne translacijske brzine poprimaju oblik raspisan u jednadžbama (19) i (20) [2].

$$v_N = v_{iN} + \frac{p_N}{m} \quad (19)$$

$$v_T = v_{iT} - \frac{(\mu \cdot \beta_1)}{m} \cdot p_N \quad (20)$$

Prijelaz iz faze kompresije u fazu restitucije definiran je promjenom normalne komponente translacijske brzine tijekom udarnog kontakta. Na početku udarnog kontakta normalna komponenta translacijske brzine ima negativnu vrijednost koja se tijekom kontakta u ovisnosti o promjeni impulsa kontinuirano povećava. Faza kompresije traje od početka udarnog kontakta do trenutka maksimalne kompresije kada je normalna translacijska brzina jednaka nuli ($v_N=0$), a prateći normalni impuls ima vrijednost p_{cN} . Kraj faze kompresije ujedno predstavlja početak faze restitucije koja traje do trenutka odvajanja bloka od kosine odnosno početka nove putanje. Blok će se odvojiti pri restitucijskim vrijednostima normalnog impulsa p_{fN} i normalne komponente translacijske brzine v_{fN} [2].

Osim sila akcije i reakcije, u točki udara na hrapavim površinama kosine javlja se i tangencijalna sila trenja. Djelovanja sile trenja na blok uzrokuje promjenu rotacijske i translacijske brzine. U mehanici stijena definirano je da koeficijent trenja μ smanjuje s povećanjem normalnog naprezanja zbog razbijanja neravnina hrapavih površina tijela. No u proračunu odrona koeficijent trenja je konstantan, promjena je zanemarena zbog kratkotrajnog udarnog kontakta i zanemarivih pomaka tijekom njega. Od početka kontakta do vrijednosti normalnog impulsa p_{sN} blok klizi brzinom klizanja definiranom jednadžbom (21) [2].

$$v_{Ts} = v_T + r \cdot \omega \quad (21)$$

Periferna brzina rotacije $r \cdot \omega$ kolinearna je sa relativnom tangencijalnom komponentom translacijske brzine v_T . Brzina klizanja ovisi i o veličini i o smjeru kutne brzine ω , dok je relativna tangencijalna komponenta translacijske brzine uvijek pozitivna pa je bitna samo veličina. Ukoliko je kutna brzina negativna, brzina klizanja tijekom kontakta bit će manja od tangencijalne translacijske brzine na početku kontakta i obrnuto. Blok prestaje kliziti kad se periferna brzina rotacije $r \cdot \omega$ i relativna tangencijalna komponenta translacijske brzine v_T izjednače te brzina klizanja bude jednaka nuli ($v_{Ts}=0$). Od tog trenutka do trenutka razdvajanja, blok se nastavlja gibati kotrljanjem bez promjene tangencijalne komponente translacijske brzine i rotacijske brzine. Kod potpuno glatkih kontakata ne javlja se sila trenja koji uzrokuje promjene tangencijalne komponente translacijske brzine i rotacijske brzine. Tijekom cijelog

takvog kontakta blok će se kotrljati. Blok klizi samo ukoliko vrijedi odnos normalnog i tangencijalnog impulsa (22) definiranog koeficijentom trenja μ [2].

$$p_T = -\mu \cdot p_N \quad (22)$$

Spomenute i definirane brzine su relativne odnosno definirane u području kontakta. Krajnje vrijednosti parametara definiranih u središtu mase tijela odrona sfernog oblika u trenutku odvajanja bloka od kosine proračunavaju se prema izrazima (23), (24), (25), (26) i (27).

$$\text{Translacijska brzina} \quad V_f = \sqrt{V_{fT}^2 + V_{fN}^2} \quad (23)$$

$$\text{Tangencijalna translacijska brzina} \quad V_{fT} = V_{iT} - \frac{(V_{iT} + r \cdot \omega_i)}{(1 + r^2/k^2)} \quad (24)$$

$$\text{Normalna translacijska brzina} \quad V_{fN} = -V_{iN} \cdot e_N \quad (25)$$

$$\text{Rotacijska brzina} \quad \omega_f = \omega_i - \frac{r}{k^2} \cdot \frac{(V_{iT} + r \cdot \omega_i)}{(1 + r^2/k^2)} \quad (26)$$

$$\text{Kut odvajanja} \quad \theta_f = \alpha \tan\left(\frac{V_{fN}}{V_{fT}}\right) \quad (27)$$

Parametri koji definiraju uvjete udara su translacijska V_i i rotacijska ω_i brzina te kut udara u odnosu na kosinu θ_i u trenutku udara. Karakteristike kosine su definirane normalnim koeficijentom restitucije e_N i koeficijentom trenja μ . Proračunati krajnji parametri udara ulazni su parametri proračuna sljedeće putanje. Iz analiza je dokazano da veća negativna kutna brzina ω_i na početku kontakta uzrokuje pliću putanju nakon kontakta. Prema tome blok će se od kosine odvojiti pod malim kutom θ_f većom translacijskom brzinom V_f . Pozitivna kutna brzina bloka ω_i uzrokuje putanju manje brzine V_f i veće visine, odnosno kuta θ_f [2].

3.3. Koeficijent restitucije

Koeficijent restitucije kvantificira promjenu brzine bloka tijekom udarnog kontakta sa kosinom. Kako tijekom udara dolazi do gubitka energije konačna brzina

udara uvijek će bit manja od početne. Smanjenje brzine bloka tijekom udarnog kontakta uzrokovat će uvjeti udara na kosini. U kolinearnim uvjetima udara normalni koeficijent restitucije povezan je sa kompresijom, a tangencijalni sa trenjem. Određuju se prema općoj formulaciji odnosa brzine na početku i kraju udarnog kontakta prikazanoj jednadžbom (28) za normalni i (29) za tangencijalni koeficijent restitucije [2].

$$e_N = -\frac{v_{fN}}{v_{iN}} \quad (28)$$

$$e_T = \frac{v_{fT}}{v_{iT}} \quad (29)$$

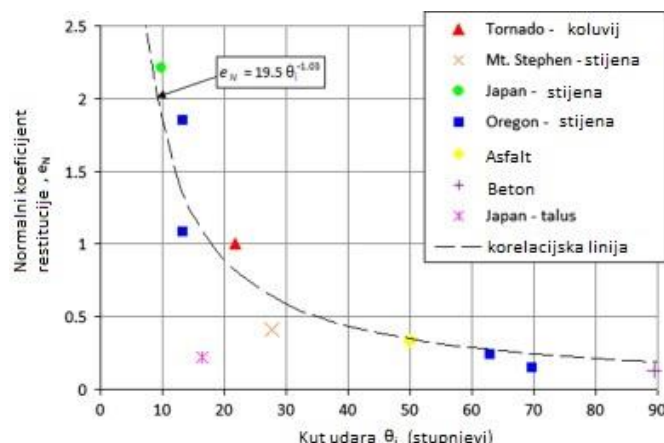
Veliki utjecaj na normalni koeficijent restitucije e_N ima kut udara θ_i . Udar pod većim kutom θ_i uzrokovat će veću kompresiju materijala kosine. Veća kompresija podrazumijeva da će normalna komponenta translacijska brzina udara V_{iN} biti veća. Rezultat istog bit će manji odskok i manja brzina sljedeće putanje V_{fN} . Odnos krajnje i početne normalne komponente translacijske brzine odnosno normalni koeficijent restitucije pri većem kutu udara imat će manju vrijednost nego pri manjem kutu udara. Što je kut udara manji, odnosno plići to će normalni koeficijent restitucije biti veći. Osim kuta udara na vrijednost normalnog koeficijenta restitucije još utječu i elastična svojstva materijala na površini kosine [2].

Normalni koeficijent restitucije za udar pod vrlo plitkim kutom ($\theta_i < 15^\circ$) bit će veći od jedan. Uzrok tome nije stvaranje energije tijekom udara već geometrija udara. Utjecaj kuta udara θ_i na normalni koeficijent restitucije u kolinearnim uvjetima udara definiran je odnosom (30).

$$e_N = -\frac{\tan \theta_f}{\tan \theta_i} \cdot \left[1 - \frac{1}{(1 + r^2/k^2)} \cdot \left(1 + \frac{r \cdot \omega_i}{V_i \cdot \cos \theta_i} \right) \right] \quad (30)$$

Na terenu većinom prevladavaju ekscentrični uvjeti udara. Na temelju stvarnih vrijednosti θ_i i e_N dobivenih iz terenskih istraživanja odrona različitih materijala provedenih u Japanu, Kanadi i SAD-u dobivena je krivulja, prikazana na slici 5 i definirana jednadžbom (31), koja najbolje opisuje njihovu vezu [2].

$$e_N = 19 \cdot 5\theta_i^{-1.03} \quad (31)$$



Slika 5: Krivulja odnosa kuta udara i normalnog koeficijenta restitucije [2 - modificirano]

Tangencijalni koeficijent restitucije e_T sukladan je koeficijentu trenja μ . Koeficijent trenja μ funkcija je svojstva trenja materijala φ_r i hrapavosti i , definirana jednadžbom (32).

$$\mu = \tan \varphi = \tan(\varphi_r + i) \quad (32)$$

Tangencijalni i normalni koeficijent restitucije u negativnoj su korelaciji. Što je tangencijalni koeficijent restitucije veći to je normalni manji [2].

3.4. Energija odrona

Na samom izvoru odrona blok će imati maksimalnu potencijalnu energiju koja se određuje prema formuli (33) [2].

$$PE = m \cdot g \cdot h \quad (33)$$

Blok ima veliku energiju u visokim strmim predjelima kosine. Tijekom putanje bloka nizbrdo, proporcionalno smanjenju kote h opada potencijalna energija bloka. Potencijalna energija pretvara se u kinetičku energiju. Kinetička energija tijekom putanje raste kao rezultat gravitacijskog ubrzanja, dok tijekom udarnog kontakta opada kao rezultat utjecaja kompresije i trenja što se može i primjetiti na kinetičkoj energetskej liniji prikazanoj na slici 6. Također, u trenutku prvog udara blok će dobiti rotacijsku energiju kao rezultat sile trenja koja djeluje na blok u točki kontakta. Rotacijska energija bloka tijekom narednih putanja bit će konstantna, dok će se pri svakom sljedećem udaru smanjiti ili povećati ovisno o geometrijskim uvjetima udara. Kad se pri udaru sva energija rasprši blok se prestaje kretati [2].

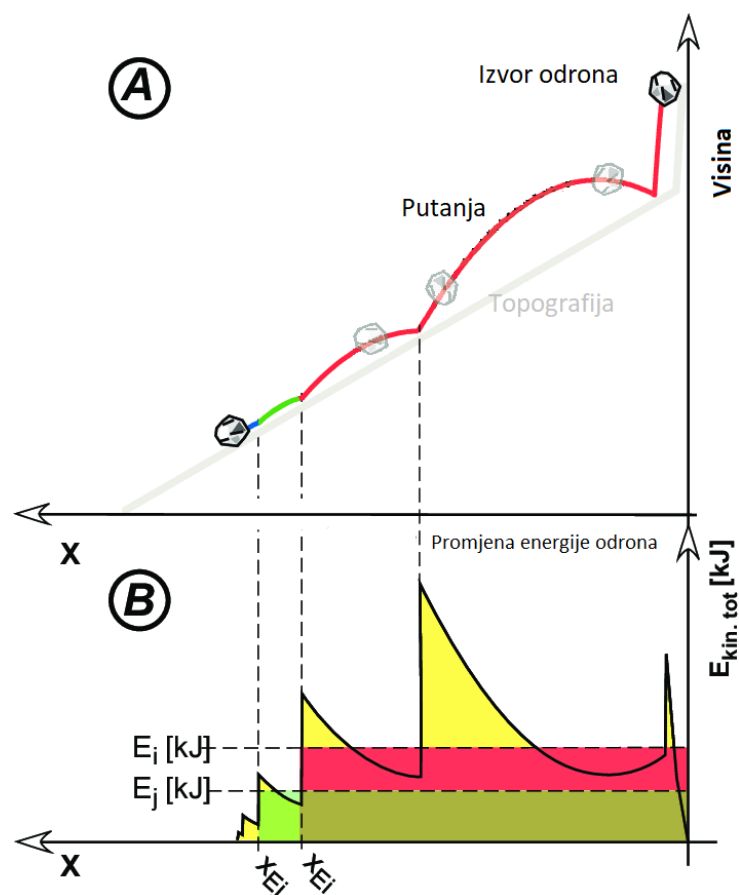
U fazi kompresije udara materijal bloka i kosine apsorbiraju kinetičku energiju E_{cN} , koja se jednim dijelom u fazi restitucije oporavlja ($E_{fN}-E_{cN}$). Oporavljena energija elastičnog napona pretvara se u kinetičku energiju koja "tijera" blok sa kosine. Komponente gubitka kinetičke energije udara određuje se prema formulama (34), (35), (36) i (37) [2]:

$$E_N = [E_N(p_{cN})] + [E_N(p_{fN}) - E_N(p_{cN})] \quad (34)$$

$$E_N(p_{cN}) = \frac{-m \cdot v_{iN}^2}{(\beta_3 + \mu \cdot \beta_2)} \quad (35)$$

$$E_N(p_{fN}) - E_N(p_{cN}) = v_{iN}(p_{fN} - p_{cN}) + \left[\frac{(\beta_3 + \mu \cdot \beta_2)}{2m} \right] (p_{fN} - p_{cN})^2 \quad (36)$$

$$E_T(p_{fN}) = -\frac{\mu \cdot p_{fN}}{2} \left(2v_{iT} - \frac{(\beta_2 + \mu \cdot \beta_1)}{m} p_{fN} \right) \quad (37)$$



Slika 6: Promjena kinetičke energije tijekom odrona [17 - modificirano]

Rotacijska energija E_r ovisi o momentu inercije I i kutne brzine ω . Moment inercije I je funkcija mase i radijusa rotacije ($I=m \cdot k^2$), te je kao takav konstantan. Promjena rotacijske energije će prema tome ovisiti o promjeni kutne brzine kako je prikazano jednadžbom (38).

$$\Delta E_r = -\frac{1}{2}I(\omega_i^2 - \omega_f^2) \quad (38)$$

Suma kinetičkih i rotacijskih energetske gubitaka je ukupni gubitak energije tijekom udarnog kontakta. Teorijska vrijednost gubitaka je uvijek manja od stvarnih gubitaka, a razlog tome je gubitak mase tijekom udara te nepotpuna definicija svojstva plastičnosti materijala. Odronjeni blok tijekom pada izgubi 80% svoje izvorne mase. Veći dio tog postotka mase se izgubi već u prvih nekoliko udara. Materijal kosine pri prvim udarima je često gola stijena ili materijal veće čvrstoće koji će uzrokovati veću fragmentaciju bloka nego talus ili tlo niže na kosini [2].

Energija je važan parametar kod pozicioniranja zaštitnih konstrukcija. Za odabir lokacije od velike su pomoći dijagrami energetske raspodjele. Omogućuju prepoznavanje niskoenergetskih mjesta. Optimalno mjesto postavljanja zaštite je u području blagog nagiba kosine. Neposredno nakon točke udara gdje gravitacijsko ubrzanje još nije uzrokovalo povećanje translacijske brzine a ujedno i kinetičke energije [2].

4. PASIVNA ZAŠTITA OD ODRONA

Zaštita od odrona može se klasificirati kao aktivna ili pasivna. Cilj aktivne zaštite je spriječiti pojavu nestabilnosti, dok pasivna zaštita ne sprječava pojavu nestabilnosti već ublažava njezine posljedice. Pasivnu zaštitu od odrona predstavljaju žičane mreže, galerije, jarci i barijere [7]. U ovom su poglavlju detaljnije opisane značajke navedenih tipova pasivne zaštite, njihove prednosti i nedostaci, lokacije njihove primjene i slično. Barijere su malo više naglašene i obrađene u zasebnom poglavlju zbog primjene u praktičnom dijelu rada.

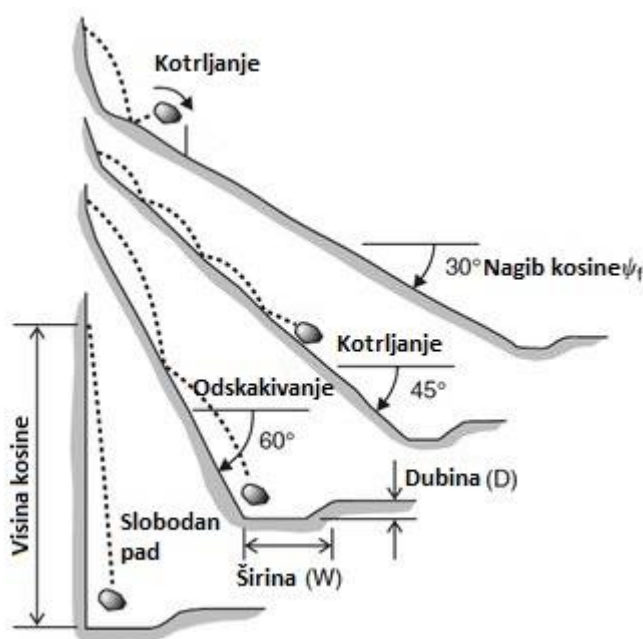
4.1. Jarak

Jarak se kao zaštita od odrona pretežito koristi u podnožju kosina uz prometnice. Cilj mu je zaustavljanje te zadržavanje odronjenog stijenskog materijala. Isplativa je mjera zaštite od odrona zbog niskih troškova gradnje i održavanja [2].

Jarak vrlo često dolazi u kombinaciji sa još jednim tipom pasivne zaštite, pretežito su to nasipi i žičane mreže. Postoje dvije vrste jaraka. Jarak velike nosivosti dimenzioniran je da može podnijeti teška teretna vozila koja će ukloniti odronjeni stijenski materijal nakupljen u njemu, a time i apsorbirati manji udio energije odrona. Slivni jarak od rastresitog materijala dimenzioniran je da apsorbira veći dio energije, te u sklopu barijere ublaži udarac u nju. Slivni jarak svojom širinom i karakteristikama materijala od kojeg je izveden utječe na učinkovitost barijere u kombinaciji s kojom se izvodi [8]. Dimenzije jarka definirane su širinom baze, nagibom i dubinom. Potrebne dimenzije jarka povezane su s visinom i kutom nagiba kosine. Veza dimenzija jarka i geometrije kosine prikazana je na slici 7 [2].

Sa slike 7 moguće je primijetiti da što je kut nagiba kosine manji time se i potrebne dimenzije jarka smanjuju. Također, potrebne dimenzije jarka su manje kad je visina kosine manja. S povećanjem visine kosine raste brzina i visina putanje odrona, što ujedno zahtjeva povećanje jarka. Ponašanje stijenskog bloka nakon udara u područje jaraka (slivno područje) definira visinu i oblik barijere duž vanjske strane jarka. Funkcija barijere na vanjskoj strani jarka je zadržavanje stijenskih blokova u njemu. Ponašanje stijenskog bloka ovisi o kutu udara θ_i i normalnom koeficijentu restitucije e_N . Male vrijednosti normalnog koeficijenta restitucije e_N , karakteristične

za strme udare ($\theta_i \cong 90^\circ$), uzrokovat će malu visinu putanje odskoka. U tom će slučaju niska barijera na vanjskoj strani jarka biti dovoljna za zadržavanje stijenskih blokova odrona. Poželjna je vertikalna barijera duž vanjske strane jarka zbog toga što se kod udara u nju blok odbija natrag u jarak. Kod udara u barijeru s kosim licem, blok se može prevrnut u štice područje. Također još jedna prednost vertikalne barijere je uža širina baze same barijere te potrebna širina jarka što zahtjeva manji prostor za izvedbu. Vertikalne barijere duž vanjske strane jarka mogu biti izvedene od gabiona, betonskih blokova ili armiranog tla, odnosno jednom riječju nasipi koji su opisani u poglavlju barijera [2].



Slika 7: Utjecaj geometrije kosine na dimenzije jarka [2 - modificirano]

4.2. Žičane mreže

Žičane mreže se koriste kod pretežito stabilnih stijena gdje dolazi do učestalih odrona malih dimenzija u rasponu od 0,01 do 1,5 m³. Razlikuju se sistemi prigušne viseće mreže i mreže postavljene po sistemu "zavjese". Oba sistema u podnožju kosine zahtijevaju izvedbu jarka za prihvat usmjerenih stijenskih blokova odrona [7].

4.2.1. Žičana mreža postavljena po sistemu "zavjese"

Žičana mreža postavljena po sistemu "zavjese", prikazana na slici 8, koristi se kad pri dnu kosine postoji raspoloživi prostor za prihvat odronjenih stijenskih

blokova. Na vrhu kosine mreža je ovješena na čelični kabel koji se proteže kroz nosače. Nosači mogu biti podignuti od tla kako bi kamenje koje se kotrlja po blažem nagibu iznad litice kosine također završilo u mreži [2]. Težina i fleksibilnost same mreže omogućava da visi uz samo lice kosine čime obuzdaje padajuće kamenje ograničavajući im brzinu i udar te usmjeravajući ih u slivno područje – jarak [7].



Slika 8: Žičana mreža postavljena po sistemu "zavjese"[9 - modificirano]

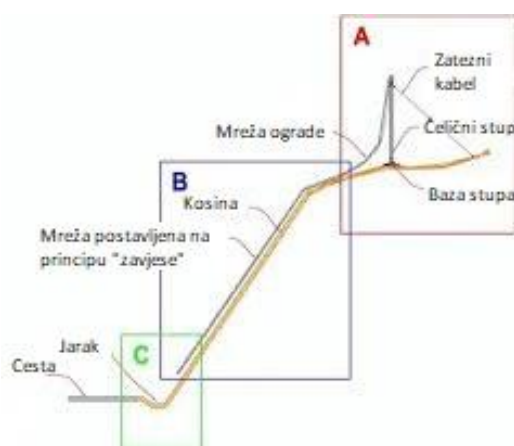
Kako se mreža na lokaciju doprema u rolama, mreža može poprimiti zakrivljeni oblik. Zakrivljeni oblik mreže ima tendenciju da visi na nekoj udaljenosti od lica kosine. Ta udaljenost rezultira ograničenim zadržavanjem odronjenog stijenskog materijala. Prema tome potrebno je izravnati krivulju odmotavanjem mreže u suprotnom smjeru od zarolanog [2]. Na dnu kosine mreža je otvorena i završava iznad razine slivnog područja kako se padajuće kamenje ne bi nakupljalo na donjem rubu mreže te ju tako oštetilo svojom težinom. Moguće je postavljanje sidara duž kosine kako bi ograničila pomak mreže ukoliko to zahtjeva geometrija same kosine [9]. Ovješena mreža bez dodatnih ojačanja može zadržati odron maksimalne veličine od 0.5 do 1.0 m³. Prikladne su mreže sa dvostrukim zavojima žice na svakom spoju koje se u slučaju presjeka žice neće raspetljati ili mreže od žice velike čvrstoće otporne na savijanje. Čvrstoća mreže može se povećati uplitanjem kabela od čelične žice na razmaku od oko 4 do 20 puta većem od razmaka žice mreže. Primjenjuju se mreže različitih otvora, promjera žice od 2 do 4 mm. Ojačane mreže u kombinaciji sa nosačima za teške uvjete primjenjuju se na vrlo strmim kosinama gdje je sama mreža veliko opterećenje i gdje su velike dimenzije potencijalnih odrona. Ovisno o projektnom vijeku trajanja zaštite, intenzitetu oborina i blizini mora ili izvora kiselih industrijskih emisija u zraku treba uzeti u obzir potrebnu otpornost čelika na

koroziju. Mreže su zbog toga pretežito pocinčane i svojstva su im prilagođena uvjetima na lokaciji [2].

4.2.2. Prigušne mreže

Prigušne mreže kombinacija je konstrukcije ograde i žičane mreže postavljene po sistemu zavjese. Mreža je pričvršćena na uzdužne i poprečne kabele koji su pričvršćeni na niz stupova duž padine. Stupovi su kao i u konstrukciji ograde poduprti poprečnim i uzdužnim zateznim kabelima, koji ih pridržavaju u projektiranom položaju, opremljenim elementima za kočenje. Poprečni potporni kabeli mreže ovješeni su na stupove i u razini jarka usidreni u stijenu. Time je spriječen pomak mreže pri udarnom opterećenju u štice područje. Preusmjereni stijenski blokovi padaju u slivno područje gdje ih se s lakoćom uklanja [10]. Sam opis konstrukcije prigušne mreže daje uvid sličnosti sa ogradom i žičanom mrežom postavljene po sistemu "zavjese" koju je također moguće primijetiti na slici 9.

Prigušne mreže apsorbiraju dio energije odrona u području konstrukcije ograde te ga sistemom "zavjese" usmjerava u zaustavno područje gdje se većinom nalazi druga vrsta pasivne zaštite, primjerice jarak, koja apsorbira preostali dio energije [10]. Tipovi prigušnih mreža nikad nisu bili ispitivani u kontroliranim uvjetima kako bi se ustanovila maksimalna energija koju mogu podnijeti. No sigurno je da mogu podnijeti energiju udara do 1 000 kJ bez oštećenja [2].



