

Zaštita od odrona u stijenskoj masi

Hribar, Dolores

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:157:736336>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



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**

Dolores Hribar

Zaštita od odrona u stijenskoj masi

Diplomski rad

Rijeka, 2019.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij
Geotehnika
Stabilnost kosina**

**Dolores Hribar
JMBAG: 0082047854**

Zaštita od odrona u stijenskoj masi

Diplomski rad

Rijeka, studeni 2019.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam 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.

Dolores Hribar

U Rijeci, 05. studenog 2019.

Zahvala:

Veliku zahvalu dugujem mentoru prof.dr.sc. Željku Arbanasu koji mi je svojim stručnim savjetima pomogao pri izradi ovog diplomskog rada te što je imao strpljenja i vremena za brojne upite. Njegov odnos prema studentima i suradnicima će mi uvijek poslužiti kao primjer izvrsnosti u životu.

Također, zahvaljujem se cijeloj svojoj obitelji i bliskim prijateljima koji su uvijek bili uz mene i bez kojih cijelo putovanje kroz studij ne bi bilo tako jednostavno i zabavno.

Posebnu i najveću zahvalnost iskazujem svojim roditeljima i očuhu koji su uvijek tu uz mene, bez obzira da li se radi o teškim ili sretnim trenucima, koji me podržavaju u svim avanturama i aktivnostima te bez kojih sve ovo što sam dosad postigla ne bi bilo moguće.

Naposljetku, hvala Rafaelu na konstantnoj podršci i naporima da me potakne na pisanje rada, te što se zajedno sa Kelly naspavao i za mene.

Velika HVALA!

Zaštita od odrona u stijenskoj masi

Sažetak

Cilj ovoga rada je definirati osnovne pojmove odrona stijenske mase, opisati faktore koji uzrokuju nastanak odrona, algoritme prema kojima se računa trajektorija odronjenog bloka te energija udara. Nakon što su poznati navedeni podaci pristupa se odabiru adekvatnih mjera zaštite od odrona. Analiza nestabilnih blokova se najčešće provodi u specijaliziranim računalnim programima koji simuliraju trajektorije i energije udara odronjenog materijala. Pomoću programa Rockfall, verzija 6.1 (Dr.R.M. Spang, Dr. Ing. B. Romunde) izvršena je analiza varijantnog rješenja sanacije županijske ceste ZC6034 na lokaciji Radljevac u blizini Knina, gdje je odabrana metoda zaštite pomoću fleksibilnih barijera.

***Ključne riječi:** odron, stijenska masa, hazard odrona, mjere zaštite od odrona, barijere za zaštitu od odrona, zaštitne mreže, inženjerskogeološka istraživanja*

Rockfall protection measures

Abstract

The aim of this thesis is to define basic terms of rockfall, their influencing factors and calculated algorithms according to a trajectory of the fallen rock mass and impulse. Once the all information is known, the selection of adequate protection measures is initiated. Analysis of unstable rock mass is often carried out by specialized computer programs which can simulate rockfall trajectories and impulse. Using the Rockfall, version 6.1 (Dr.R.M. Spang, Dr. Ing. B. Romunde) software, rockfall analyses and applied protection measures are given for project of remediation on the road ZC6034 near city of Knin, with the flexible rockfall barriers chosen as one of the possible protection measure.

***Abstract keys:** rockfall, rock mass, rockfall hazard, rockfall protection measures, rockfall protection barriers, rockfall protection nets, engineering-geological investigation*

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. IDENTIFICIRANJE NESTABILNOSTI KOD ODRONA	2
2.1. Topografija terena.....	2
2.2. Geološki uvjeti.....	4
2.3. Klimatski uvjeti.....	11
2.4. Biološki uvjeti.....	12
2.5. Seizmička aktivnost	12
2.6. Antropogeni uvjeti	13
3. OSNOVNI PARAMETRI PROJEKTIRANJA ODRONA.....	14
3.1. Normalni i tangencijalni koeficijent restitucije	14
3.2. Tangencijalni koeficijent trenja	15
3.3. Hrapavost površine padine.....	15
3.4. Koeficijent trenja kotrljanja	16
4. PRORAČUN STABILNOSTI ODRONA	17
4.1. Algoritam za simulaciju pada stijene.....	18
4.2. Algoritam klizanja	21
4.3. Visina i duljina trajektorije	22
4.4. Kutna brzina.....	24
4.5. Mehanika udara bloka nerotirajućeg krutog tijela	25
4.5.1. Sila i količina gibanja prilikom kolinearnog udara	25
4.5.2. Promjena energije tijekom udara.....	27
4.6. Mehanika udara bloka hrapavog rotirajućeg tijela.....	30
4.6.1. Proračun količine gibanja	30
4.6.2. Brzine tijekom udara odronjenog materijala	31