Slika 9: Prigušna mreža [10 - modificirano]

4.3. Galerije

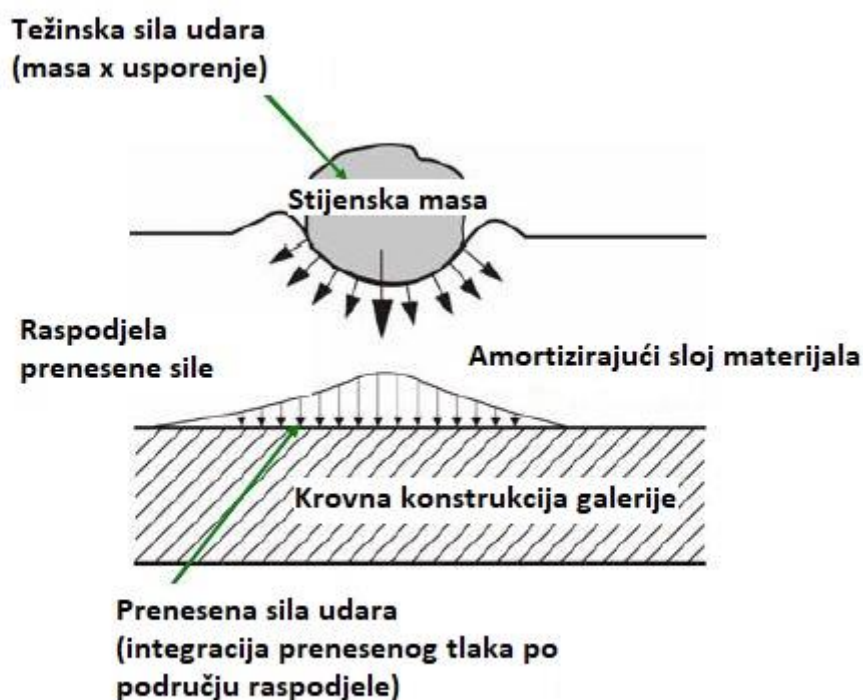
Galerije su razvijene kako bi pružile vrlo pouzdanu zaštitu na glavnim prometnim pravcima i na portalima tunela. Prednost galerija je u tome što mogu podnijeti udarno opterećenje veće od većine vrsta ograda i žičanih mreža. Također imaju dug uslužni period i održavanje im nije zahtjevno. Glavni nedostatak ovakve zaštite je visoka cijena izvedbe [6].

4.3.1. Armiranobetonske galerije

Galerije se najčešće izvode od predgotovljenog armiranog betona. Armiranobetonske galerije se pretežno koriste na lokacijama izloženim učestalim i opasnim visokoenergetskim odronima [6]. Bitne značajke armiranobetonskih galerija su fleksibilnost strukture i karakteristike amortizacijskog sloja na krovu [11]. Krov većine galerija je gotovo horizontalan, s nagibom od oko 5° zbog drenaže. Horizontalni krov je pogodan zbog održavanju jednolikog sloja amortizirajućeg materijala. Ispod strmih kosina gdje su učestali udari pri vrlo strmom kutu ($\theta_i \cong 90^\circ$), galerije su pretežito projektirane da apsorbiraju ukupnu energiju udara. Stijenski blokovi će na kosinama malog nagiba težiti kosom udaru čime će galerije biti namijenjena njihovom preusmjeravanju. Kosi krov galerije se izbjegava zbog većih raspona krovne konstrukcije. No, što je kut udara manji, manje je i udarno opterećenje. Izvedbom galerije sa kosim krovom dodatno se smanjuje kut udara i udarno opterećenje kojem je izložena. Malo udarno opterećenje omogućuje izvedbu od laganije konstrukcije što može biti isplativo [2].

Udarno opterećenje armiranobetonske galerije generira dvije sile – težinsku silu udara i prenesenu silu udara. Težinska sila udara generirana je na površini amortizirajućeg materijala [11]. Definira ju umnožak mase i maksimalnog usporenja stijenskog bloka uzrokovanog deformacijom sloja amortizirajućeg materijala. Prenesena sila udara je sila koja se kroz amortizirajući materijal prenosi na krov galerije. Određuje se integracijom prenesenog tlaka po površini na kojoj djeluje [2]. Amortizacijski materijal na krovu galerije ima funkciju zaštite, apsorpcije dijela udarne energije i raspodjela sile udara s manje na veću površinu prikazana na slici 10. Poželjno je da je jeftin, dugotrajan, male gustoće čime ne opterećuje značajno

konstrukciju galerije, te da se odupire silama udara bez oštećenja. Među dobrim amortizirajućim materijalima mogu se istaknuti pijesak, stiropor i staklene granule. Najčešće se, usprkos svojoj velikoj gustoći (20 kN/m^3), koristi pijesak. Kad je debljina sloja amortizirajućeg materijala jednaka promjeru odronjenog stijenskog bloka tad je on najučinkovitiji. Tada dolazi do maksimalne apsorpcije energije. Svaka dodatna debljina amortizirajućeg sloja samo je dodatno opterećenje na konstrukciju galerije bez učinka apsorpcije energije [11].



Slika 10: Prijenos sile kroz amortizirajući sloj [11 - modificirano]

Znatno raspršene vrijednosti prenesene sile dobivene ispitivanjem nisu omogućile definiranje odnosa sa težinskom silom udara. Stoga su u svrhu projektiranja galerija razvijene jednadžbe za statičnu silu (39) koja je ekvivalentna dinamičkom opterećenju. Razlikuju se Japanska i Švicarska jednadžba. Jednadžba razvijena u Japanu temelji se na Hertzian-ovoj teoriji udara između elastičnih sfera, dok se jednadžba razvijena u Švicarskoj temelji na rezultatima ispitivanja. Iako se Japanska jednadžba temelji na teoretskom odnosu, konzervativnija je od Švicarske koja se temelji na stvarnim vrijednostima [2].

$$F = 0.02(m \cdot g)^{0.67} \lambda^{0.4} H^{0.6} \left(\frac{T}{D}\right)^{-0.58} \quad (39)$$

gdje je:

m – masa stijenskog bloka

H – visina pada

D – promjer stijenskog bloka

T – debljina obloge

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \text{Lame – ov parametar amortizacijskog materijala}$$

E – modul elastičnosti

ν – Poissonov koeficijent

Iz stvarnih vrijednosti prenesene sile dobivenih ispitivanjem ustanovljeno je da prenesena sila udara na krutim strukturama armiranobetonskih galerija može biti od 1.5 do 2 puta veća od težinske sile udara. Strukturne karakteristike galerija imaju značajan utjecaj na veličinu prenesene sile udara. Što je struktura fleksibilnija, prenesena sila udara je manja. Pogodnija bi u tom pogledu bila čelična galerija, no rijetko se koristi zbog velikih troškova održavanja i kraćeg uslužnog perioda. Kako bi prenesena sila na armiranobetonsku galeriju bila manja u nju se ugrađuju fleksibilne komponente [2].

Konstrukciju armiranobetonske galerije uobičajeno čine betonski potporni zid izveden na licu mjesta, predgotovljeni montažni stupovi i krovne grede. Betonski potporni zid se nalazi uz lice kosine s funkcijom podupiranja krovnih greda i zadržavanja ispune. Prostor između kosine i potpornog zida ispunjen je šljunkom koji galeriji pruža zaštitu od odrona s lica kosine uz samu konstrukciju. Potporni je zid zateznim kabelom usidrenim u kosinu dodatno poduprt kako bi pružio otpornost opterećenju ispune i pritisku vode koji se razvija iza zida. Krovne grede su predgotovljene montažne konstrukcije poprečno postavljene s obzirom na trasu prometnih pravaca. Krovne grede i potporni zid fleksibilno su povezani injektiranjem čelične armature u rupe betona s neoprenskom gumenom podlogom između njih.

Fleksibilnost krovnih greda se postiže tako što su jedina posmična veza među njima naknadno zategnuti čelični kabeli što prolaze kanalima u gredama paralelnim sa trasom prometnog pravca. Takvom se vezom postiže i fleksibilnost i distribucija djelovanja opterećenja s manje na veću površinu. S nizbrdne strane galerije krovne grede poduprte su predgotovljenim montažnim stupovima. Spoj stupa i grede izvodi se krutom vezom uspostavljenom prednapregnutim kabelom stupa koji prolazi kroz rupu u gredi iznad koje je učvršćen. Stupovi se postavljaju na uzdužnom razmaku koji odgovara širini krovnih greda. Zbog povećanja fleksibilnosti u stupove se ugrađuju šarke pričvršćene na armaturu stupa. Fleksibilnost šarki pruža sloj sintetičke gume ugrađen u beton [11].

Da bi galerija izdržala veliko opterećenje potrebna je izvedba temelja velikog kapaciteta, posebno temelja stupova na nizbrdnoj strani galerije. Kosina nizbrdo može biti nestabilan što će zahtijevati duboke temelje ili temelje poduprte potpornim stupovima koji sežu do čvrste temeljne stijene. Konzolna struktura je alternativa koja se izvodi u prisutnosti loših uvjeta temeljenja stupova na nizbrdnoj strani galerije. Izvedbom konzolne galerije postiže se ušteda troškova, uklanjanjem stupova i temelja nizbrdne strane galerije. Projektiranje temelja i stupova u lošim uvjetima rješenje su sa skupljim konačnim ishodom od konzolne galerije. Konzolne galerije zahtijevaju izvedbu temelja i sidara i/ili potporne konstrukcije uz lice kosine u stijeni velike čvrstoće. Struktura konzolne galerije koja apsorbira svu udarnu energiju i zadržava odronjene stijenske blokove se izvodi kao povišeni jarak sa zaštitnim slojem pijeska na betonu [2].

4.3.2. Galerije od žičanih mreža

Galerije od žičane mreže oslonjene na stupove i zatezne čelične kabele su tek nedavno razvijene, točnije 2013. godine. Dokaz je to koji potvrđuje kako se u današnje vrijeme teži korištenju fleksibilnih struktura zaštite od odrona. Galerije od žičanih mreža alternativa su armiranobetonskim galerijama s mnogobrojnim prednostima. Neke od prednosti su manja težina koja olakšava izvedbu, manja cijena te odsutnost visoko opterećenih temelja. Funkcioniraju većinom kao prigušne strukture koje preusmjeravaju odronjene stijenske blokove, smanjuju im brzinu te apsorbira samo

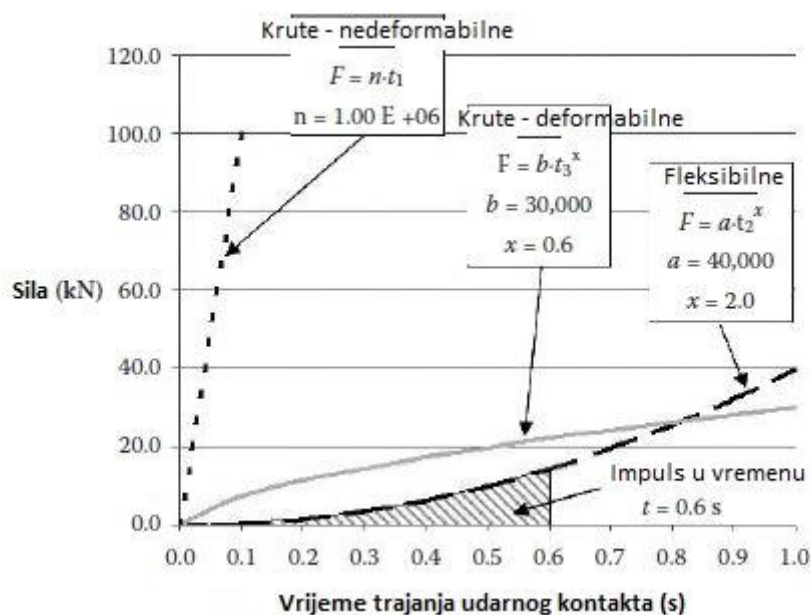
dio ukupne energije. Izvedba galerije sa nagibom krova približnom nagibu kosine rezultirat će udarom stijenskog bloka pri manjem kutu i opterećenju [2].

Bitne značajke pri projektiranju galerija od žičane mreže su fleksibilnost konstrukcije, granica zaštitnog profila, održavanje, temeljenje i sidrenje te uvjeti izvedbe. Žičana mreža koja predstavlja krov galerije i kočioni elementi koji se nalaze na nosivim zateznim kabelima definiraju fleksibilnu strukturu galerije koja svojom deformacijom apsorbira energiju udara. Dimenzije galerije od žičane mreže i visinu njezina pozicioniranja definira granica šticenog profila. Deformacija fleksibilnih komponenata galerije pri opterećenju ne smije uzrokovati ulazak otklonjene žičane mreže u profil kojim prometuju vozila koja se štite od odrona. Kako bi se održavanje svelo na minimum poželjno je izvesti galeriju sa jednolikim kosim nagibom krova od 30° do 40°, tako da se stijenski blokovi ne nakupljaju na mreži. Lagane konstrukcije kao što su ove nemaju potrebe za temeljima velikog kapaciteta. Temelji stupova i zateznih kabela pretežito su grupa stijenskih sidara promjera od 25 do 35 mm. Sve stavke dimenzioniranja moraju pratiti mogućnost izvedbe u vidu dostupnosti radne mehanizacije i sigurnosti radnika [2].

5. BARIJERE

Barijere su pasivna zaštita od odrona koja ublažava učinak kretanja odronjenih stijenskih blokova niz kosinu presretanjem njihove putanje te ujedno njihovim zaustavljanjem ili preusmjerenjem u područje zaustavljanja. Drugim riječima barijere kontroliraju dinamičke učinke pokrenutih stijenskih blokova [7].

Struktura barijere prema kriteriju krutost može biti kruta-nedeformabilna, kruta-deformabilna i fleksibilna. U konstrukciji barijere se tijekom udarnog kontakta s blokom razvija sila uz pomoć koje se može kvantificirati energetska kapacitet same barijere. Pa tako krute nedeformabilne barijere imaju najmanji energetska kapacitet, a krute deformabilne najveći. Krute nedeformabilne strukture poput betonskog zida nisu učinkovita zaštita od odrona. Razlog leži u brzom povećanju sile generirane u strukturi što uzrokuje vrlo kratko trajanje udarnog kontakta. Udarni kontakt traje dok se ne apsorbira udarni impuls koji je funkcija sile u vremenu. Ujedno, kruta nedeformabilna konstrukcija podložna je slomu koji se javlja pri sili jednakoj čvrstoći betona. Za razliku od krutih nedeformabilnih, fleksibilne i krute deformabilne strukture imaju značajnije trajanje udarnog kontakta. Dulje trajanje kontakta predstavlja spori rast sile tijekom kontakta. Krute deformabilne strukture poput nasipa i krutih žičanih ograda počinju apsorbirati energiju udara u trenutku početka udarnog kontakta, dok se fleksibilne strukture prije početka apsorpiranja energije udara značajno deformiraju. Na početku udarnog kontakta se u fleksibilnoj konstrukciji javlja vrlo mala sila koja tek nakon značajne deformacije počinje rasti proporcionalno daljnjem rastu deformacije. U krutoj deformabilnoj strukturi sila raste proporcionalno deformaciji od samog početka udarnog kontakta. Na slici 11 prikazan je odnos trajanja udarnog kontakta i sile generirane u spomenutim strukturama. Poželjno je izvesti barijeru u kojoj će sile generirane udarom biti minimalne [2].



Slika 11: Odnos trajanja udarnog kontakta i sile generirane u krutim nedefomabilnim, krutim deformabilnim i fleksibilnim strukturama [2 - modificirano]

Poželjne minimalne sile u barijeri se najlakše postiže prigušnim strukturama sa velikom energetsom učinkovitošću. Stoga važno je napomenuti da se razlikuju dva tipa struktura barijera prema načinu apsorpcije energije i zaustavljanja – zaustavna i prigušna. Zaustavna struktura apsorbira svu energiju udara i time zaustavlja stijenski blok. Prigušna struktura apsorbira samo dio energije udara i preusmjerava stijenski blok. Ne apsorbirana energija se može izraziti kao učinkovitost konstrukcije te se određuje formulom (40) [2].

$$E_e = \frac{\text{Restitucijska energija}, E_f}{\text{Energija udara}, E_i} \cdot 100\% \quad (40)$$

Barijera koja apsorbira svu udarnu energiju ima učinkovitost 0%. S povećanjem energetske učinkovitosti konstrukcije povećava se i proračunsko udarno opterećenje. Prednost korištenja prigušne strukture barijere je u tome što se u njoj javlja manja sila. A sila je manja što je učinkovitost konstrukcije barijere veća. Prednost korištenja visoko učinkovite prigušne barijere je u tome što se za istu energiju udara može izvesti od lakših materijala nego što bi se koristilo za izvedbu barijere nulte učinkovitosti. Zaustavne ili barijere nulte učinkovitosti zahtijevaju čišćenje odronjenog materijala nakupljenog iza nje koji umanjuje njezinu funkciju. Prigušne

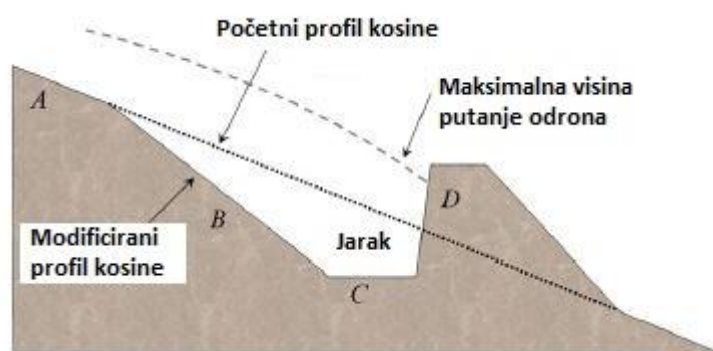
strukture barijere preusmjeravanjem stijenskog bloka istovremeno čisti prostor iza nje [2].

Ponašanje rotacijskog stijenskog bloka pri udaru u barijeru može se približno modelirati koristeći principe mehanike udara razrađenih u poglavlju 3.2. ($V_f = f(V_{fT}, V_{fN}), \omega_f, \theta_f$). Iz toga je poznato da će pri udaru stijenskog bloka u barijeru doći do promjene njegove brzine i energije. Kakva će biti promjena tih parametara prvenstveno ovisi o kutu udara. Brzina stijenskog bloka tijekom udarnog kontakta postepeno će se smanjivati sve do vrijednosti nula, koju će poprimiti u točki maksimalne deformacije. Naime, u tom će se trenutku stijenski blok zaustaviti. Ukoliko se stijenski blok zaustavi u vremenu trajanja kontakta s barijerom znači da je barijera apsorbirala svu njegovu udarnu energiju. U protivnom, kad se brzina smanji na restitucijsku vrijednost V_f pri kojoj se odbija od barijere, i tijekom cijelog udarnog kontakta ne poprimi vrijednost nula, barijera apsorbira samo dio udarne energije. Razlika između brzine udara i restitucijske brzine predstavlja dio energije udara koji je apsorbirala barijera. Barijera apsorbira samo dio udarne energije pri kosom kutu udara ($\theta_i < 90^\circ$), dok pri vrlo strmom kutu udara ($\theta_i \approx 90^\circ$) apsorbira svu udarnu energiju [2].

5.1. Nasipi – krute deformabilne barijere

Nasipi su masivne barijere, visine od 3 do 25 metara i dužine do nekoliko stotina metara. Prikladna su zaštita od odrona pri očekivanom visoko energetsom udaru od nekoliko stotina kilodžula (kJ) do nekoliko desetaka megadžula (MJ) [8]. Koriste se za zaštitu cesta, naseljenih područja, kamenoloma i drugih rizičnih objekata. Postoji široka paleta nasipa koji se razlikuju po građevinskom materijalu od kojeg su izvedeni. Prvi nasipi izvodili su se od zbijenog prirodnog tla. Najčešći presjek takvih nasipa bio je trapeznog oblika. No kako su takvi nasipi bili malog energetske kapaciteta tražila su se alternativna rješenja. Danas najčešće strukture nasipa primjenjive u čitavom svijetu izvedene su od armiranog tla. Nasipi se još izvode od gabiona, betonskih blokova i kombinacijom svega navedenog. Barijere od gabiona i barijere od betonskih blokova malog su energetske kapaciteta, no vrlo se često koriste kao obložni element u kombinaciji sa armiranim tlom [3].

Osim velikog energetske kapaciteta u prednosti nasipa ubrajaju se i niski troškovi održavanja te smanjeni vizualni utjecaj. Izgradnja nasipa zahtijeva veliki prostor te pristupačni prilaz za teška vozila. Najčešće lokacije pozicioniranja nalaze se pri kraju tranzitne zone odnosno blizu zone zaustavljanja. Nasipi nisu prikladni na strmim kosinama. Uz nasipe se najčešće vežu i jarci koji prikupljaju blokove odrona zaustavljenih ili preusmjerenih od strane nasipa. Često se, kako je shematski predočeno na slici 12, jarak izvodi u zasjeku kosine uzbrdo konstrukcije nasipa, a materijal iz zasjeka se obično koristi u izvedbi nasipa [8].



Slika 12: Nasip i jarak [8 - modificirano]

Sastavni dio projektiranja nasipa je provjera njegove stabilnosti na klizanje, prevrtanje i probijanje [2].

Stabilnost na klizanje i prevrtanje provodi se metodom granične ravnoteže utvrđivanjem faktora sigurnosti. Faktor sigurnosti (41) definiran je odnosom sila otpora i sila pomaka koje djeluju na nasip u trenutku udara prikazanim na slici 13.

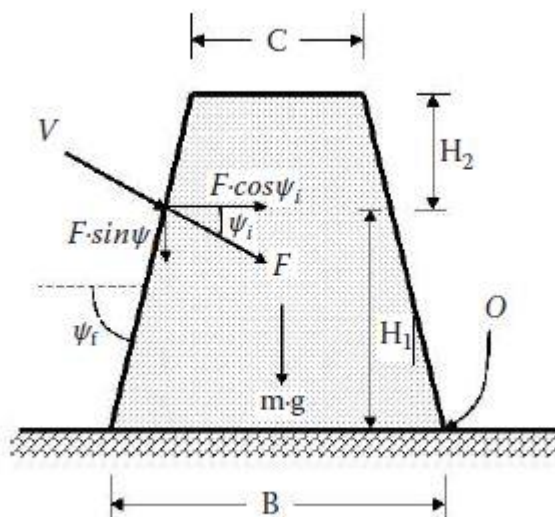
$$FS = \frac{\text{sila otpora}}{\text{sila pomaka}} \quad (41)$$

Silu otpora predstavlja posmična čvrstoća temelja ili moment otpora prevrtanju. Dok silu pomaka predstavlja statična udarna sila ekvivalentna dinamičkom udarnom opterećenju. Sila je definirana veličinom F , kutom udara ψ_i i visinom udara od baze temelja H_1 . Veličina statične sile udara računa se prema jednadžbi (39) razvijenoj u Japanu definiranoj na teoriji udara između elastičnih sfera. Jednadžba je definirana u svrhu proračuna armiranobetonskih galerija te je definirana i detaljnije opisana u poglavlju 4.3.1., no pokazala se je mjerodavnom i pri proračunu stabilnosti nasipa [2].

Sila se na konstrukciju galerije prenosi kroz amortizirajući materijal, a na tijelo nasipa kroz elemente obloge [2].

Stabilnost nasipa na klizanje iskazuje se faktorom sigurnosti definiranim jednadžbom (42). Nasip je stabilan ukoliko je faktor sigurnosti veći od 1.5. Odnosno posmična čvrstoća duž temelja minimalno 1.5 puta veća od udarne sile stijenskog bloka [1].

Faktor sigurnosti na klizanje:
$$FS = \frac{(m \cdot g + F \cdot \sin \psi_i) \tan \phi}{F \cdot \cos \psi_i} \quad (42)$$



Slika 13: Udarno opterećenje nasipa [2]

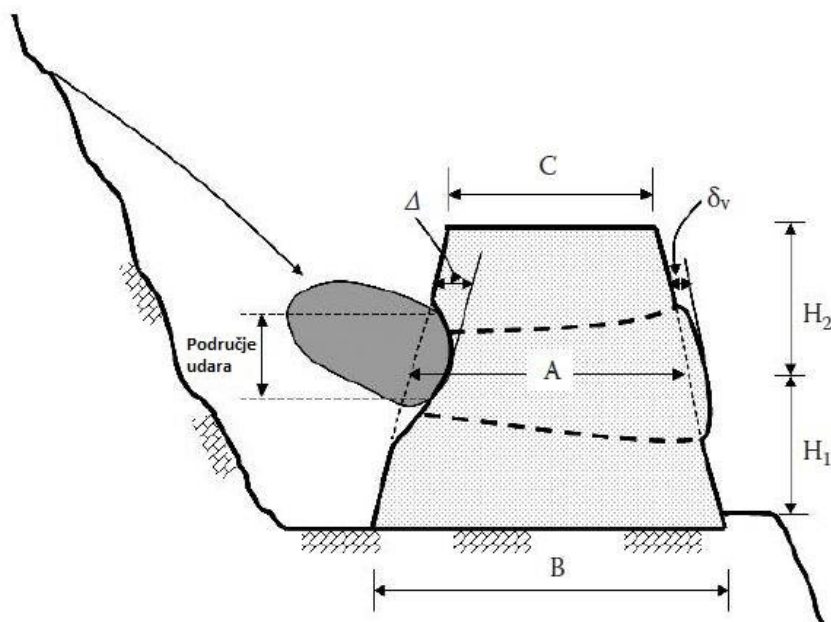
Stabilnost nasipa na prevrtanje može se ispitati računanjem momenta oko točke O na unutarnjoj strani temelja barijere. Nasip je stabilan na prevrtanje kad je zadovoljena nejednakost (43) [2].

$$\left[m \cdot g \frac{B}{2} + F \cdot \sin \psi_i \left(B - \frac{H_1}{\tan \psi_f} \right) \right] \geq [F \cdot \cos \psi_i \cdot H_i] \quad (43)$$

Udar u nasip stvara prodor s vanjske strane nasipa dubine δ_m , te posmični pomak duž dvije horizontalne površine unutar tijela nasipa. Ukoliko je udarna sila dovoljno velika posmični će se pomak dogoditi duž cijele širine nasipa uz pomak na unutarnjoj strani nasipa dubine δ_v . Pomak s vanjske strane nasipa tada će bit jednak sumi prodora stijenskog bloka na vanjskoj strani nasipa δ_m i pomaka na unutarnjoj

strani nasipa δ_v (44) [2]. Na slici 14 prikazani su pomaci na nasipu uzrokovani prodorom bloka.

$$\Delta = \delta_m + \delta_v \quad (44)$$



Slika 14: Pomaci uslijed proboja nasipa [2 - modificirano]

Dubina prodora s vanjske strane nasipa δ_m definirana je udarnom energijom E_i , površinom otiska udara na licu nasipa, parametrom η koji je funkcija oblika bloka ($\eta=1.0$ za kocku, $\eta=1.2$ za kuglu), parametrom χ koji je funkcija armature i udjela energije raspršenog stvaranjem proboja p_c (45) [2].

$$\delta_m = \frac{\chi \cdot E_i \cdot p_c}{(\text{površina otiska udara na licu barijere})^\eta} \quad (45)$$

gdje je:

$$E_i = \frac{\text{volumen proboja}}{k \cdot p_c}$$

k – koeficijent korelacije između volumena proboja i energije koja se razvija za njegovo stvaranje; ovisi o materijalu ojačanja te o vrsti i zbijenosti materijala ispune

Razlikuju se dva mehanizma pomoću kojih nasip apsorbira udarnu energiju. Veći dio energije od 80 do 85% se apsorbira plastičnom deformacijom materijala

ispune. Dok se posmičnim pomakom i otporom na smicanje unutar tijela nasipa apsorbira 15 do 20% energije. Prema tome je udio energije raspršen stvaranjem proboja $p_c \approx 0.85$, a udio energije raspršen uslijed trenja unutar ojačane ispune $s_c \approx 0.15$ [2].

Pomak na unutarnjoj strani nasipa definiran je energijom udara E_i , udjelom energije koja se rasprši uslijed trenja unutar ojačane ispune s_c i silom trenja koja se stvara između zbijenog materijala i armature (46).

$$\delta_v = \frac{E_i \cdot s_c}{\text{silna trenja}} \quad (46)$$

Definirani pomaci δ_v i Δ u međusobnom su približnom odnosu (47).

$$\frac{\delta_v}{\Delta} \approx 0.6 \text{ do } 0.8 \quad (47)$$

Da bi nasip bio stabilan na probijanje, pomaci δ_v i Δ moraju biti u dopuštenim granicama definiranim u izrazu (48).

$$\Delta \neq 0.5 \text{ do } 0.7 \text{ m}; \quad \delta_v \neq 0.3 \text{ do } 0.4 \text{ m} \quad (48)$$

Dimenzije nasipa da bi zadovoljile stabilnost na probijanje, odnosno granice pomaka definirane izrazom (48) moraju biti u odnosu (49) sa ukupnim pomacima.

$$A \leq 5\Delta; \quad C \geq 2\Delta \quad (49)$$

A – širina nasipa na mjestu udara ($A_{\min} = 3.5$ metara)

C – širina krune nasipa ($C_{\min} = 0.8$ metara za nasip od zbijenog tla)

Nakon određene širine krune nasipa i širine nasipa u točki udara na visini H_1 pomoću geometrije nasipa i kuta nagiba lica određuju se ukupna visina nasipa i širina temelja nasipa [2].

5.1.1. Barijere od gabiona

Gabioni su žičane košare ispunjene rastresitim, uglatim fragmentima stijene veličine u rasponu od 100 do 150 mm. Važno je da su fragmenti stijene uglati jer se pri udaru između njih razvija velika otpornost na smicanje, što ne bi bio slučaj i kod oblih fragmenata stijene. Također značajan utjecaj ima i ručno slaganje fragmenata stijene. Ručnim slaganjem postiže se veća zbijenost, odnosno manje šupljina i veća gustoća. To doprinosi povećanju otpora na smicanje [2].

Barijere od gabiona vrlo su učinkovite jer mogu apsorbirati udarnu energiju fleksibilnom žičanom košarom te preslagivanjem fragmenata stijene unutar nje. Ujedno su i estetski prihvatljivije zbog omogućenog rasta vegetacije na površini konstrukcije gabiona. Vegetacija nema štetnog utjecaja na konstrukciju i funkciju gabiona. Prednosti upotrebe gabiona očituje se u tome što se mogu izvesti od lokalno dostupnog materijala stijene na licu mjesta. Potrebna je samo isporuka žičane košare koja se radi lakšeg rukovanja transportira rasklopljena te se sklapa izravno u jarku. Dimenzije pojedinih gabiona u presijeku obično su metar sa metar. Prema potrebi, pojedini gabioni se mogu složiti tako da čine veću barijeru. Poželjno je također dio barijere od gabiona smjestiti ispod razine tla kako bi težina ispune iza barijere pružila otpornost na udar. Ukoliko je gabion oštećen pri udaru, lako se popravi i vrati u prvobitan položaj. Nedostatak barijere od gabiona je u radnoj konstrukciji gabiona. Ukoliko je oštećena konstrukcija gabiona točno u sredini barijere popravak će biti zahtjevan [2].

Jedinična težina gabiona koja iznosi 15 kN/m^3 relativno je mala s obzirom na jediničnu težinu čvrste stijene (26 kN/m^3), zbog čega se pri ispitivanju stabilnosti barijere na udar uzima u obzir. Energija udara apsorbira se kombiniranim djelovanjem posmične sile na dnu barijere i između fragmenata ispune gabiona. Energetski kapacitet barijere povećava se oblaganjem pojedinih gabiona opekom tako da se izbjegnu kontinuirani spojevi [2].

5.1.2. Barijere od betonskih blokova

Kruti masivni betonski zidovi nisu učinkovite barijere za zaštitu od odrona zbog svoje krutosti. Krutost betonskih zidova raste s njihovom masom. Kao takvi ne

apsorbiraju energiju već se lome. Međutim barijera izvedena od manjih pojedinih betonskih blokova (pr. veličine kvadratnog presjeka 0.75 m^2 i dužine $1,5 \text{ m}$) može biti učinkovita jer se blokovi mogu pojedinačno kretati kako bi apsorbirali energiju. Također vertikalna su barijera kao i gabioni čime odbijaju stijenske blokove natrag u jarak. Prednosti barijera od betonskih blokova je to što se brzo grade i jednostavno popravljaju tako što se pomaknuti betonski blokovi vraćaju u prvobitan položaj ili pri oštećenju zamjenjuju. Otpor na smicanje generira se prvenstveno težinom bloka i trenjem na bazi koja uključuje uvučeni utor na dodiru s granuliranom površinom tla. Prekomjerno pomicanje betonskih blokova sprječava čelični kabel provučen kroz ušicu na vrhu blokova. Čelični kabel ujedno raspršuje udarno opterećenja na nekoliko obližnjih blokova [2].

Učinkovita primjena barijera od betonskih blokova i gabiona je na rastresitim šljunčanim i kamenitim kosinama kuta nagiba od oko 35° do 37° . Na takvim se kosinama odronjeni stijenski blokovi kotrljaju niz kosinu s niskim visinama putanje. Također, zajedničko im je ograničenje visine i apsorpcije energije. Pri velikim omjerima visine i širine postat će nestabilne. Maksimalna visina koju mogu doseći je 2 metra. Dok maksimalna energija koju ove dvije barijere mogu podnijet je oko 500 kJ. Energija udara od 500 kJ predstavlja krajnju graničnu energiju koja će prouzročiti štetu na barijeri. Uslužna granična energija je tri puta manja od krajnje granične energije, odnosno 150 kJ, te ona ne uzrokuje oštećenje [2].

5.1.3. Barijere od armiranog tla

Barijera od armiranog tla velikog je udarnog energetskeg kapaciteta. Udarni energetske kapacitet izravno je povezan sa dimenzijama same barijere te metodom njezine izgradnje. Potrebna masa barijere koja generira otpor na smicanje duž temelja definirana je njezinom visinom i širinom. Ukupnu visinu barijere ($H=H_1+H_2$) čine maksimalna visina udara H_1 potrebna za zaustavljanje odronjenih stijenskih blokova i visina H_2 koja definira masu utega koji stvara otpor na smicanje duž horizontalne površine u razini maksimalne visine udara. Minimalna širina krune barijere od armiranog tla (C) je oko 0.8 metara što definira širinu potrebnu za rad opreme za zbijanje materijala ispune i sigurnost gradnje. Širina krune (C) se povećava s potrebom za povećanjem mase i udarnog energetskeg kapaciteta barijere. Barijere

od armiranog tla ima strmi nagib lica ($\psi_f > 65^\circ$) koji pri udaru preusmjerava stijenske blokove natrag u jarak i sprječava da se prevrnu preko barijere u štice područje. Svojim subvertikalnim nagibom lica smanjuju potrebnu širinu temelja barijere i potrebnu količinu materijala ispune [2].

Na površini lica barijere od armiranog tla nalaze se elementi obloge čija je funkcija zadržavanje materijala ispune, raspodjela udarnog opterećenja na šire područje kako bi se minimizirali koncentrirani pritisci u ispuni i ublažavanje štete udara svojom otpornošću. Uobičajeni elementi obloge koji ispunjavaju spomenute funkcije su gabioni i geotekstili ojačani čeličnom žičanom mrežom [8]. Materijal ispune čini tijelo barijere između elemenata obloge. Raspona je veličine od oko 5 do 50 mm, uglatog oblika te drenažnih svojstava. Kod barijere obložene gabionima na unutrašnjoj strani elementa obloge postavlja se filterski sloj geotekstila. Funkcija mu je zadržavanje materijala ispune tijela barijere koji je sitniji od stijenskog materijala ispune gabiona. Ispuna tijela barijere se izvodi u slojevima maksimalne debljine 300 mm koji se zbijaju do Proctorove gustoće od 95%. Svrha zbijanja je veća gustoća ispune i masa barijere što uzrokuje veću posmičnu čvrstoću i apsorpciju energije. Zbijena ispuna će se pomaknuti s većom apsorpcijom energije u usporedbi s rastresitom ispunom. Otpor na smicanje unutar barijere definiran je zbijenim zrnatom tlom i horizontalnom armaturom. Unutar ispune postavljaju se horizontalni elementi ojačanja (armatura) na okomitom rastojanju od oko 0.7 do 1.0 metar. Armaturu čini ili geosintetička georešetka ili dvostruko uvijena čelična žičana mreža. Kako bi se stvorila koherentna struktura, armatura je povezana sa elementima obloge [2].

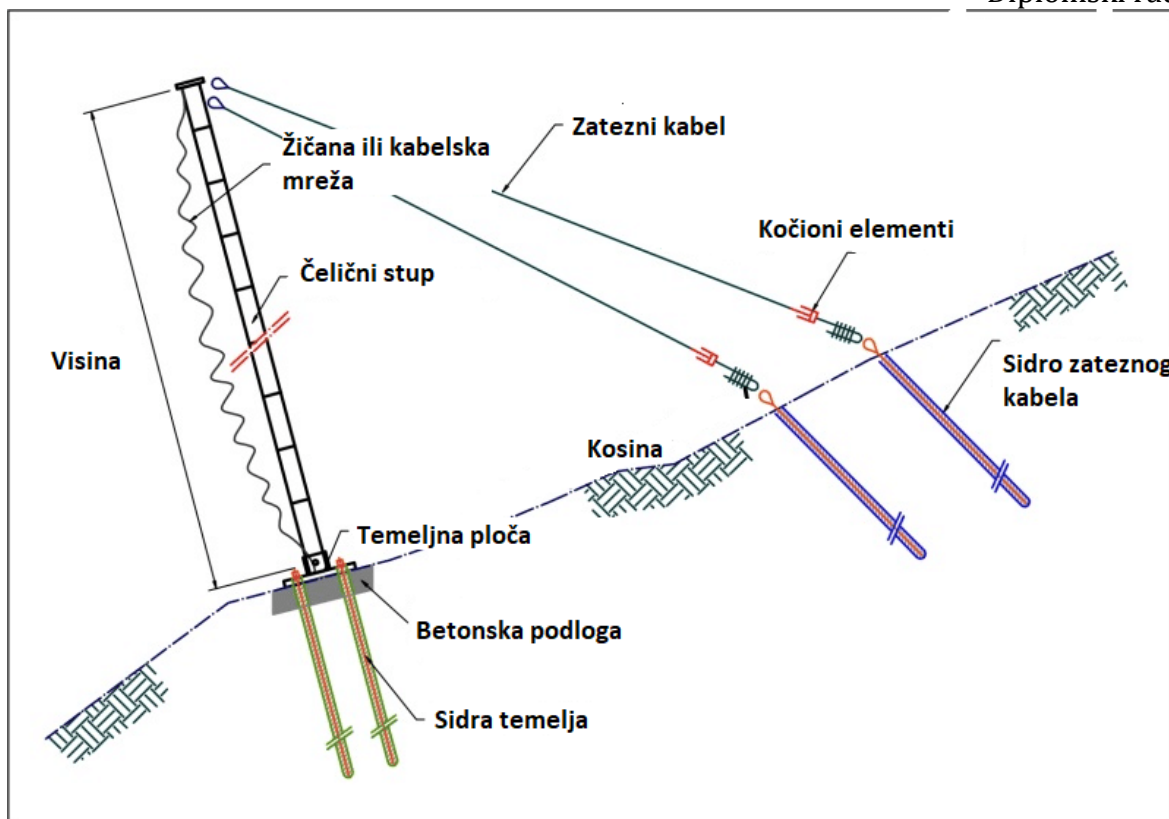
Temelj barijere je ukopan do dubine od oko polovine visine elementa obloge zbog dodatnog poboljšanja otpora na smicanje duž temelja. Također, poželjno je da se slabi temeljni materijal ukloni i po potrebi zamjeni kompaktnom zrnatom ispunom. Tim se postupkom povećava nosivost temeljnog tla, koji mora izdržati težinu barijere i udarno opterećenje bez slijeganja i pomaka. Pri temeljenju barijere na bermi strme kosine, mogući nepovoljni temeljni uvjeti su vremenski utjecaj na kraju berme čime dolazi do potkopavanja vanjskog ruba barijere i njezine nestabilnosti [2].

Nasip od armiranog tla visoko energetske je kapaciteta, čak do 100 MJ [8].

5.2. Fleksibilne barijere - ograde

Pozicija same fleksibilne barijere jedan je od značajnijih parametara kojeg je potrebno definirati njezinim projektiranjem. Najpoželjnija lokacija s obzirom na putanju odrona je pri dnu kosine, netom nakon udara u površinu kosine, kada su energija i visina putanje odrona najmanje. Za definiranje lokacije u kojoj vrijede spomenuti uvjeti od velike su pomoći dijagrami energetske raspodjele. Uobičajene pozicije fleksibilne barijere su u jarugama gdje je koncentriran odron, na prirodnim terasama kosine ili na umjetno izvedenim bankinama. Ukoliko kosina ima ujednačeni nagib lica teško je definirati točku udara pa se u tom slučaju izvode umjetne bankine. Važan podatak za pozicioniranje fleksibilne barijere je i sama njezina krutost, odnosno deformacija. Deformacija fleksibilne barijere definira udaljenost koju mora zadovoljiti s obzirom na objekt koji se štiti [2].

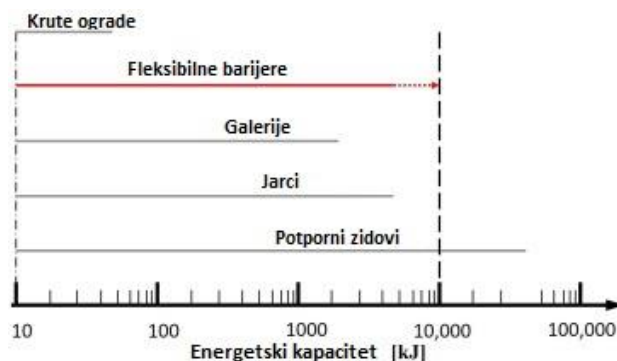
Konstrukciju fleksibilne barijere čine brojne komponente, od kojih se neke mogu vidjeti na slici 15. Najvažnija komponenta fleksibilne barijere je mreža [12]. Mreža je komponenta fleksibilne barijere koja apsorbira udarnu energiju svojim opiranjem deformaciji. Otpornost mreže na udarna opterećenja veća je ukoliko je izrađena od žice velike čvrstoće. Postoje više vrsta mreža koje se koriste u konstrukcijama fleksibilnih barijere. Primjena im ovisi o projektnoj energiji udara. Postoje mnogi zaštićeni i potpuno ispitani sustavi od strane proizvođača koji se između ostalog razlikuju prema obliku otvora, petljama, stezaljkama, načinu apsorpiranja energije i sličnih parametara mreže [2]. Fleksibilna barijera može imati primarnu i sekundarnu mrežu. Primarna mreža će tada imati velike otvore, te će imati funkciju zaustavljanja velikih blokova stijene. Dok će sekundarna mreža koja će bit postavljena sa vanjske strane imat manje otvore i zaustavljat će manje blokove stijene [12].



Slika 15: Shema fleksibilne ograde [18 - modificirano]

Mreža je u uzdužnom smjeru na vrhu i dnu poduprta čeličnim kabelima, koji se protežu kroz nosače na stupovima. Stupovi su najčešće čelične grede. Mogu biti visoki i do oko 8 metara, a uobičajeno se postavljaju na razmaku od oko 8 do 12 metara. Poželjno je da se nalaze izvan jaruge odrona, tako da većina odronjenih stijenskih blokova ne udari u kruti stup već u fleksibilnu mrežu koju podupiru [2].

Osim same mreže, fleksibilne barijere imaju dodatne komponente za apsorpiranje energije [12]. Fleksibilne barijere su se razvile na temelju konstrukcija krutih ograda koje mogu zadržati odrone male energije do 50 kJ [6]. Težilo se je izvedbi barijera velikog energetske kapaciteta što je postignuto razvojem fleksibilnih barijera energetske kapaciteta i do 8000 kJ [12]. Energetski kapacitet fleksibilnih barijera s obzirom na ostale sustave pasivne zaštite prikazan je na slici 16.



Slika 16: Energetski kapacitet fleksibilnih barijera [12 - modificirano]

U dodatne komponente apsorpiranja udarne energije odrona ubrajaju se šarka na bazi stupa te kočioni elementi koji se ugrađuju na čelične zatezne kabele stupova i potporne kabele mreže [12].

Baza stupa krutih ograda je kruta, dok je baza fleksibilne barijere fleksibilna šarka. Kruta baza stupa prenosi udarno opterećenje na temelj, te pri otklonu stupa ujedno dolazi i do oštećenja temelja što predstavlja prekoračenje krajnje granične energije koju ograda može pretrpjeti bez rušenja. Fleksibilna šarka omogućuje otklon stupa bez oštećenja temelja, te pri tome apsorpira energiju udara odronjenog stijenskog bloka. Što šarka pruži veći otpor otklonu stupa, to apsorpira veći udio energije udara. Prednost šarki se također očituje u lakšem i jeftinijem popravku fleksibilne barijere pri oštećenju [2].

Povećavanjem energetskog kapaciteta krute ograda povećavaju se dimenzije njezinih komponenata, krutih stupova i temelja. Izvedba krutih stupova i temelja velikih dimenzija nije isplativa čime se daje prednost primjeni fleksibilnih barijera [2].

Izvedba temelja fleksibilnih barijera ovisi o nosivom materijalu na kojem se izvodi, stijeni ili tlu, i o projektnom opterećenju konstrukcije. U stijeni se temelj izvodi ugradnjom skupine potpuno injektiranih sidara koji zajedno razvijaju ojačanu temeljnu stijenu u obliku konusa na koju se pričvršćuje stup. Analiza stabilnosti temelja uključuje provjeru čvrstoće sidara na smicanje i zatezanje, otpornost injektirane stijene na izvlačenje te stabilnost cijele ojačane temeljne stijene. Važan parametar stabilnosti cijele ojačane temeljne stijene je orijentacija diskontinuiteta duž kojih može doći do nestabilnosti. Sidra su pretežito injektirana cementnom smjesom.

Dužinu cementom injektiranih sidara, definiranu jednadžbom (50), određuje otpor injektirane stijene na izvlačenje uz pretpostavku linearne raspodjele posmičnog naprezanja duž cijele dužine sidra.

$$L_b = \frac{S_w}{\pi \cdot d_h \cdot \tau_{dop}} \quad (50)$$

S_w – radna čvrstoća sidra

d_h – promjer rupe bušotine

τ_{dop} – dopušteno posmično naprezanje injektirane stijene

Uslužna – radna posmična čvrstoća injektirane stijene u odnosu je sa jednoosnom tlačnom čvrstoćom stijene $\sigma_{u(r)}$ ispitane na stijenci bušotine (51).

$$\tau_{dop} = \frac{\sigma_{u(r)}}{30} \quad (51)$$

Čvrstoća i broj sidara povezani su s projektiranom energijom udara i fleksibilnosti baze stupa. U tlu koje može prevladavati u podnožju kosina se temelji također mogu izvesti injektiranjem sidara u obložene bušotine ili samobušećim injektiranim sidrima. No sidra je moguće primijenit samo u granuliranim niskopropusnim tlima gdje će se injektirana smjesa zadržati oko sidra. Duljina im se određuje istim postupkom kao i kod temeljenja u stijeni, gdje je dopušteno posmično naprezanje injektirane smjese oko 0.05 do 0.1 MPa. U protivnom se temelji izvode kao masivni betonski blokovi. Izvedbom temelja u obliku krnjeg konusa povećava mu se stabilnost, dok se otpornost na izvlačenje povećava zbijanjem tla oko njega ukoliko se izvodi u tlu [2].

Zbog primjene fleksibilne baze stupova, za pridržavanje fleksibilne barijere u projektiranom položaju zaduženi su zatezni čelični kabeli postavljeni u uzdužnom i poprečnom smjeru na ravninu u kojoj se nalaze stupovi [2].

Konstrukcija fleksibilne barijere i sama njezina izvedba značajno ovisi o topografiji lokacije. Najjednostavnije ju je izvesti u ravnini, bez skretanja koje zahtijeva dodatne čelične kabele i sidra za podupiranje stupova na kojima dolazi do promjene. Također poželjno je da su svi stupovi iste duljine. Neravnomjerna

topografija uzrokuje pojavu praznina između površine tla i mreže što zahtijeva upotrebu mreža prilagođenih oblika i stupova različite duljine. Alternativa je izvedba niz kratkih fleksibilnih barijera u ravnini, od kojih je svaka prilagođena jednom segmentu kosine te ujedno svaka od njih ima stupove iste duljine [2].

Zatezni čelični kabeli s jedne su strane pričvršćeni na stupove, a s druge na injektirana sidra koja su ugrađena u kosinu. Kako bi zatezni kabeli na mjestima spajanja sa drugim komponentama fleksibilne barijere imali maksimalnu čvrstoću pričvršćivanje je potrebno izvesti prema uputama definiranim od strane proizvođača. Svi bi čelični kabeli na svojim krajevima trebali sadržavati naprstak, zavoje sa visokim naponom u kabelu, te točan broj, pozicioniranje i zatezanje stezaljki kabela. Zatezni čelični kabeli trebaju imati istu čvrstoću kao i injektirana sidra na koja su pričvršćeni. Da bi injektirana sidra bila potpuno ugrađena u čvrstu stijenu te da se protežu ispod dubine vremenskog utjecaja često se ugrađuju pod strmim kutom. U tim okolnostima, sidra su podložna savijanju zbog čega se zbog veće nosivosti i deformabilnosti češće ugrađuju pletena sidra od čeličnih niti nego uobičajena kruta štapna sidra [2].

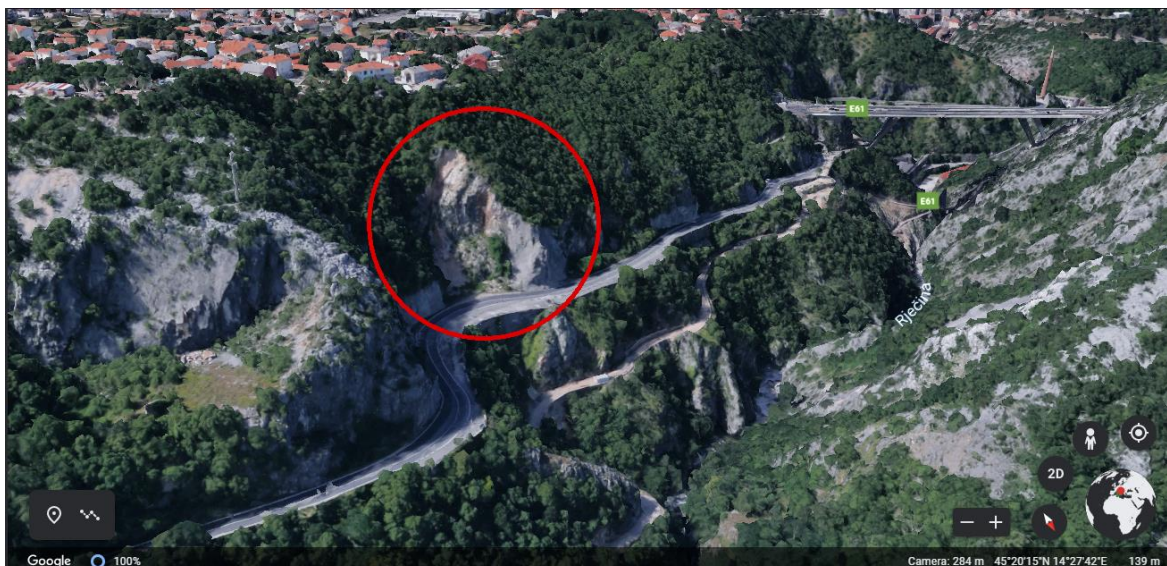
Idealna konstrukcija ograde trebala bi imati mrežu, kočione elemente i šarke iste krutosti tako da svaka komponenta ograde podjednako apsorbira energiju udara. Kočionim elementima su kako je već spomenuto opremljeni čelični potporni kabeli mreže i stupova. Kod fleksibilnih barijera je uobičajena primjena kočione petlje, spirale i kompresijske cijevi. Kočioni elementi se aktiviraju kada energija udara premaši njihovu pokretačku energiju. Aktivacijom podliježu plastičnoj deformaciji zbog čega ih je nakon značajne deformacije potrebno zamijeniti [2].

Projektiranje fleksibilne barijere kao zaštite od odrona bazira se na pretpostavkama vezanih uz energiju udara koja ovisi o masi i brzini odrona, geometriji kosine i metodi analize. Za kvantificiranje nesigurnosti tih pretpostavki u proračun svake komponente fleksibilne barijere uključuju se djelomični faktori sigurnosti γ . Djelomični faktori sigurnosti uključuju se kroz razinu projektne energije, rizik za ljudski život, pouzdanost softvera za simulaciju, kvalitetu topografskih snimaka i deformaciju barijere [2].

Pri dimenzioniranju fleksibilne barijere potrebno je voditi računa o samoj izvedbi gdje značajnu ulogu ima težina same mreže koja utječe na njezino postavljanje, dopremanje na lokaciju i slično [2].

6. PRIMJENA ANALIZE ODRONA I DIMENZIONIRANJE ZAŠTITNE BARIJERE NA PROFILU KOSINE UZ DRŽAVNU CESTU DC3 – DIONICA OREHOVICA – ŠKOLJIĆ, LOKACIJA BANSKA VRATA

Kosina izvučenog profila, prikazana na slici 18, nalazi se na istočnoj strani doline Rječine, uz cestu DC3 na dionici Orehovica – Školjić, lokacija Banska vrata. Uzvišenja koja okružuju dolinu Rječine prelaze i do 200 m n.m.. Profil ceste je ostvaren zasijecanjem stijenske kosine, čime su formirani zasjeci znatnih visina [13]. Na slici 17 prikazana je prostorna lokacija kosine izvučenog profila, s obzirom na korito Rječine.



Slika 17: Prostorna lokacija kosine izvučenog profila [19]



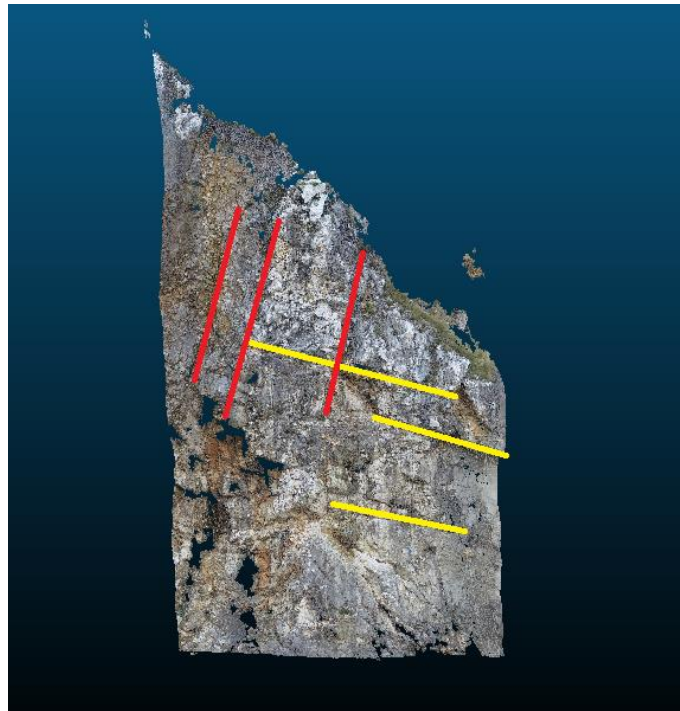
Slika 18: Dio analizirane stijenske kosine

Šire područje Rijeke seizmički je aktivno, što može biti jedan od inicijatora odrona [13]. Također, jedan od važnijih inicijatora koji je prisutan na tom području je i prisutnost vode odnosno oborina. Riječko područje najkišovitije je područje u Hrvatskoj, a zauzima i visoko mjesto najkišovitijih područja u svijetu.

Osnovnu stijensku masu čine čvrsti (dobro okamenjeni) vapnenci karbonatnog tipa. Stijenska masa je zbog krškog tipa poroznosti i prosječne vodopropusnosti vapnenaca velike upojnosti, što znači da se voda relativno brzo infiltrira u podzemlje i teče prema koritu Rječine [13].

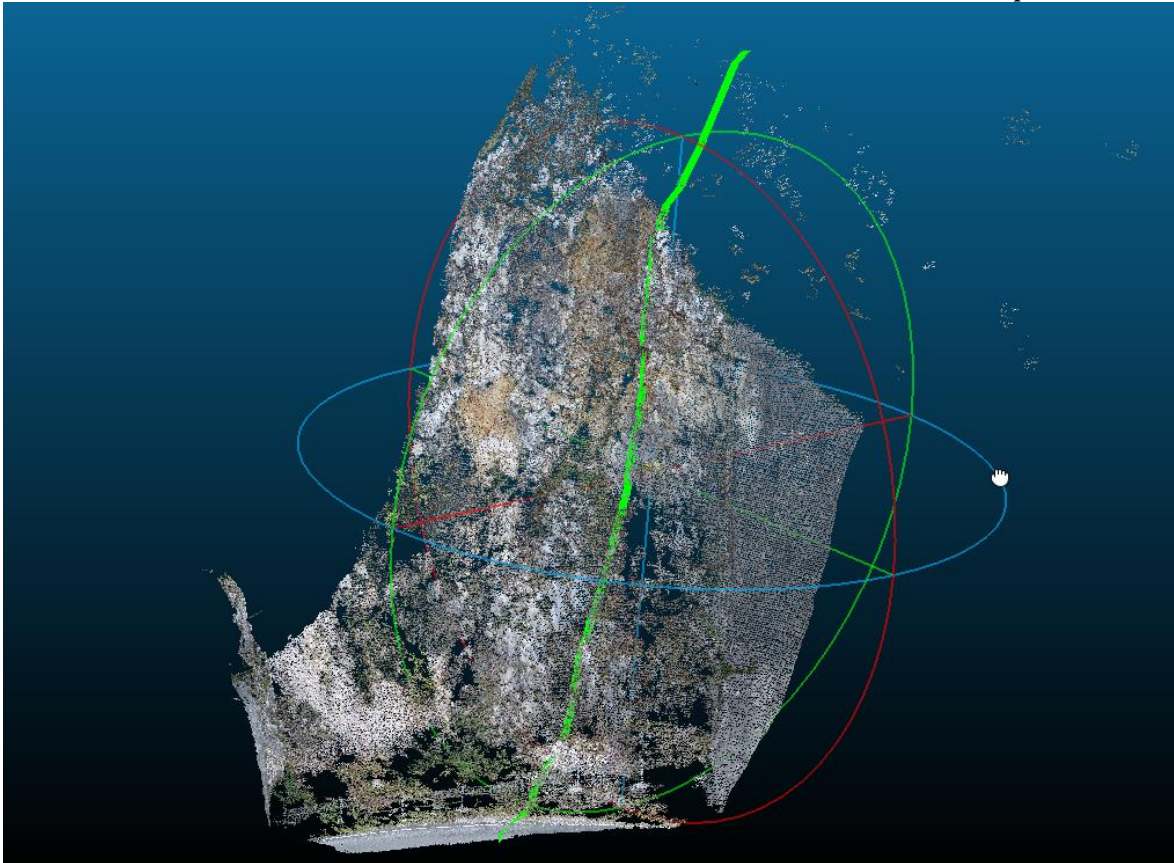
Inicijatori odrona ne bi imali učinaka da na kosini ne postoje preduvjeti ili nepovoljni uvjeti koji su stvorili predispozicije za nestabilnost [4]. Među njima se na kosini izvučenog profila ističe nepovoljan smjer pružanja tri sustava diskontinuiteta. Prisutna geološka struktura slojevitosti karakteristična za sedimentne stijene u koje se ubrajaju vapnenci predstavlja jedan od spomenuta tri sustava diskontinuiteta. Preostala dva sustava diskontinuiteta subvertikalnog su pružanja [13]. Dimenzije

potencijalno nestabilnog bloka definirane su postojanošću i razmakom izraženih sustava diskontinuiteta definiranih na slici 19.



Slika 19: Sustavi diskontinuiteta

Analizirani profil kosine izvučen je iz 3D oblaka točaka u programu CloudCompare. Pozicija samog profila na kosini prikazanoj 3D oblakom točaka definirana je na slici 20. Za samu analizu nestabilnosti odrona na izvučenom profilu korišten je program RocFall.



Slika 20: Profil izvučen iz 3D oblaka točaka u programu CloudCompare (zelena linija)

6.1. RocFall program

Prvi programi razvijeni za modeliranje nestabilnosti odrona namijenjeni su za dvodimenzionalnu analizu. Razvojem metoda skeniranja kosina (Lidar) za izradu digitalnih modela terena (DTM), razvijeni su i programi u kojima je postalo moguće provoditi trodimenzionalne analize [2].

RocFall je program za dvodimenzionalno modeliranje odrona. Prema metodi vjerojatnosti simulira nestabilnost odrona. Ulazni parametri su geometrija kosine, svojstva materijala kosine, masa i dimenzije odrona, izvorna zona odrona i početna brzina. Na temelju definiranih ulaznih parametara RocFall program određuje energiju, brzinu i visinu putanje duž cijelog profila kosine te krajnju točku zaustavljanja.

RocFall program ima mogućnost u postavkama modeliranja definirati metodu modeliranja odrona. Razlikuju se dvije metode, metoda sjedinjene mase i metoda diskretnih elemenata - krutog tijela. Metoda sjedinjene mase prati proračun opisan u

poglavlju 3 (Proračun odrona), dok je metoda diskretnih elemenata – kruto tijelo složenija jer uzima u obzir dimenzije i oblik bloka. Dimenzije i oblik bloka značajni su u izračunu rotacijske brzine te učinku hrapavosti površine materijala kosine. Hrapavost površine materijala kosine značajno utječe na ponašanje odrona. Veća hrapavost rezultirat će i većom visinom putanje. RocFall program koristi modificiranu metodu sjedinjene mase. Naime, metoda sjedinjene mase definira blok kao točku u kojoj je koncentrirana definirana masa i brzina, te u proračunu ne uzima u obzir rotaciju tijela. Modificirana metoda sjedinjene mase pri proračunu rotacijske energije, gdje je oblik bloka važan parametar, blok definira kao kružnicu radijusa r izračunatog iz ulaznih parametara mase i gustoće materijala stijenske mase [5]. Za razliku od metode sjedinjene mase, metoda diskretnih elemenata – kruto tijelo kao ulazni parametar zahtjeva približno točan oblik bloka prema čemu daje i mjerodavnije rezultate.

RocFall program se također koristi za projektiranje zaštitnih barijera. Projektiranje zaštitnih barijera zahtijeva poznavanje mase i brzine udara za utvrđivanje energije udara te visine putanje duž profila kosine za utvrđivanje visine barijere te pozicije njezine izvedbe.

6.2. Rezultati analize odrona

Kosina je na analiziranom profilu s obzirom na cestu kao referentnu ravninu visoka približno 40 metara. Profil kosine je od litice na kojoj je moguć odron do profila prometnice dug približno 25 metara. Definirane su zone osnovne stijenske mase, talusa i asfalta. Za materijale definiranih zona usvojene su vrijednosti parametara predloženih u programu RocFall, temeljene na iskustvu stvarnih nestabilnosti odrona i prikazane u tablici 2 i 3.

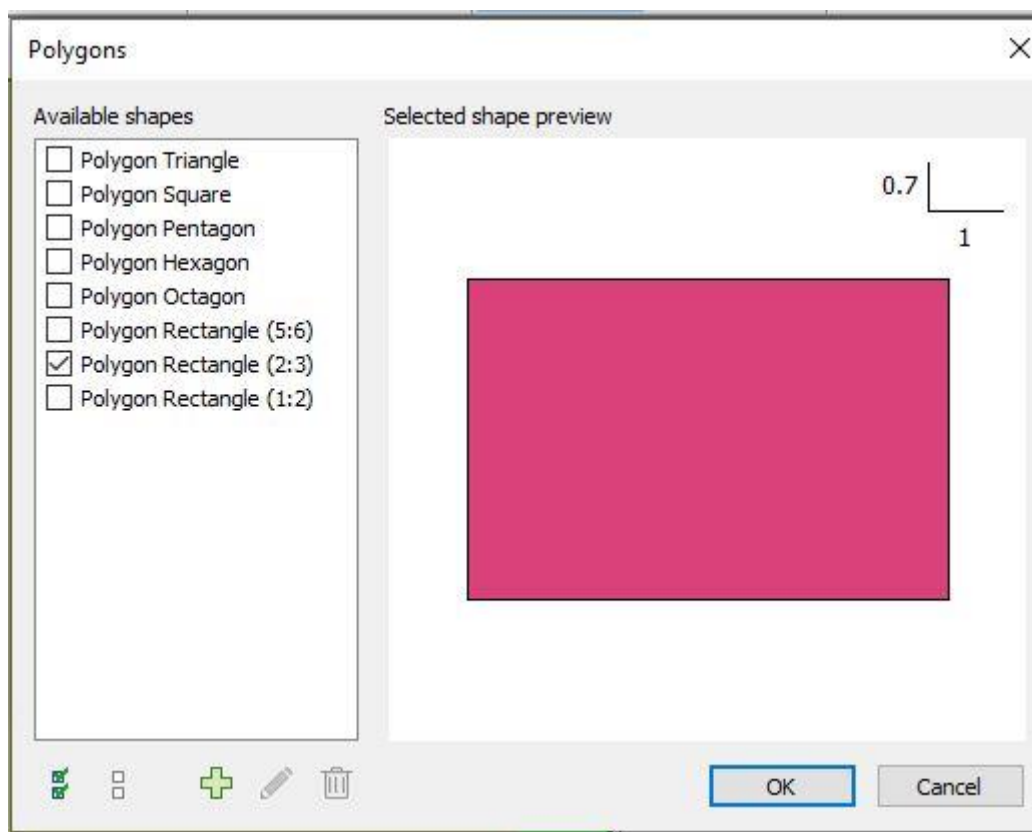
Tablica 2: Vrijednosti parametara materijala definiranih zona profila (kruto tijelo)

METODA DISKRETNIH ELEMENATA	OSNOVNA STIJENSKA MASA	TALUS	ASFALT
NORMANI KOEFICIJENT RESTITUCIJE e_N	0.32	0.32	0.44
TANGENCIJALNI KOEFICIJENT RESTITUCIJE e_T	0.71	0.82	0.71
KOEFICIJENT TRENJA KLIZANJA	0.58	0.56	0.56
KOEFICIJENT TRENJA KOTRLJANJA	0.40	0.65	0.42

Tablica 3: Vrijednosti parametar materijala definiranih zona profila (sjedinjena masa)

METODA SJEDINJENE MASE	OSNOVNA STIJENSKA MASA	TALUS	ASFALT
NORMANI KOEFICIJENT RESTITUCIJE e_N	0.32	0.30	0.40
TANGENCIJALNI KOEFICIJENT RESTITUCIJE e_T	0.71	0.61	0.90
KUT TRENJA [°]	22.02	32.05	6.34

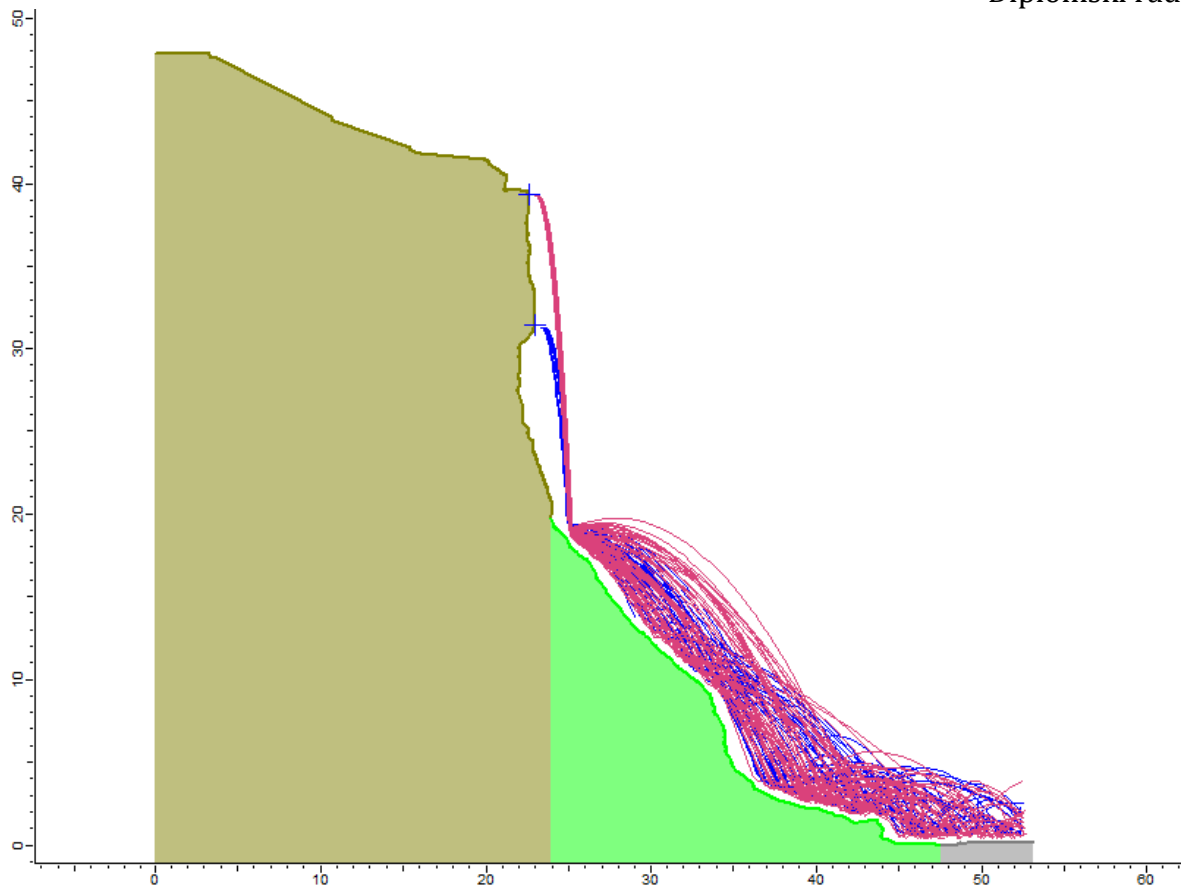
Analizom vjerojatnosti provedeno je modeliranje putanje odrona za 100 blokova stijenske mase. Za metodu krutog tijela definirano je da bi oblik bloka podložnog nestabilnosti odrona mogao imati oblik prikazan na slici 21.



Slika 21: Oblik bloka podložnog nestabilnosti odrona

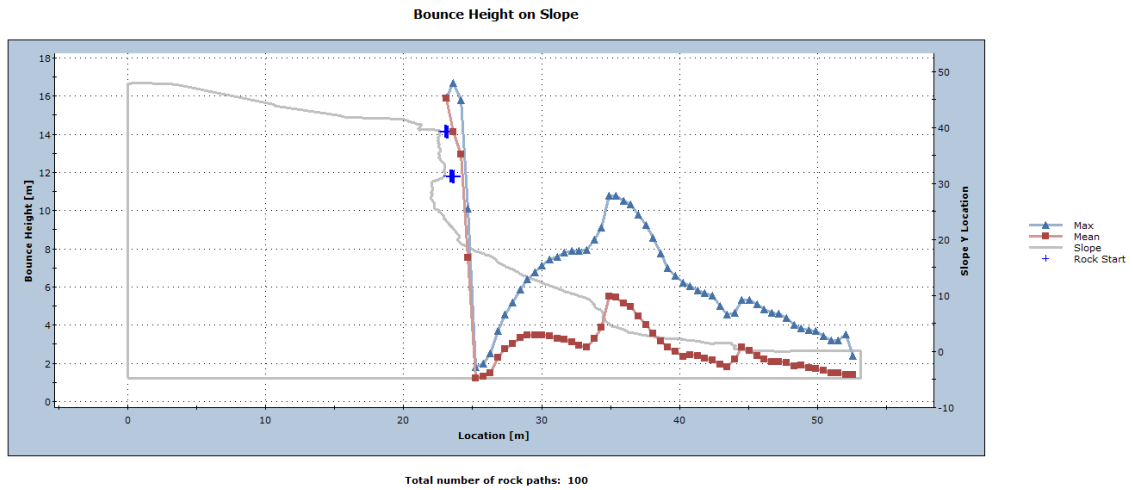
Definirano je da bi odron sa samog vrha stijenskog izdanka mogao imati masu 1000 kilograma, a sa sredine stijenskog izdanka i do 2000 kilograma. Prema tome, za 50 blokova mase 1000 kilograma početak putanje definiran je na visini od 39 metara. Dok je za 50 blokova mase 2000 kilograma početak putanje definiran na visini od 31 metar. Početna brzina odrona definirana je s vrijednošću od 1 m/s.

Rezultat modeliranja nestabilnosti odrona prema metodi diskretnih elemenata –kruto tijelo prikazan je modelom na slici 22.

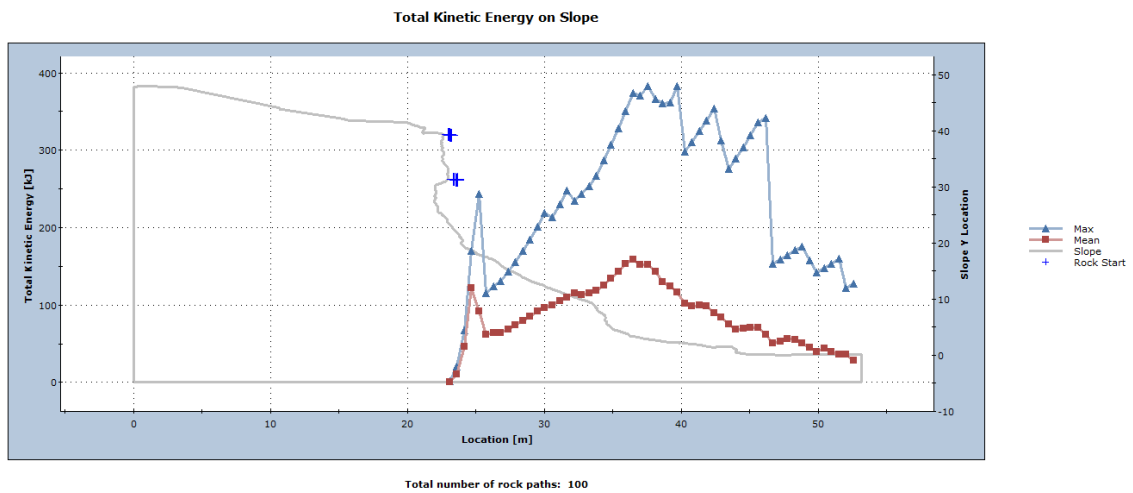


Slika 22: Model odrona modeliran metodom diskretnih elemenata -kruto tijelo

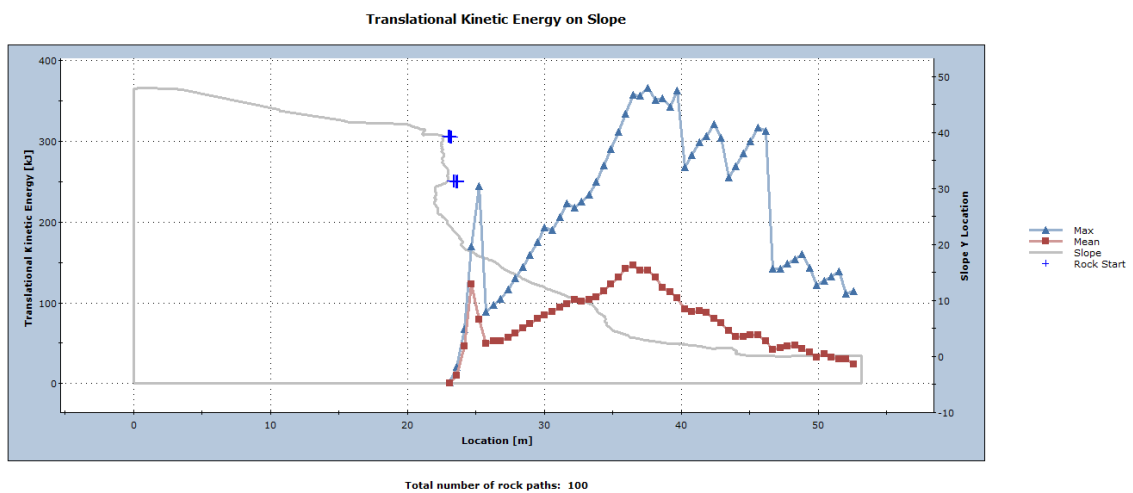
Duž cijelog profila model ima proračunatu visinu, translacijsku i rotacijsku brzinu i ukupnu kinetičku energiju zajedno sa njezinim komponentama. Vrijednosti proračunatih parametara te njihova promjena duž profila kosine prikazane su dijagramima na slikama 23, 24, 25, 26, 27 i 28. RocFall program također definira točke zaustavljanja koje su prikazane raspodjelom vjerojatnosti zaustavljanja duž profila kosine u obliku histograma prikazanog na slici 29.



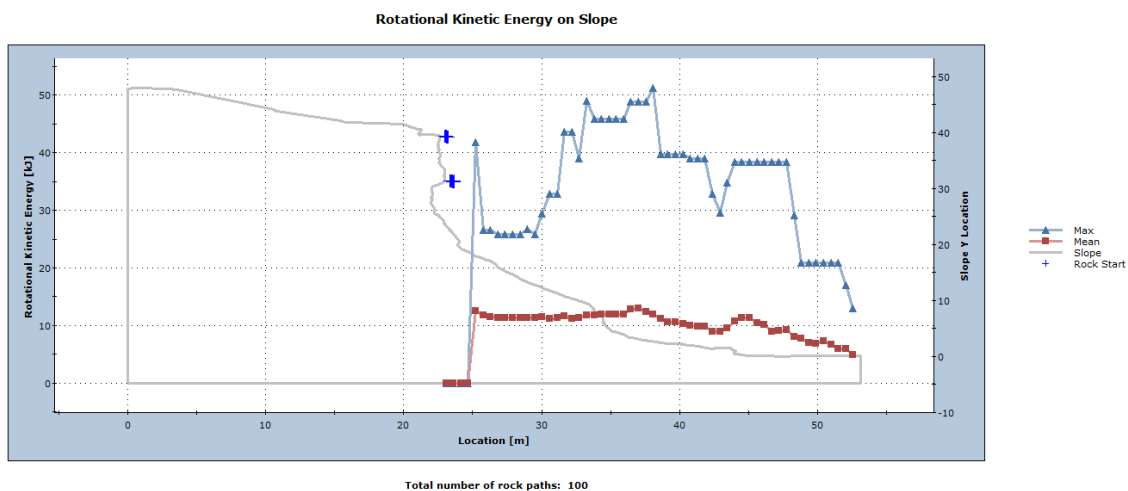
Slika 23: Dijagram promjene visine putanje na profilu kosine (kruto tijelo)



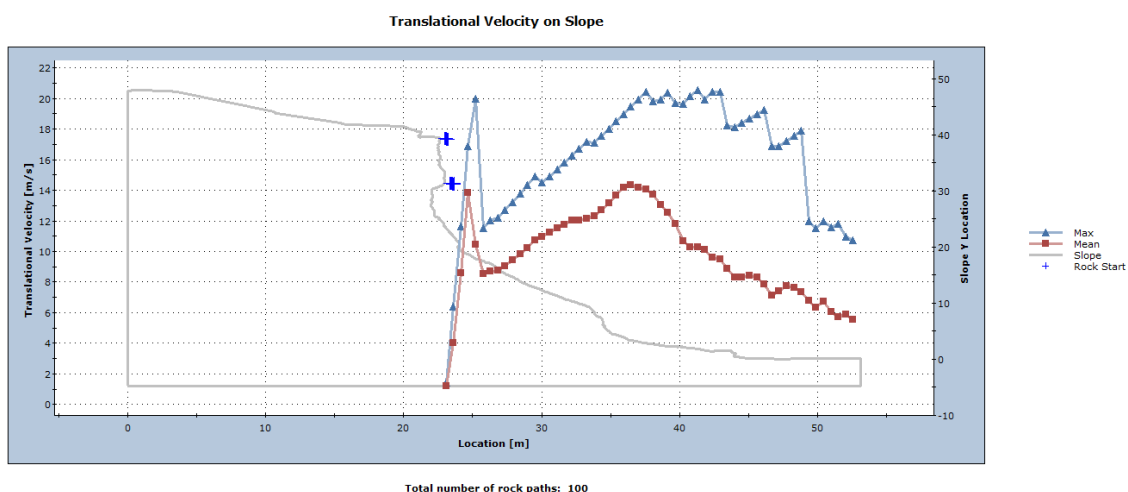
Slika 24: Dijagram promjene ukupne kinetičke energije na profilu kosine (kruto tijelo)



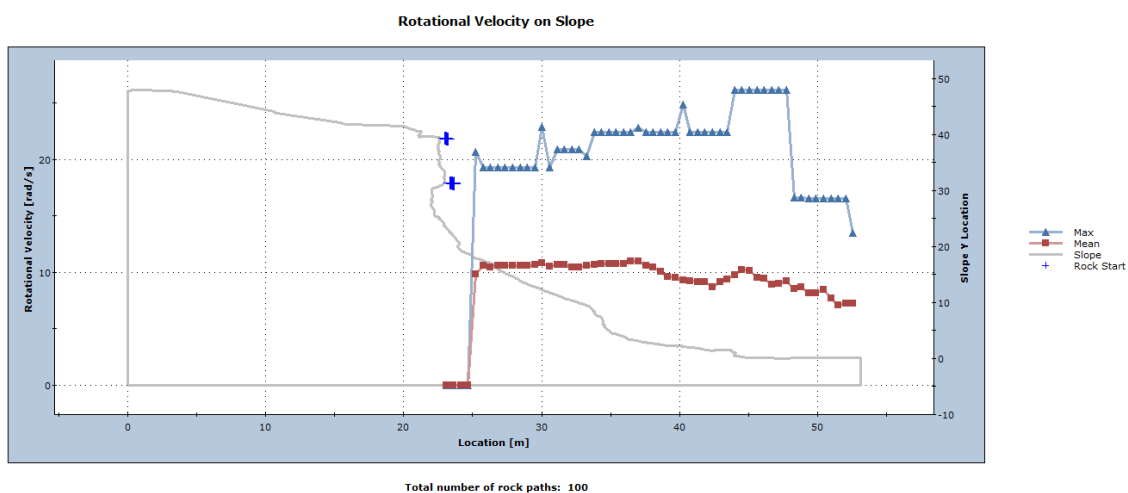
Slika 25: Dijagram promjene translacijske kinetičke energije na profilu kosine (kruto tijelo)



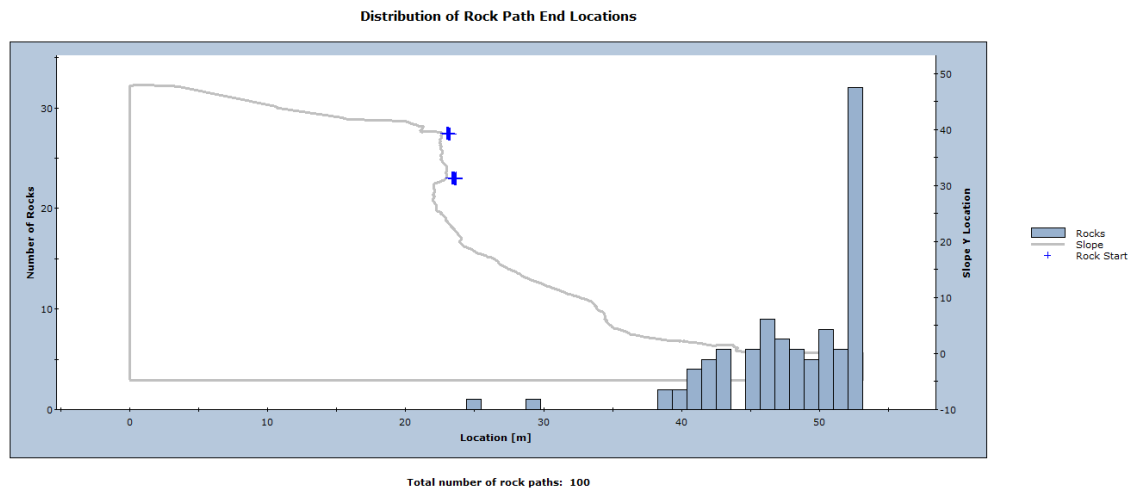
Slika 26: Dijagram promjene rotacijske kinetičke energije na profilu kosine (kruto tijelo)



Slika 27: Dijagram promjene translacijske brzine na profilu kosine (kruto tijelo)

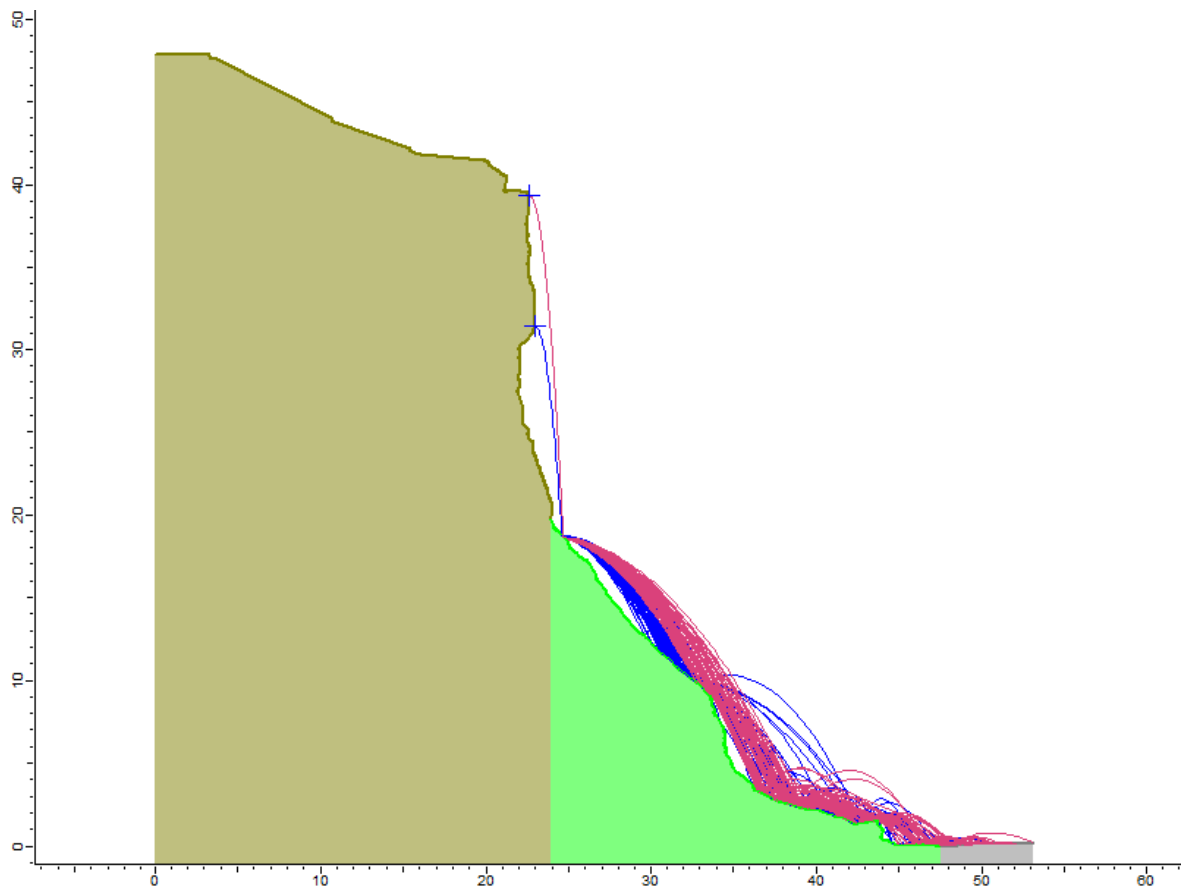


Slika 28: Dijagram promjene rotacijske brzine na profilu kosine (kruto tijelo)

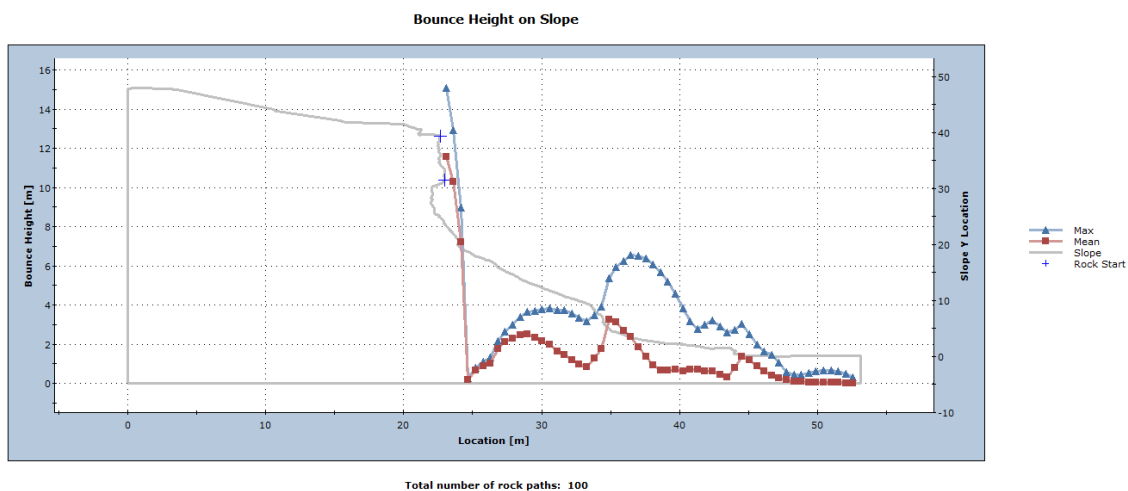


Slika 29: Histogram raspodjele vjerojatnosti zaustavljanja na profilu kosine (kruto tijelo)

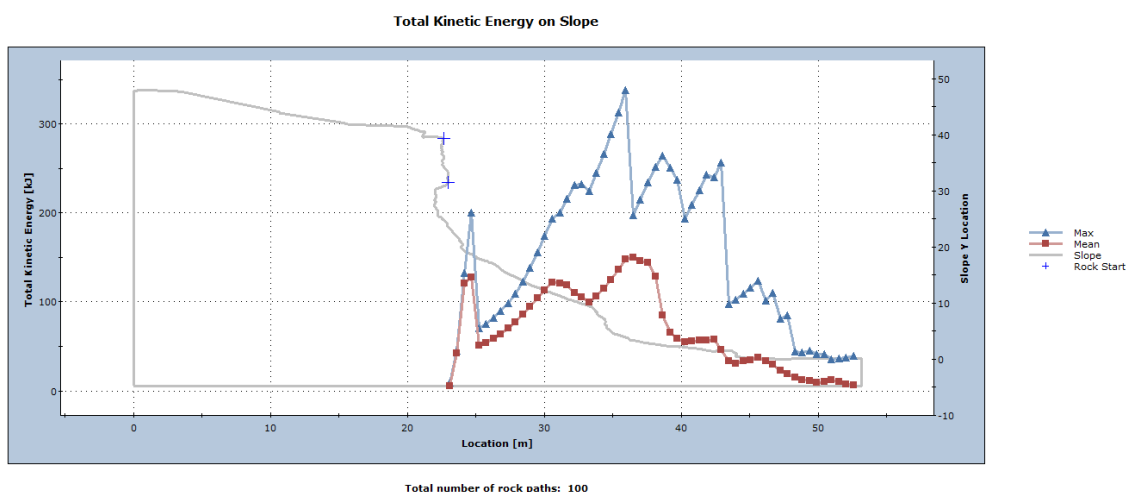
Rezultat modeliranja nestabilnosti odrona prema metodi sjedinjene mase prikazan je modelom na slici 30, uz proračunate vrijednosti parametara prikazane dijagramima na slikama 31, 32, 33, 34, 35 i 36. Na slici 37 prikazan je histogram raspodjele vjerojatnosti zaustavljanja na profilu kosine.



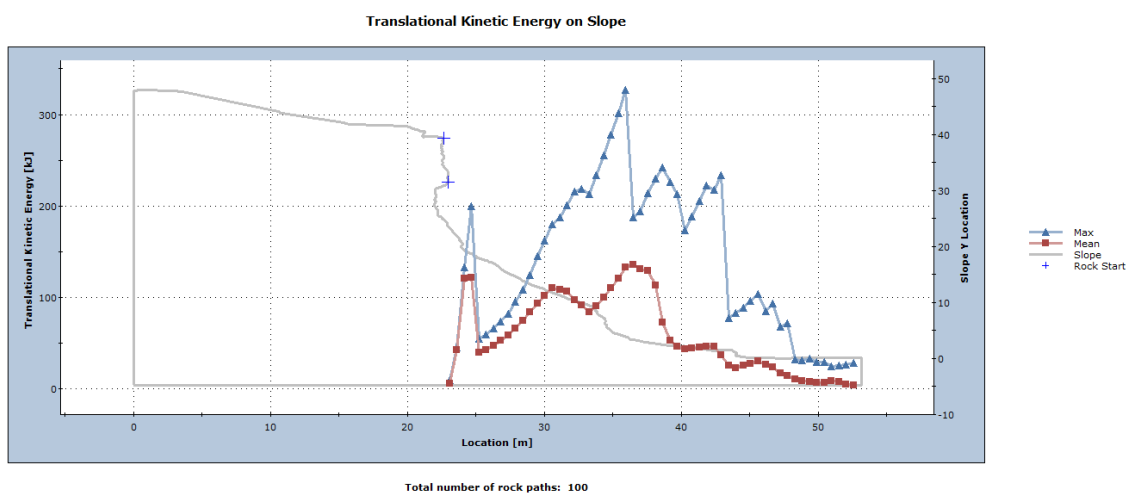
Slika 30: Model odrona modeliran metodom sjedinjene mase



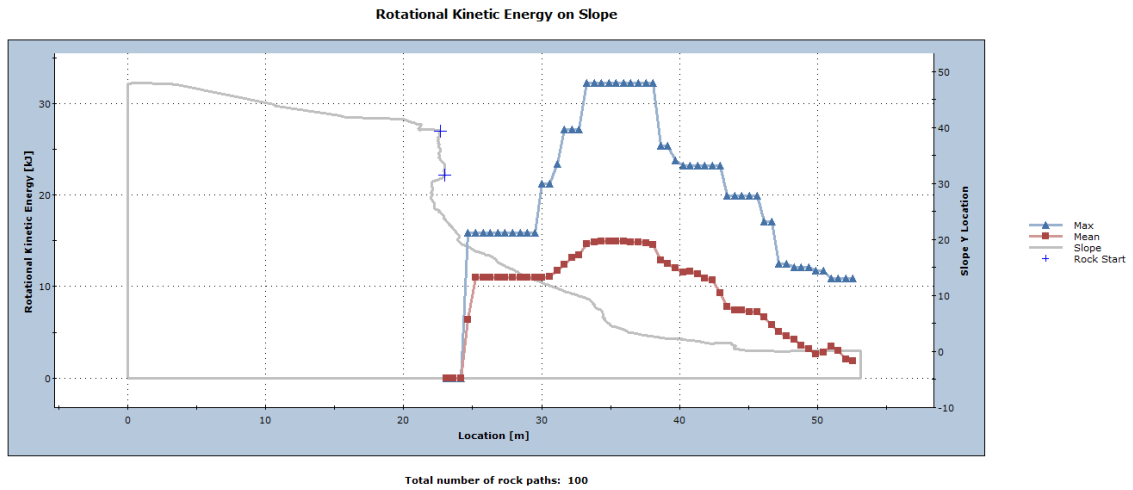
Slika 31: Dijagram promjene visine putanje na profilu kosine (sjedinjena masa)



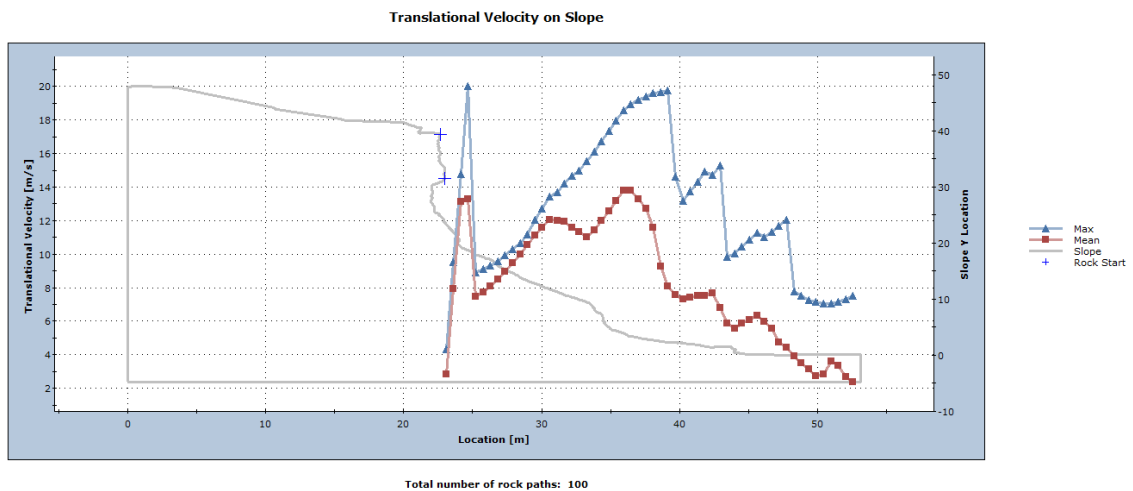
Slika 32: Dijagram promjene ukupne kinetičke energije na profilu kosine (sjedinjena masa)



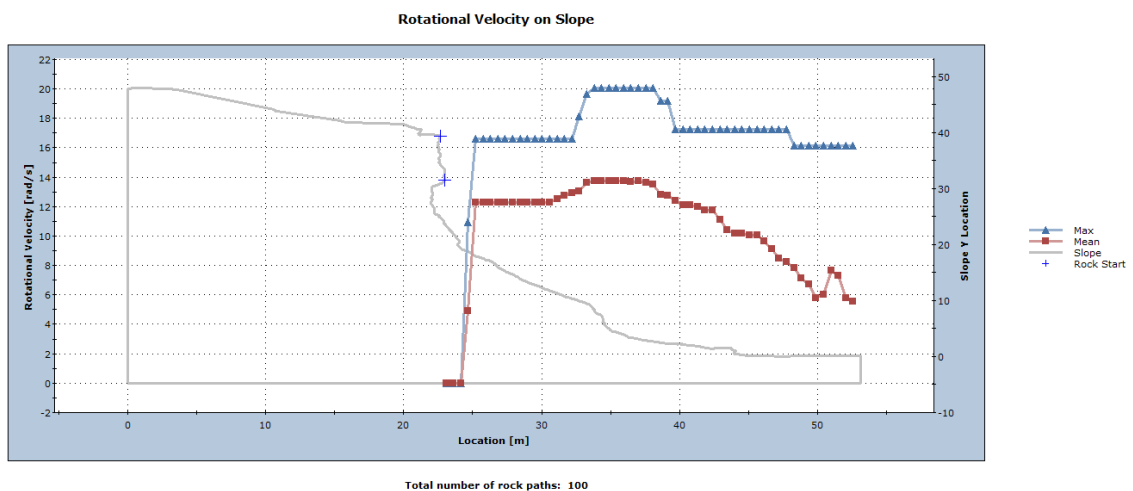
Slika 33: Dijagram promjene translacijske kinetičke energije na profilu kosine (sjedinjena masa)



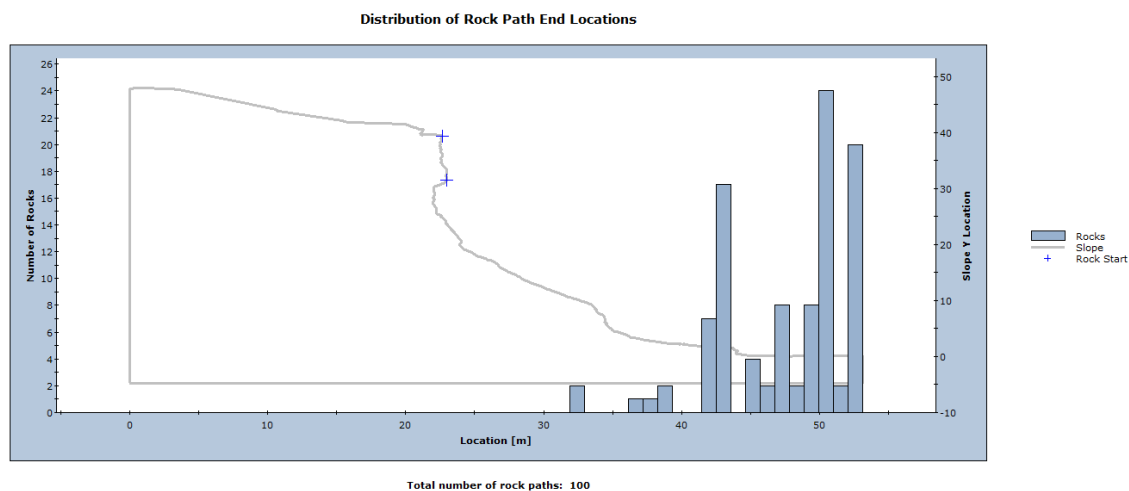
Slika 34: Dijagram promjene rotacijske kinetičke energije na profilu kosine (sjedinjena masa)



Slika 35: Dijagram promjene translacijske brzine na profilu kosine (sjedinjena masa)



Slika 36: Dijagram promjene rotacijske brzine na profilu kosine (sjedinjena masa)



Slika 37: Histogram raspodjele vjerojatnosti zaustavljanja na profilu kosine (sjedinjena masa)

Iz modela odrona i dijagrama parametara točno se mogu vidjeti teorijske zakonitosti same nestabilnosti. Primjerice nepromjenjivost rotacijske brzine i energije tijekom putanje odrona te povećanje ili smanjenje ovisno o uvjetima udara tijekom udarnog kontakta.

Obje metode modeliranja pokazuju da su vozila koja prometuju cestom i sama konstrukcija ceste izložena opasnosti od odrona. Potrebno je projektirati zaštitnu barijeru.

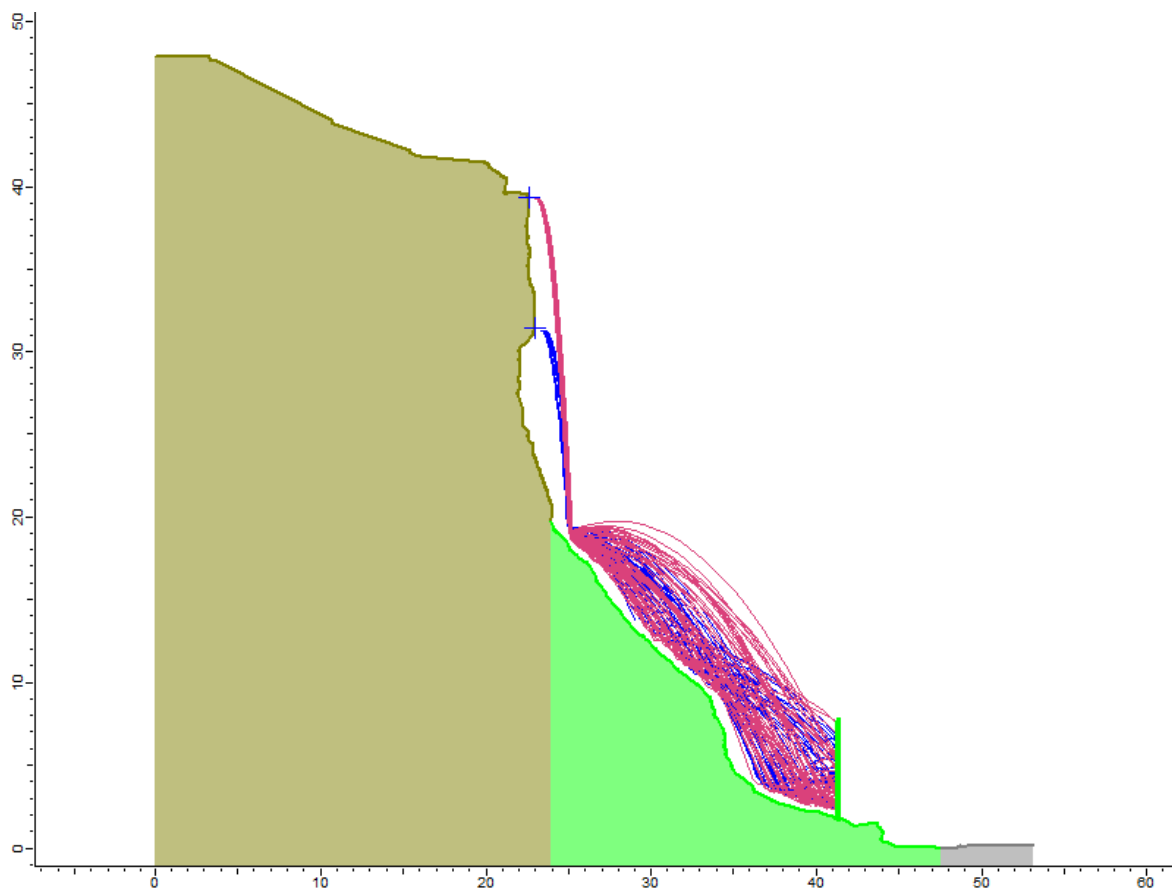
6.3. Dimenzioniranje zaštitne barijere

Pri dimenzioniranju zaštitne barijere bitno je pozicioniranje. Dokumentacijske podloge bitne za pozicioniranje barijere su rezultati same analize odrona. Barijeru je najbolje pozicionirati u točki gdje su energija i visina putanje odrona najmanje. Idealno, netom nakon udara u kosinu odnosno na samom početku nove putanje [2]. U podnožju kosine nema dovoljno prostora za izvedbu glomazne barijere zbog čega se je za dimenzioniranje odabrala fleksibilna barijera.

6.3.1. Dimenzioniranje barijere - 1. rješenje

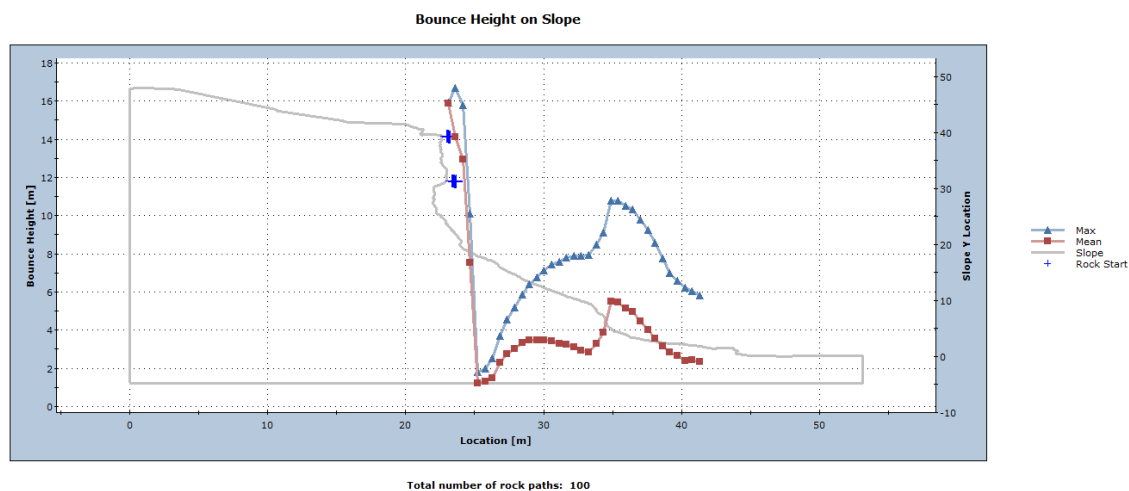
Barijera se dimenzionira iterativnim postupkom definiranja lokacije izvedbe, geometrije u vidu visine i kuta izvedbe s obzirom na horizontalu te energetske kapaciteta. Optimalna lokacija izvedbe barijere se odabire na temelju dijagrama visine putanje i ukupne kinetičke energije modela odrona prikazanim u poglavlju 6.2..

Kao zaštita od odrona krutog bloka može se realizirati izvedbom vertikalne fleksibilne barijere u podnožju kosine, na udaljenosti od približno 8 metara od ceste. Odabrana optimalna lokacija izvedbe barijere na modelu odrona krutog bloka prikazana je na slici 38.

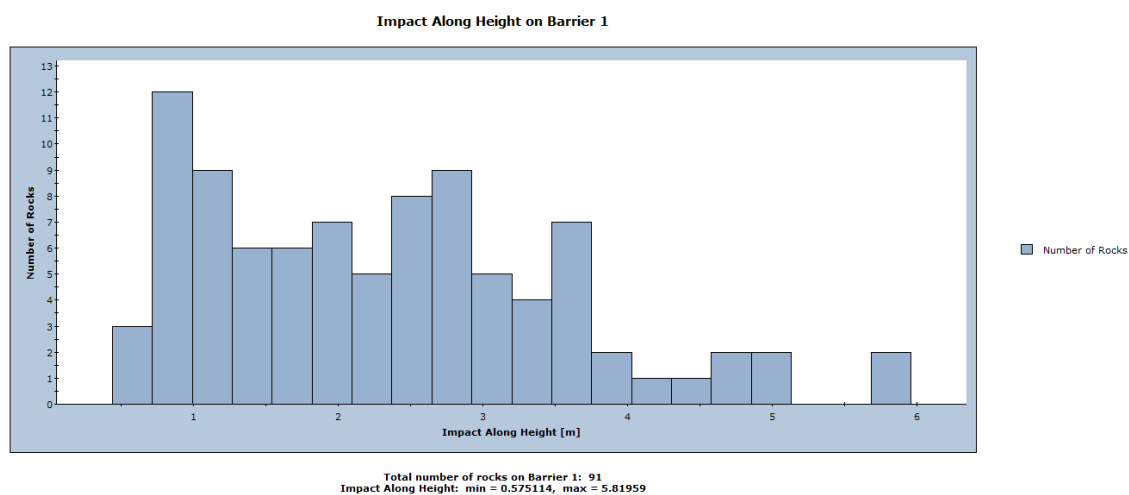


Slika 38: Model odrona krutog bloka presretnutog barijerom GBE-1000A

Da bi barijere bila efikasna na definiranoj lokaciji izvedbe potrebno je da bude vertikalna i visoka 6 metara. Sa dijagrama visine putanje odrona krutog bloka prikazanog na slici 39 može se iščitati da je maksimalna očekivan visina udara na barijeri definirane geometrije 5,82 metara, a najmanja 0,58 metara. Raspodjela vjerojatnosti visine udara odrona krutog bloka na barijeri prikazana je histogramom na slici 40.

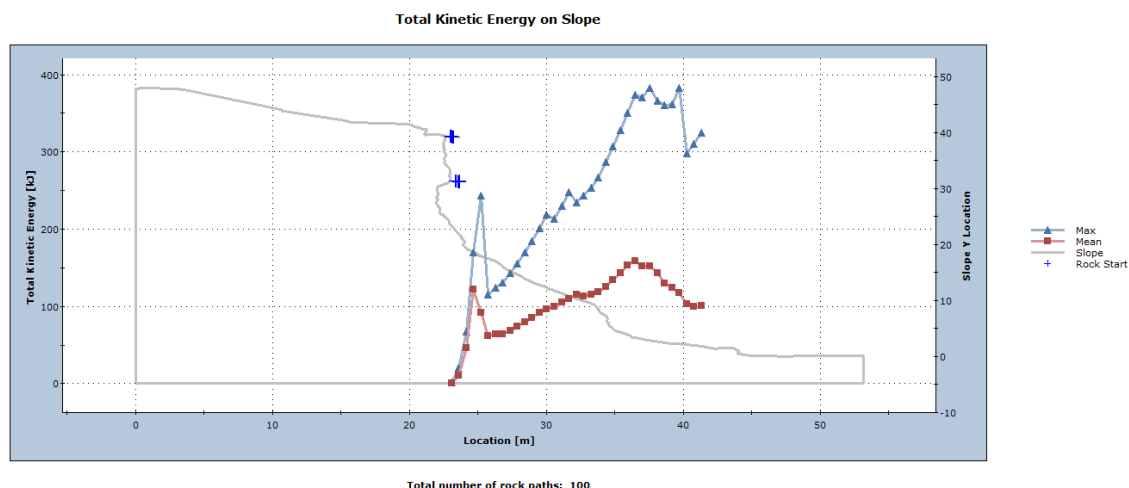


Slika 39: Dijagram visine putanje odrona krutog bloka do barijere GBE-1000A



Slika 40: Histogram učestalosti visine udara odrona krutog bloka na barijeri GBE-1000A

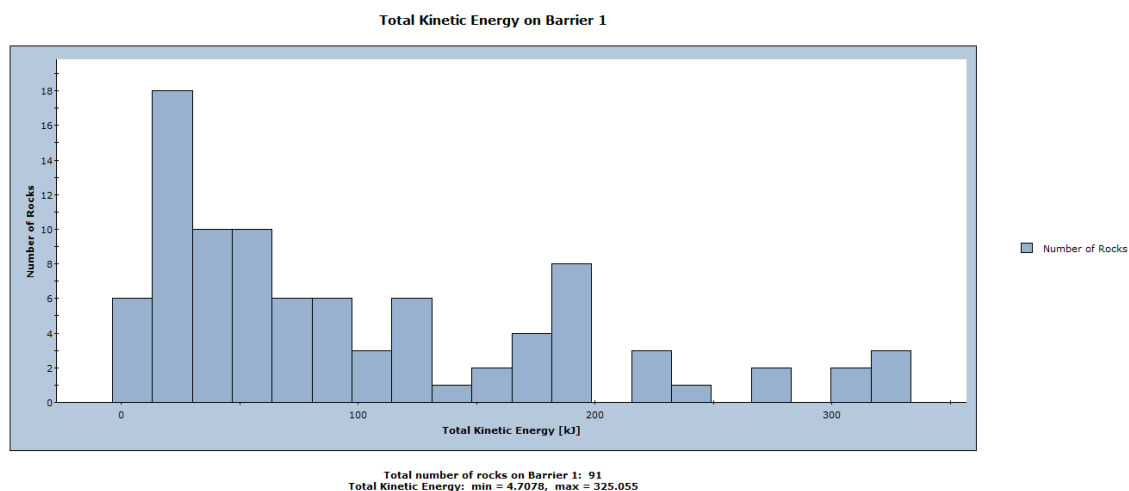
Vrsta barijere definirana je na temelju dijagrama energije odrona krutog bloka prikazanog na slici 41. Sa dijagrama je moguće iščitati da je maksimalna energija udara odrona krutog bloka na barijeri 325,06 kJ, a minimalna 4,71 kJ. Na temelju maksimalne očekivane energije udara odrona krutog bloka odabrana je barijera GBE-1000A tvrtke Geobrugg. Granica uslužnog energetskeg kapaciteta barijere GBE-1000A je 357 kJ, dok je granica krajnjeg energetskeg kapaciteta 1001,6 kJ.



Slika 41: Dijagram energije odrona krutog bloka do barijere GBE-1000A

Razlikuju se uslužna ili radna i krajnja granica energetske kapaciteta barijere. Barijera će podnijeti udarno opterećenje bez oštećenja sve dok je u granicama uslužne energije udara. Odron energije veće od uslužne i manje od krajnje granice energetske kapaciteta barijere bit će zaustavljen no prouzročit će štetu na barijeri. Sanacijom štete, barijera se ponovno može vratiti u upotrebu. Odron energije veće od krajnje granice energetske kapaciteta barijere rezultirat će rušenjem barijere [3].

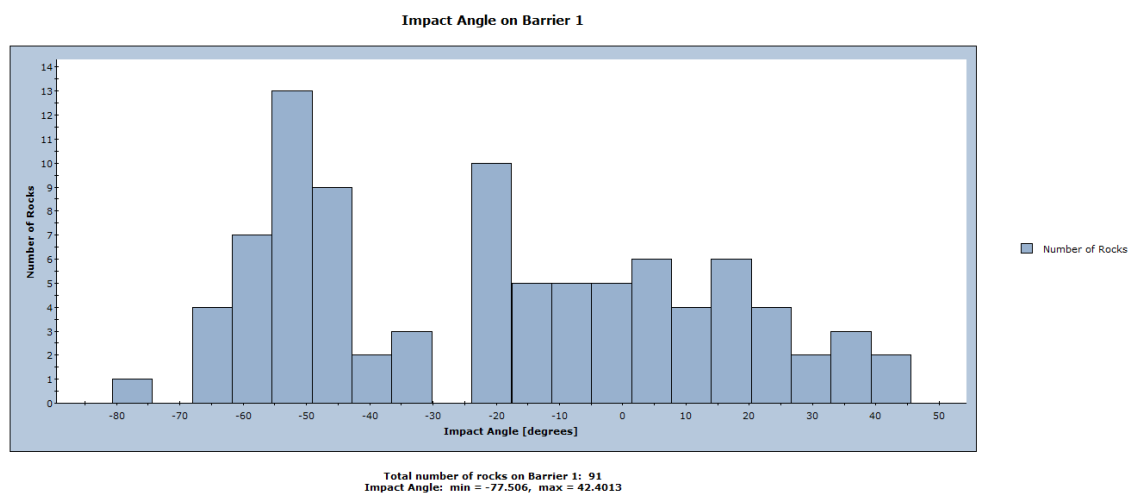
Maksimalna očekivana udarna energija odrona krutog bloka na barijeri GBE-1000A u granicama je uslužnog energetske kapaciteta, što znači da barijera pri tom opterećenju neće biti oštećena. Raspodjela vjerojatnosti energije udara odrona krutog bloka na barijeri prikazana je histogramom na slici 42.



Slika 42: Histogram učestalosti energije udara odrona krutog bloka na barijeri GBE-1000A

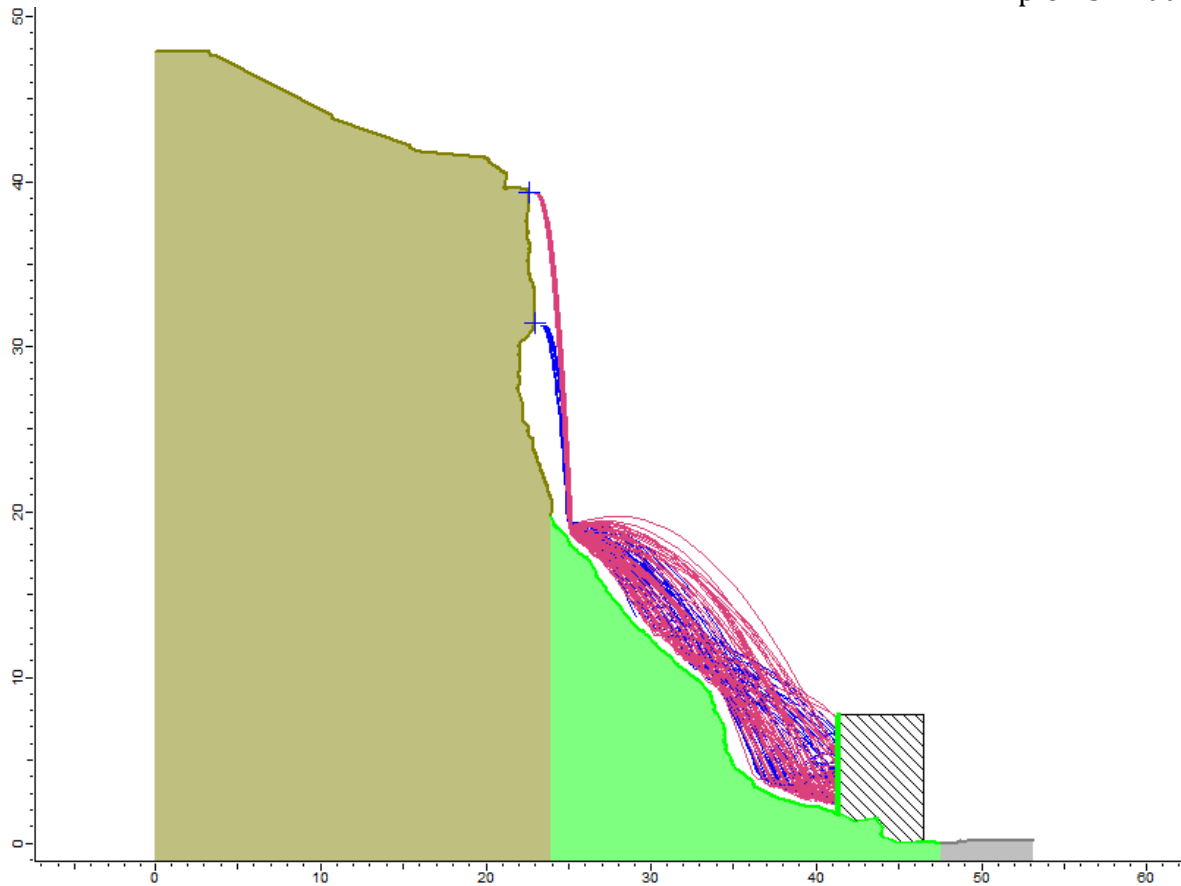
Ukoliko bi se odabrale barijere GBE-500A dio vjerojatnih modela odrona krutog bloka imali bi energiju veću od uslužne (185 kJ) i manju od krajnje (504 kJ) granice energetske kapaciteta odabrane barijere. Drugim riječima, jedan dio vjerojatnih modela odrona krutog bloka bili bi zaustavljeni, no prouzročili bi štete na barijeri GBE-500A koje bi bilo potrebno sanirati za daljnju upotrebu barijere.

Iz histograma učestalosti kuta udara odrona krutog bloka na barijeri GBE-1000A prikazanog na slici 43 može se primijetiti da dimenzionirana barijera može u potpunosti zaustaviti odron ili ga preusmjeriti uzbrdo u zaustavno područje. Potpuno zaustavljanje odrona krutog bloka uslijedit će pri vrlo strmom kutu udara, dok će se pri kosom kutu udara preusmjeriti.



Slika 43: Histogram učestalosti kuta udara odrona krutog bloka na barijeri GBE-1000A

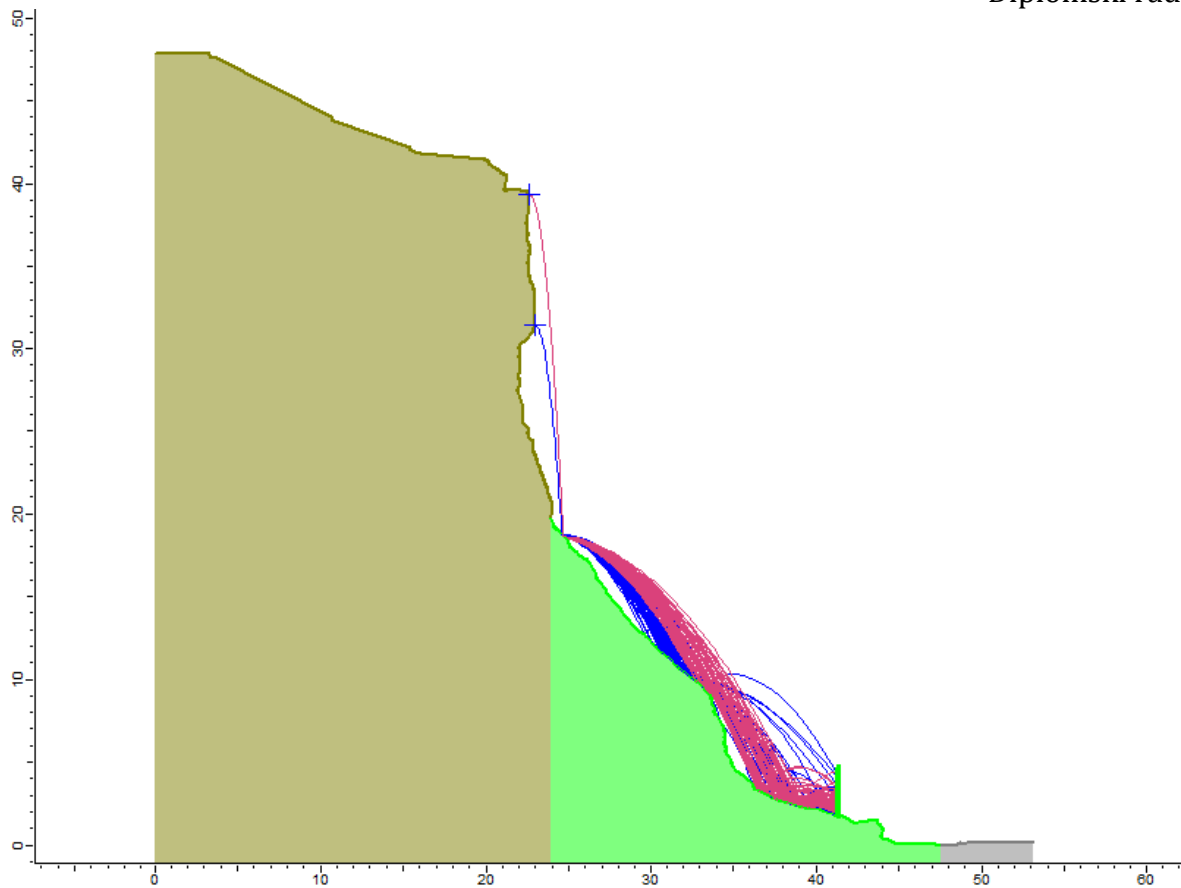
Barijera bi mogla biti manjeg energetske kapaciteta te manje visine kad bi se postavila bliže prometnici. Razlog pozicioniranja na definiranoj udaljenosti od ceste je dopuštena deformacija mreže barijere GBE-1000A koja je prikazana na slici 44. U slučaju pozicioniranja barijere na manjoj udaljenosti otklon mreže ulazio bi u prometni profil ceste.



Slika 44: Dopuštena deformacija (otklon) mreže barijere GBE-1000A

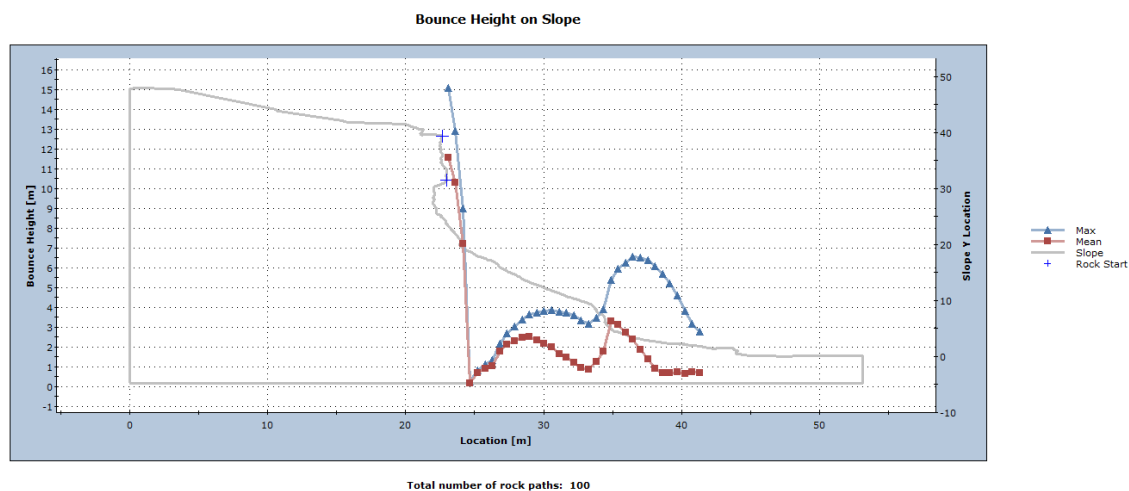
Za zaštitu od odrona sjedinjene mase ista barijera GBE-1000A može bit izvedena na istoj lokaciji, no u pola manje visine. Barijera je dimenzionirana istim postupkom kao i za model odrona krutog tijela.

Optimalna lokacija izvedbe barijere na modelu odrona sjedinjene mase prikazana je na slici 45. Isti uvjet slobodnog prostora za dopuštenu deformaciju mreže barijere GBE-1000A zadovoljen je pri odabiru lokacije izvedbe.

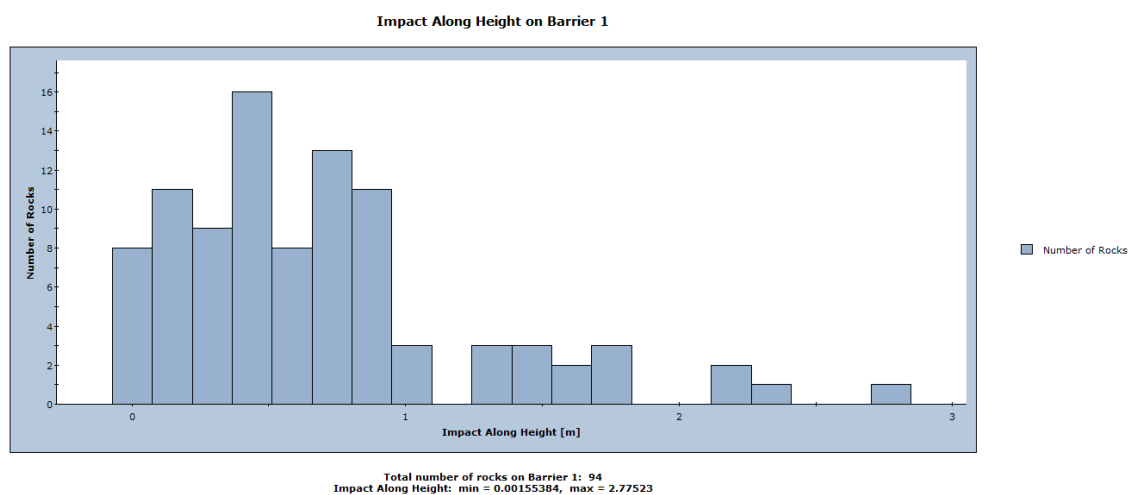


Slika 45: Model odrona sjedinjene mase presretnutog barijerom GBE-1000A

Barijere za zaštitu od modeliranog odrona sjedinjene mase na definiranoj lokaciji izvedbe prema dijagramu visine putanje, prikazanom na slici 46, mora biti visoka 3 metra. Maksimalna očekivana visina udara na barijeri definirane geometrije je 2,78 metara, dok je minimalna visina na samom dnu barijere. Raspodjela vjerojatnosti visine udara odrona sjedinjene mase na barijeri prikazana je histogramom na slici 47. Iz spomenutog histograma očekivane visine udara odrona sjedinjene mase može se iščitati da je veća vjerojatnost niskih visina udara.

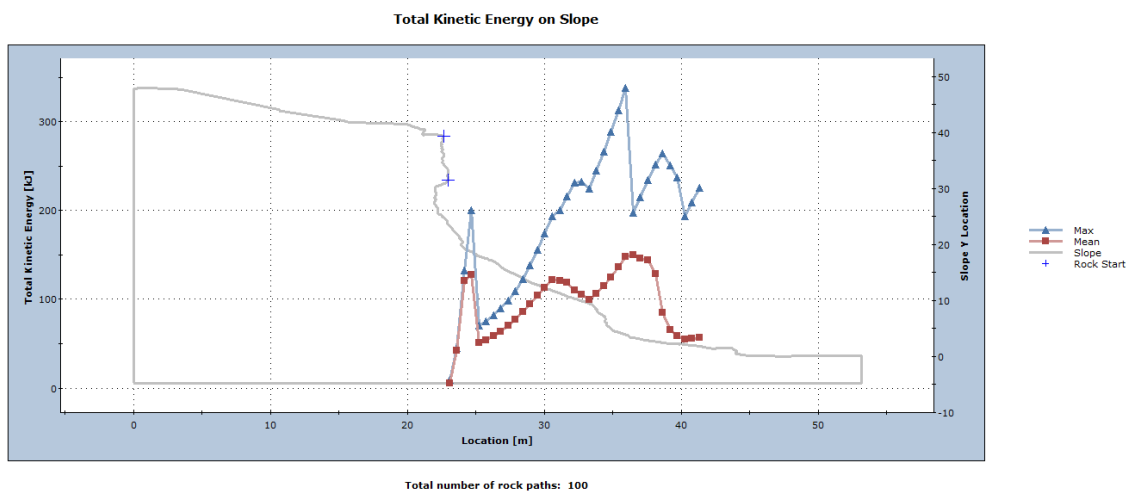


Slika 46: Dijagram visine putanje odrona sjedinjene mase do barijere GBE-1000A

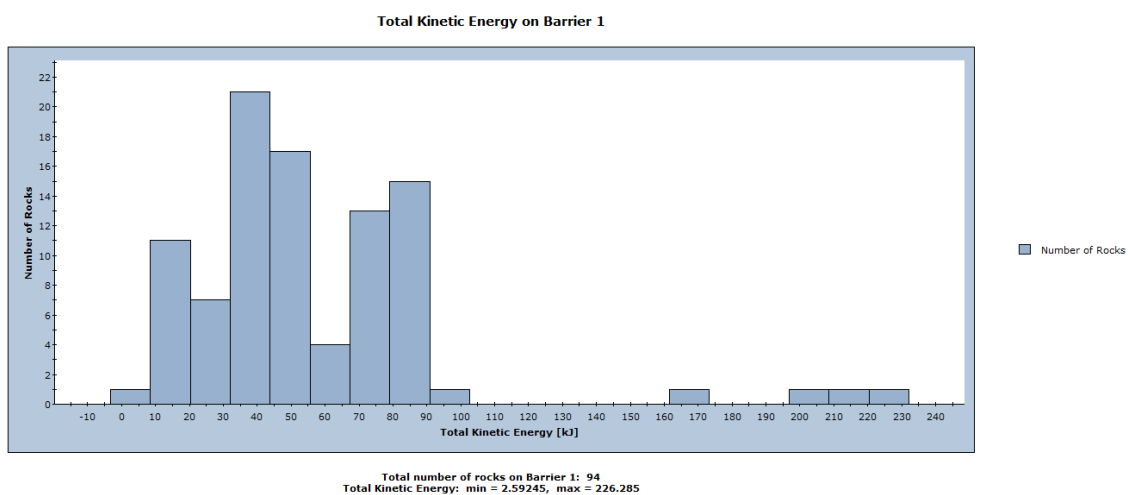


Slika 47: Histogram učestalosti visine udara odrona sjedinjene mase na barijeri GBE-1000A

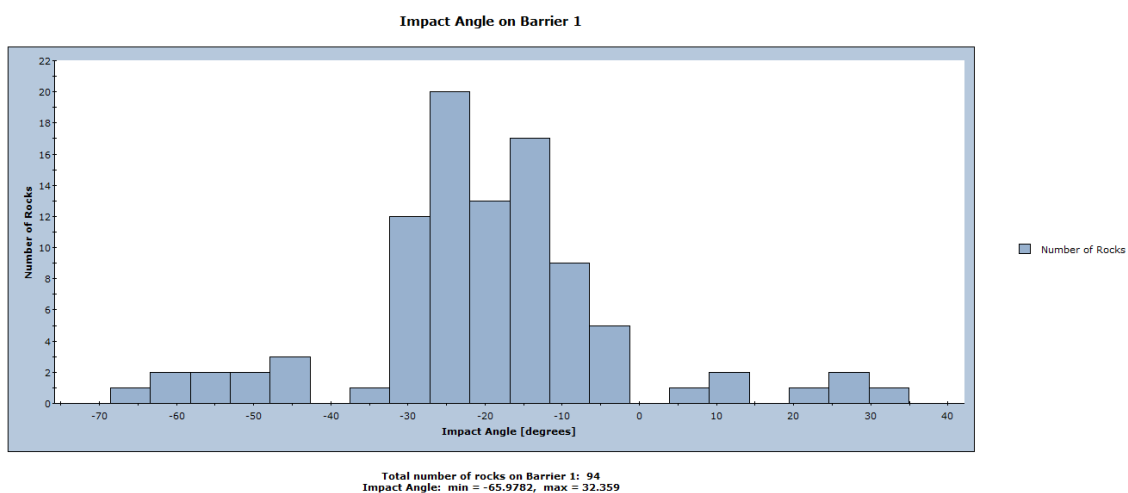
Maksimalna očekivana energija udara odrona sjedinjene mase na dimenzioniranoj barijeri je 226,29 kJ, dok je minimalna 2,6 kJ. Vrijednosti maksimalne i minimalne očekivane energije udara odrona sjedinjene mase na barijeri iščitane su sa dijagrama prikazanog na slici 48. Histogram učestalosti vjerojatnih energije udara odrona sjedinjene mase, prikazan na slici 49, prikazuje da su najučestaliji udari energije manje od 100 kJ. Također, prema učestalosti vjerojatnih kuta udara odrona sjedinjene mase prikazanim histogramom na slici 50 velike su vjerojatnosti kosi udari što će uzrokovati preusmjeravanje odrona te apsorpciju samo djela ukupne kinetičke energije.



Slika 48: Dijagram energije odrona sjedinjene mase do barijere GBE-1000A



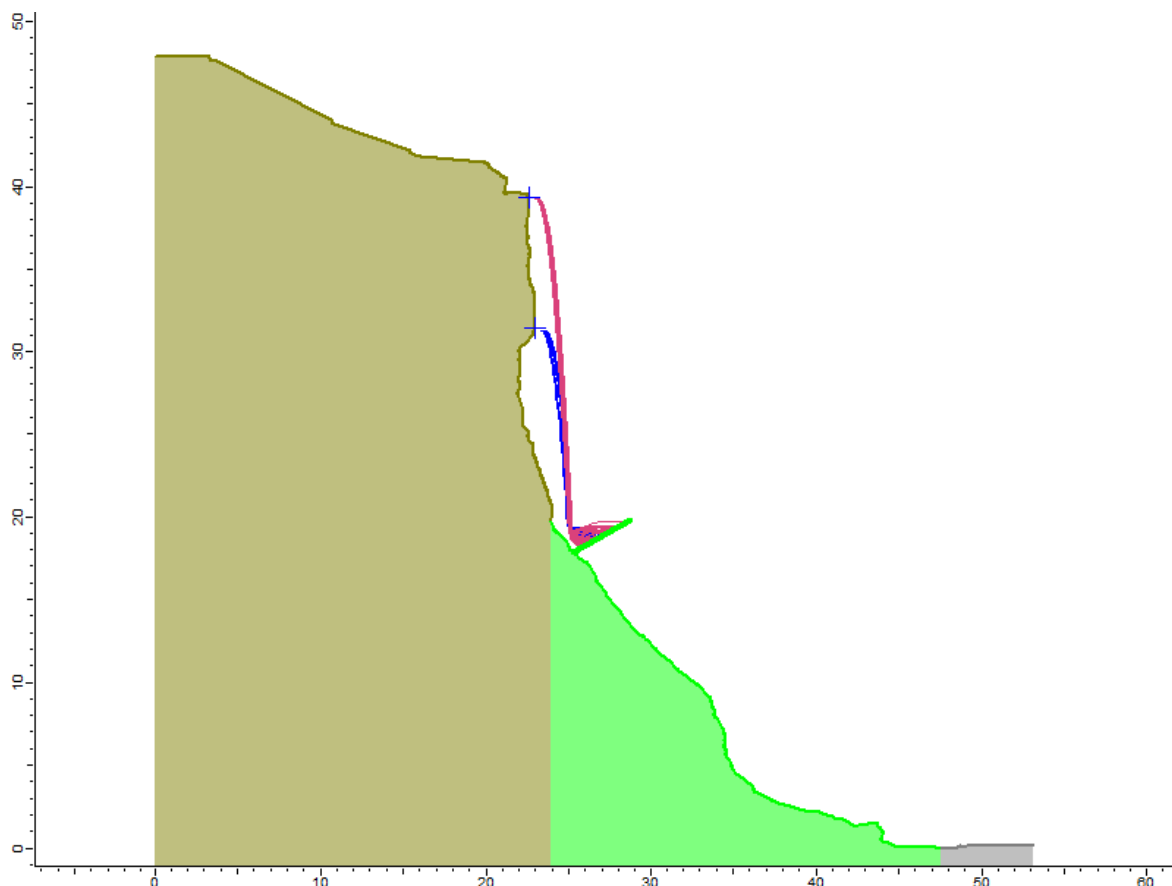
Slika 49: Histogram učestalosti energije udara odrona sjedinjene mase na barijeri GBE-1000A



Slika 50: Histogram učestalosti kuta udara odrona sjedinjene mase na barijeri GBE-1000A

6.3.2. Dimenzioniranje barijere – 2. rješenje

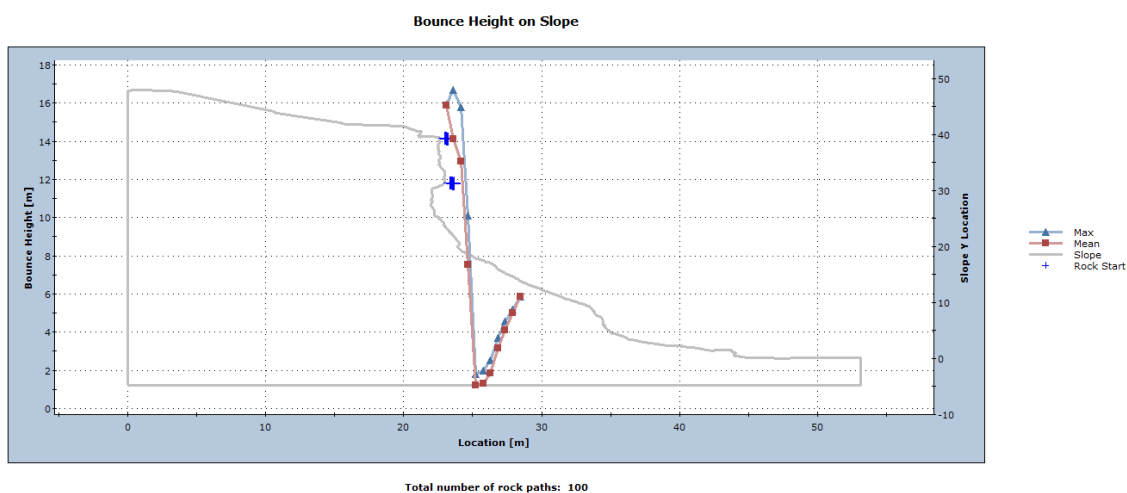
Zaštita od odrona također može biti realizirana nekom drugom solucijom, primjerice razrađenom u ovom poglavlju. Na modelu odrona krutog bloka dimenzionirana je barijere pozicionirana na lokaciji prikazanoj na slici 51. Iterativnim postupkom definiranja visine, kuta i energetske kapaciteta barijere, kao optimalno rješenje odabrana je barijera RXE-500 visine 4 metra postavljene pod kutom od 30°.



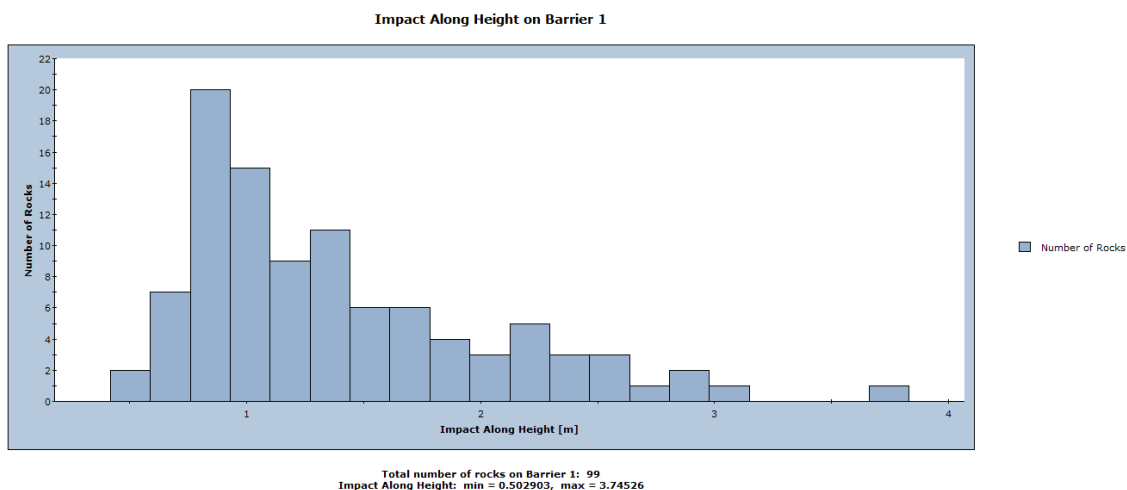
Slika 51: Model odrona krutog bloka presretnutog barijerom RXE-500

Na dijagramima prikazanim na slikama 52 i 54 mogu se iščitati maksimalna i minimalna visina i energija udara duž cijelog profila te na samoj barijeri definirane geometrije i energetske kapaciteta. Na histogramima, prikazanim na slikama 53 i 55, vidi se očekivana učestalost svih vjerojatnih visina i energije udara na dimenzioniranoj barijeri. Maksimalna očekivana energija udara krutog bloka na barijeri RXE-500 definirane geometrije je 119,69 kJ, a minimalna 13,98 kJ. Uslužni energetske kapacitet barijere RXE-500 je 183 kJ, prema čemu bi barijera trebala izdržati sve očekivane udare odrona bez oštećenja. Histogram sa slike 56 prikazuje

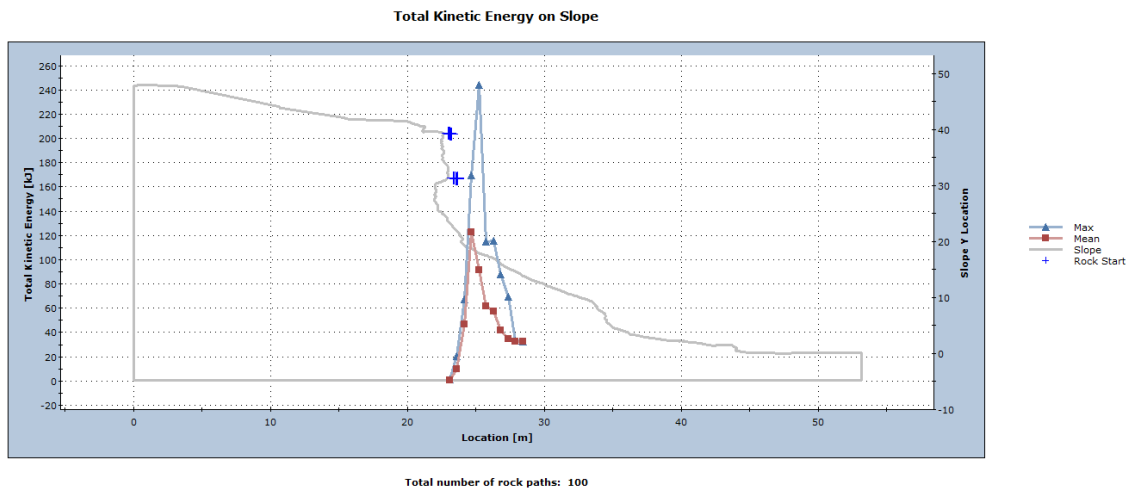
učestalost kuta udara odrona krutog bloka u rasponu od 5 do 70°, prema čemu se može zaključiti da će barijera dio očekivanih odrona zaustaviti a dio preusmjeriti. Maksimalna očekivana visina udara odrona krutog bloka na barijeri RXE-500 definirane geometrije je 3,75 metara. Geometrija i energetski kapacitet barijere RXE-500 zadovoljavaju sve uvjete zaštite od modeliranog odrona krutog bloka.



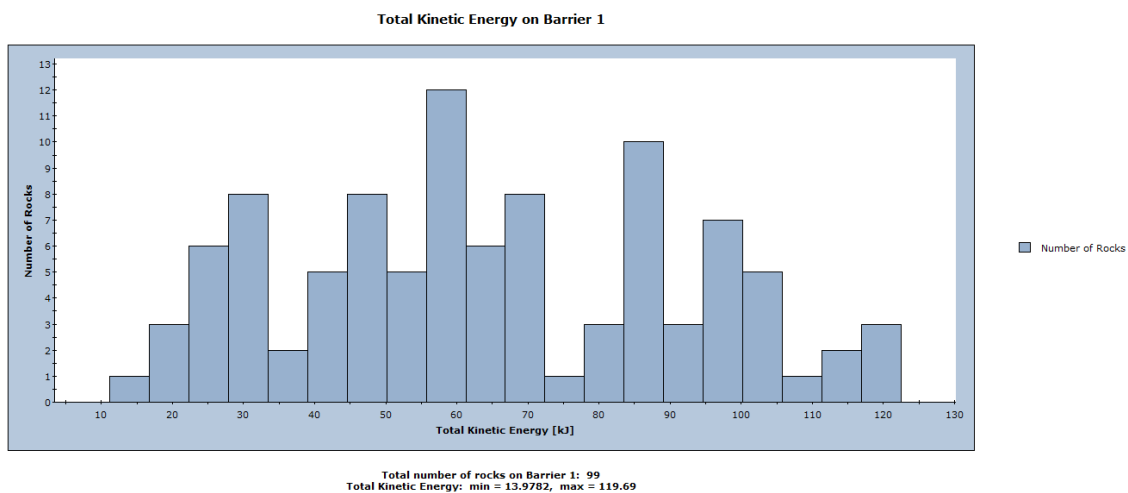
Slika 52: Dijagram visine putanje odrona krutog bloka do barijere RXE-500



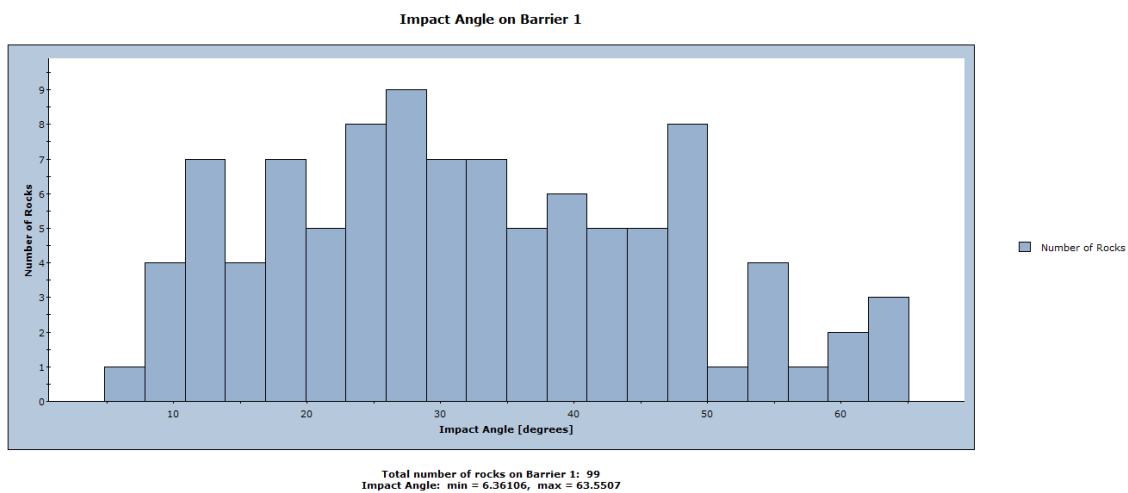
Slika 53: Histogram učestalosti visine udara odrona krutog bloka na barijeri RXE-500



Slika 54: Dijagram energije odrona krutog bloka do barijere RXE-500



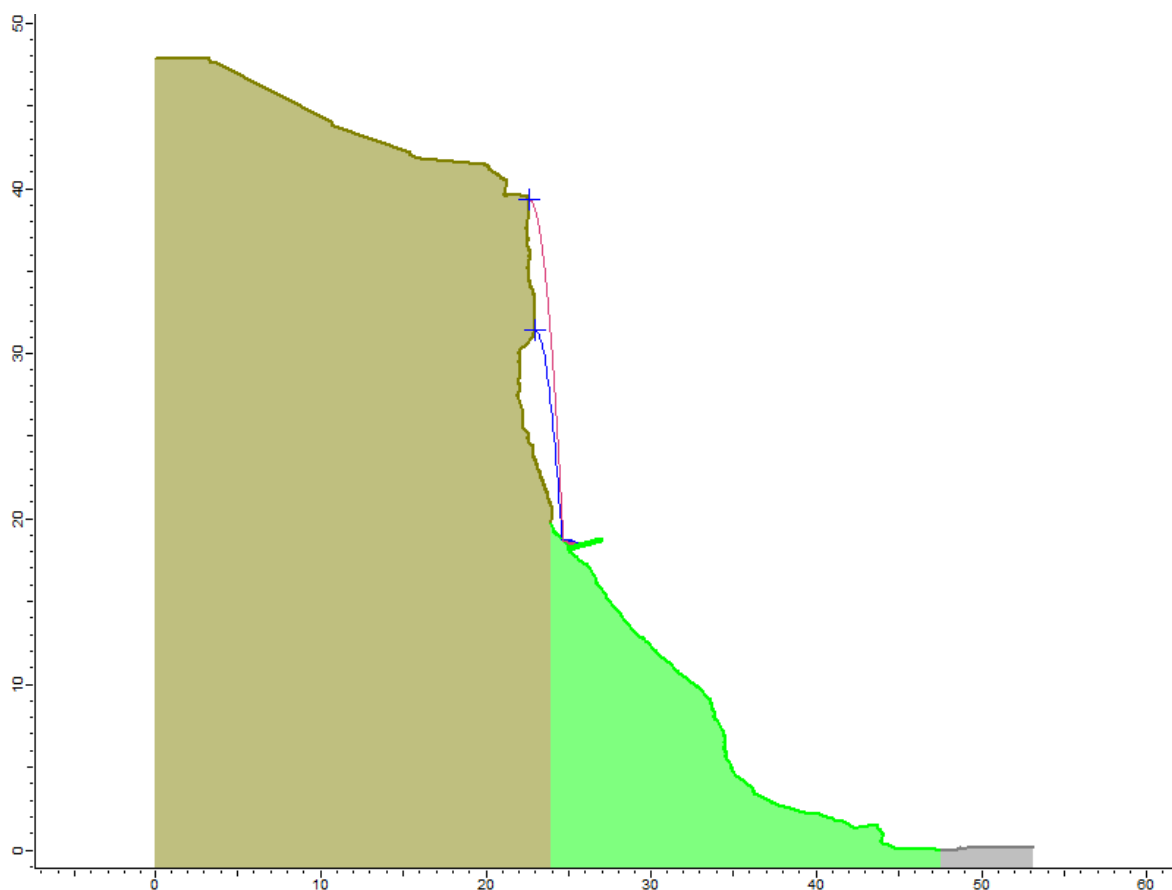
Slika 55: Histogram učestalosti energije udara odrona krutog bloka na barijeri RXE-500



Slika 56: Histogram učestalosti kuta udara odrona krutog bloka na barijeri RXE-500

Zaštita od odrona u vidu galerije od žičane mreže dimenzionirana je i za model odrona sjedinjene mase. Optimalna lokacija izvedbe ovog tipa zaštite ista je kao i kod modela odrona krutog bloka, te je prikazana na slici 57. Također na toj je lokaciji izvedbe potrebna barijera RXE-500. Razlika je prema tome samo u geometriji, koja se očituje u visini od 2 metra te kutu izvedbe s obzirom na horizontalu od 15° .

Kada bi barijera za zaštitu od odrona krutog bloka bila postavljena pod kutom od 15° bila bi zadovoljavajuća tek sa svojih 6 metara visine. Zbog redukcije visine barijere dimenzionirana je na izvedbu pod kutom od 30° , što je potrebnu visinu reduciralo u pola.

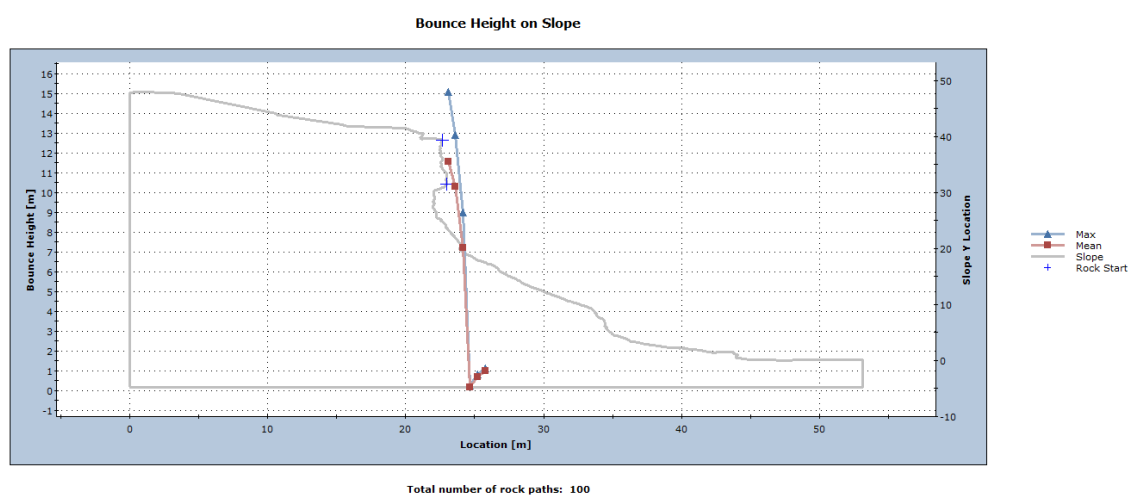


Slika 57: Model odrona sjedinjene mase presretnutog barijerom RXE-500

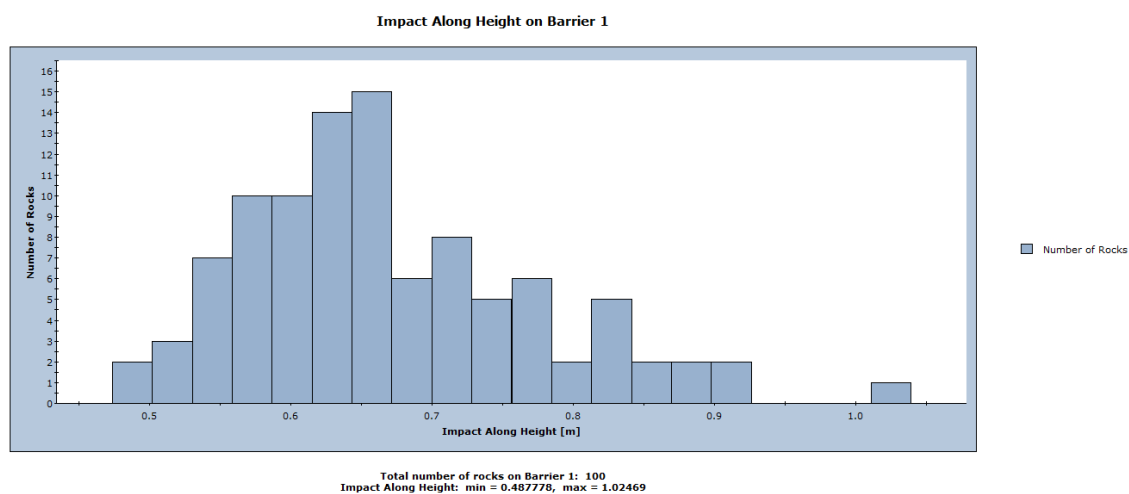
Istim postupkom kao i za prijašnje modele, iz dijagrama prikazanih na slikama 58 i 60 definirane su maksimalna visina i energija udara na dimenzioniranoj barijeri. Te su vrijednosti samo potvrda da ulaze u granice dimenzionirane visine i energetske kapaciteta. Maksimalna očekivana visina udara odrona sjedinjene mase na barijeri RXE-500 je 1 metar, dok je maksimalna očekivana energija 74,4 kJ.

Histogrami na slikama 59 i 61 prikazuju učestalost raspodjele vjerojatnosti visine i energije udara sjedinjene mase na dimenzioniranoj barijeri. Može se primijetiti da je barijera možda predimenzionirana jer je iskorišteno tek polovica visine i kapaciteta energije.

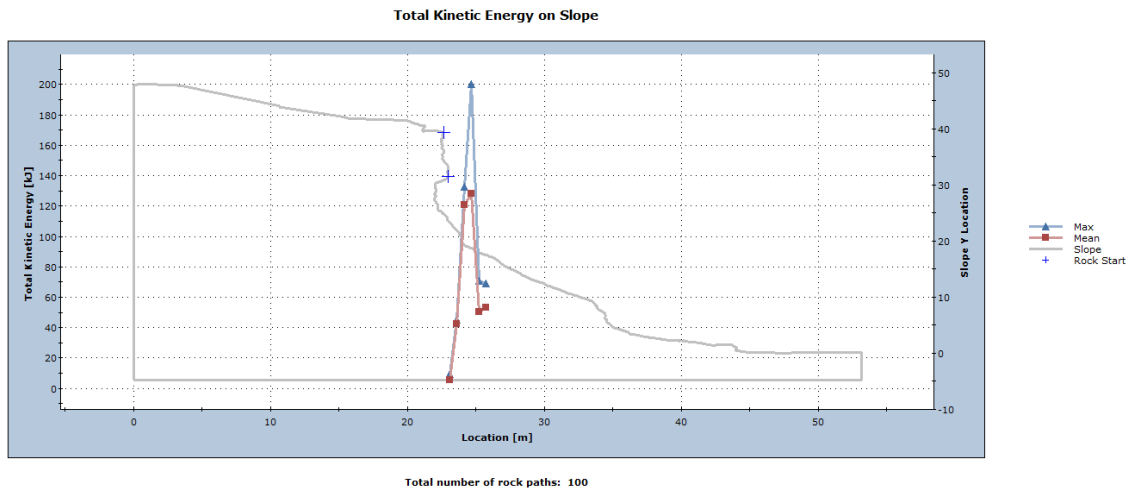
Iz histograma učestalosti kuta udara odrona sjedinjene mase prikazanog na slici 62 može se iščitati učestalost kosog kuta udara u rasponu od 42 do 59°. Iz toga se može pretpostaviti da će barijera apsorbirati samo dio energije udara vjerojatnih modela odrona.



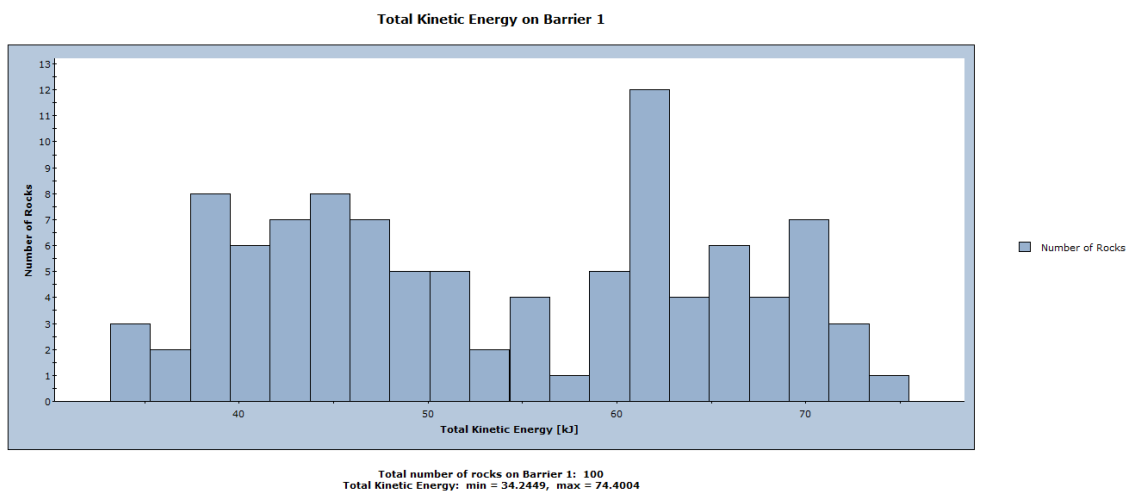
Slika 58: Dijagram visine putanje odrona sjedinjene mase do barijere RXE-500



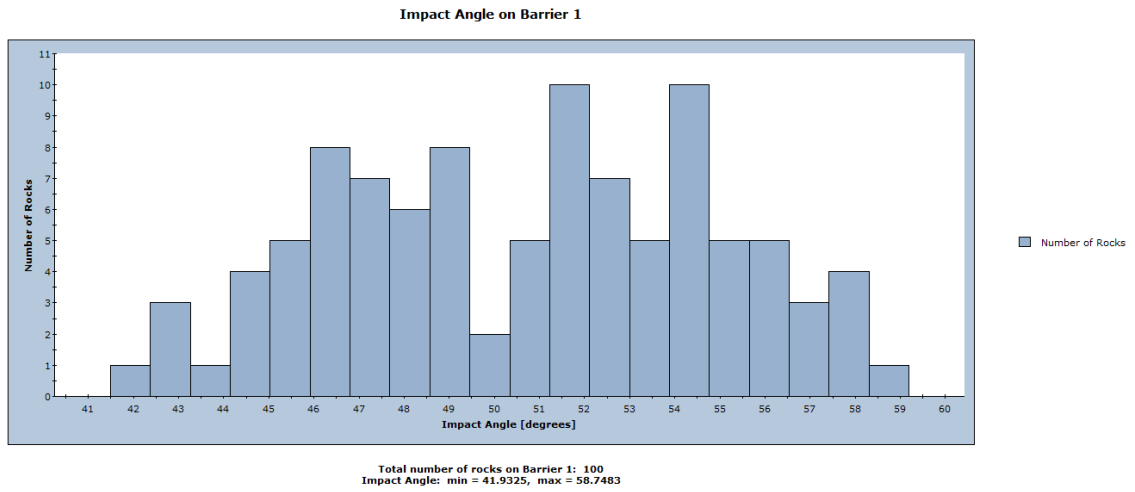
Slika 59: Histogram učestalosti visine udara odrona sjedinjene mase na barijeri RXE-500



Slika 60: Dijagram energije odrona sjedinjene mase do barijere RXE-500



Slika 61: Histogram učestalosti energije udara odrona sjedinjene mase na barijeri RXE-500



Slika 62: Histogram učestalosti kuta udara odrona sjedinjene mase na barijeri RXE-500

7. ZAKLJUČAK

Sam pojam odrona prvi put se spominje sredinom 1830. godine. Prve zaštite od odrona bile su primijenjene uz željeznicu zbog čega su bile izvedene od čeličnih tračnica, drvenih greda, zemlje, odnosno od svega što se je našlo pri ruci. Strukture su pretežito bile krute [14].

Odron je trenutna nestabilnost koja se odvija po površini diskontinuiteta duž koje uglavnom nema smicanja, te je kao takav vrlo opasan. Posljedice odrona mogu biti razarajuće i opasne po ljudski život te je potrebno ukoliko je rizik veliki primijeniti adekvatnu zaštitu. Zaštita od odrona može biti izvedena kao aktivna ili pasivna. Aktivna zaštita sprječava pojavu nestabilnosti, dok pasivna sprječava posljedice koje nestabilnost može izazvati. U današnje se vrijeme sve više teži izvedbi fleksibilnih struktura pasivne zaštite, koje se svojom elastičnom i plastičnom deformacijom opiru opterećenju odrona. Da bi se uopće dimenzionirala pasivna zaštita od odrona potrebno je poznavati samu nestabilnost odrona, mehanizam njegovog kretanja, karakteristike i proračun. Odron svoje kretanje započinje mehanizmom slobodnog pada, koji se nakon prvog udara u kosinu mijenja u mehanizme odskakivanja, kotrljanja i klizanja. Odron se prema pojednostavljenom proračunu u kojem se zanemaruje otpor zraka tijekom putanje i pomak stijenskog bloka tijekom udarnog kontakta proračunava algoritmom kosog hitca i algoritmom klizanja. Koeficijent restitucije je parametar koji definira promjenu izazvanu udarom stijenskog bloka u kosinu. Promjena izazvana udarom najviše ovisi o kutu udara, materijalu površine kosine te njegovim apsorpcijskim svojstvima.

Provedeno je modeliranje odrona na profilu stijenske kosine uz državnu cestu DC3, točnije uz njezinu dionicu Orehovica – Školjić, na lokaciji Banska Vrata (Rijeka). Modeliranje je provedeno prema modificiranoj metodi sjedinjene mase i metodi diskretnih elemenata – kruto tijelo. Metoda sjedinjene mase definira tijelo odrona kao točku u kojoj je koncentrirana definirana masa i početna brzina. Modificirana metoda sjedinjene mase se također temelji na toj pretpostavci, no pri proračunu rotacijske gdje je oblik tijela važno poznavati tijelo definira kao kružnicu radijusa r proračunatog iz ulaznih parametara mase i gustoće materijala stijenske mase. Metoda diskretnih elemenata – kruto tijelo definira približno točan oblik bloka stijenske mase

zbog čega su rezultati modeliranja mjerodavniji. Dimenzije i masa odrona definira se iz terenske analize ili danas sve više korištene analize digitalnih modela terena kao što je slučaj u analizi provedenoj u sklopu rada. Setovi nepovoljno orijentiranih diskontinuiteta, njihov razmak i postojanost mogu dati predodžbu moguće veličine odrona koji se očekuje. RocFall program korišten za modeliranje provodi dvodimenzionalnu analizu odrona, te je unutar njega moguće dimenzionirati i zaštitnu barijeru. Prikazani su rezultati modeliranja odrona te je moguće primijetiti kako oblik bloka stijene ima veliku ulogu u visini odskoka a samim time i u dimenzioniranju visine barijere. Visine barijera modeliranih na modelu diskretnih elemenata – kruto tijelo su duplo veće od visine barijera modeliranih na modelu modificirane sjedinjene mase. Razlika u energiji nije toliko značajna. Prema objema metodama odabrane su barijere istog energetske kapaciteta. Postoje razni proizvođači koji definiraju svoje tipove barijera, Geobrugg je jedna od takvih tvrtki čije barijere GBE-1000A i RXE-500 su primijenjene kao pasivna zaštita na analiziranom profilu stijenske kosine.

Barijere se dimenzioniraju iterativnim postupkom definiranja pozicije i kuta izvedbe te potrebne visine i energetske kapaciteta barijere.

Za lakši odabir primjerene zaštite od odrona bitno je poznavanje njezinih karakteristika te uvjeta u kojim je moguće i/ili poželjno ih primijeniti.

LITERATURA

- [1] Arbanas, Ž., Stabilnost kosina, Skripta sa predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2019/2020.
- [2] Wyllie, D.C., Rock Fall Engineering, CRC Press, Boca Raton, 2014.
- [3] Lambert S., Nicot F., Rockfall Engineering, ISTE - WILEY, London - Hoboken, 2011.
- [4] Dugonjić Jovančević, Sanja, Inženjerska mehanika stijena, Interna skripta Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, 2016/17, Materijali s predavanja
- [5] Giani G. P., Rock Slope Stability Analysis, A. A. Balkema, Rotterdam, 1992.
- [6] Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., and Jaboyedoff, M., Rockfall characterisation and structural protection – a review, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2617–2651, 2011.
- [7] Bertolo, P., Oggeri, C., Peila, D., Full-scale testing of draped nets for rock fall protection, NRC Research Press, Canadian Geotechnical Journal, 46(3), 306-317, 2009.
- [8] Lambert, S., Bourrier, F., Design of rockfall protection embankments: A review, ELSEVIER, Engineering Geology, Pages 77-88, 2013.
- [9] Cała, M., Flum, D., Roduner, A., Rügger, R., Wartmann, S., TECCO® Slope Stabilization System and RUVOLUM® Dimensioning Method, AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, Romanshorn, 2020.
- [10] Cerro, M., Giacchetti, G., Lelli, M., Grimod, A., & Arul, A., Hybrid rockfall barrier — new design methodology based on the Colorado full-scale test experience, , Australian Centre for Geomechanics, in PM Dight (ed.), Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference, Perth, pp. 393-406, 2016.
- [11] Yoshida, H., Nomura, T., Wyllie, D.C., & Morris A.J., Rock fall sheds – application of Japanese designs in North America, Semantic Scholar, Proceedings of the 1st North American Landslide Conference, 179-196, 2007.
- [12] Xu, H., Gentilini, C., Yu, Z., Qi, X., Zhao, S., An energy allocation based design approach for flexible rockfall protection barriers, Elsevier, Engineering Structures, Pages 831-852, 2018.

- [13] Arbanas Željko, Sanacija stijenskih pokosa glavni i izvedbeni projekt, Rijeka, 2004.
- [14] Grošić, M., Arbanas, Ž., Udovič, D., Designing and constructing rockfall barriers – Experiences in Republic of Croatia, Eurock 2009, Rock Engineering in Difficult Ground Conditions – Soft Rocks and Karst, 1, 2009.
- [15] Dugonjić Jovančević Sanja, Inženjerska mehanika stijena, Prezentacija sa predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2018/2019.
- [16] Fanos, A.M., Pradhan, B., Laser Scanning Systems and Techniques in Rockfall Source Identification and Risk Assessment: A Critical Review, Springer-Verlag, Earth Systems and Environment 2(1), 2018.
- [17] Jaboyedoff, M., Dudt, J.P., Labiouse, V., An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree, European Geosciences Union, Natural Hazards and Earth System Sciences (NAT HAZARD EARTH SYS) 5, 621–632, 2005.
- [18] Berna, Güntel, Altay, Acar, Rockfall Modelling with Remedial Design and Measures along Part of a Mountainous Settlement Area, Southern Turkey, IOP Publishing, Earth and Environmental Science 44, 2016.
- [19] Google Earth,
<https://earth.google.com/web/@45.33567104,14.46282915,101.20610266a,422.04475422d,35y,-147.78929199h,64.40432525t,0r>, pristup 15.02.2021.