5.	MJERE ZAŠTITE OD ODRONA	34
5.1.	Krute, fleksibilne i čvrste strukture.....	35
5.1.1.	Količina apsorbirane energije.....	36
5.2.	Vrste mjera zaštite od odrona	37
5.2.1.	Jarci.....	38
5.2.2.	MSE barijere.....	39
5.2.3.	Ograde za detekciju odrona	40
5.2.4.	Mreže za zaštitu pokosa.....	41
5.2.5.	Mlazni beton.....	44
5.2.6.	Barijere	44
5.2.7.	Viseće mreže – atenuatori.....	48
5.2.8.	Galerije	48
5.2.9.	Fleksibilna zaštitna galerija	50
5.3.	Sustavi zaštite u Republici Hrvatskoj	51
6.	PROCJENA HAZARDA OD ODRONA	53
6.1.	Metode procjene hazarda i rizika od odrona.....	53
6.1.1.	Rockfall Hazard Rating System (RHRS)	53
6.1.2.	Colorado Rockfall Hazard Rating System (CRHRS).....	54
6.1.3.	Rock Slope Rating Procedure (RSRP)	54
6.1.4.	Talijanski modificirani RHRS (mRHRS).....	55
6.1.5.	Rockfall Risk Rating for Settlements (R3S2)	55
6.1.6.	Falling Rock Hazard Index (FRHI).....	55
6.1.7.	Rockfall Risk Rating System (RRRS).....	55
6.1.8.	Rock Engineering System (RES)	56
7.	SANACIJA POKOSA NA LOKACIJI RADLJEVAC U BLIZINI KNINA	58
7.1.	Općenito o odronu Radljevac	58
7.2.	Geološka građa	59

7.3.	Hidrogeološke značajke	59
7.4.	Seizmičke značajke	59
7.5.	Inženjerskogeološke i geotehničke značajke	60
7.5.1.	Inženjerskogeološka zona Z3	61
7.5.2.	Inženjerskogeološka zona Z5	63
7.5.3.	Inženjerskogeološka zona Z8	64
7.6.	Analiza nestabilnih blokova.....	66
7.6.1.	Poprečni presjek Z3	66
7.6.2.	Poprečni presjek Z5	69
7.6.3.	Poprečni presjek Z8	72
8.	ZAKLJUČAK.....	76
9.	LITERATURA	78

Popis oznaka i kratica

α [$^{\circ}$] – kut vektora brzine u odnosu na pozitivnu x-os

β – faktor oblika bloka

ε [$^{\circ}$] – kut hrapavosti površine padine

κ – gradijent pokosa

μ – koeficijent trenja

τ_{all} [kPa] – posmično naprezanje veze sidra i injekcijske smjese

ψ – koeficijent kotrljanja odronjenog materijala

ψ_f [$^{\circ}$] – nagib padine

ψ_p [$^{\circ}$] – nagib ravnine klizanja

ψ_s [$^{\circ}$] – nagib padine gledano od nožice strme stijenske padine

θ [$^{\circ}$] – nagib padine

σ_{uc} [MPa] – jednoosna tlačna čvrstoća stijene

$\sigma_{u(r)}$ [MPa] – jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase u blizini bušotine

φ [$^{\circ}$] – kut unutarnjeg trenja

ω [rad/s] – kutna brzina

A [m^2] – površina ravnine po kojoj se događa klizanje

CRHRS – Colorado Rockfall Hazard Rating System

c [kPa] – kohezija tla

D – faktor poremećenosti stijenske mase

Dn – normalno prigušenje

Dt – tangencijalno prigušenje

d_b [m] – promjer bušotine

E_c [kJ] – kinetička energija

F [N] – sila reakcije; sila apsorpcije energije udara

FRHI – Falling Rock Hazard Index

FS – faktor sigurnosti

GSI – geološki indeks čvrstoće

g [m/s^2] – akceleracija sile teže

H [m] – visina pada bloka

h [m] – visina bloka iznad pokosa

h_{max} [m] – najveća visina bloka iznad pokosa

I [kgm^2] - inercija
 I_a [m/s] – Ariasov intenzitet
 $I_{s(50)}$ [MPa] – čvrstoća stijene u točki
 J_v – volumetrijski broj pukotina
 K – polumjer vrtnje
 k – koeficijent trenja i nagiba padine kod algoritma klizanja
 L_s [m] – duljina injektiranog štapnog sidra
 MSE – zemljom mehanički stabilizirane barijere
 $mRHRS$ – talijanski modificirani Rockfall Hazard Rating System
 m [kg] – masa bloka
 m_i – materijalna konstanta
 n – nagib linije krutih struktura u odnosu vrijeme-sila
 O_a [m] – amplituda hrapavosti površine pokosa
 O_f [m] – frekvencija hrapavosti površine pokosa
 OGK – Osnovna geološka karta
 PLT – point load test
 p [kgm/s] – količina gibanja
 p_{CN} [kgm/s] – količina gibanja pri najvećoj kompresiji
 p_N [kgm/s] – normalna komponenta količine gibanja
 p_T [kgm/s] – tangencijalna komponenta količine gibanja
 q [$^\circ$] – nagib pravca
 r [m] – polumjer bloka
 R – koeficijent restitucije
 R_g [$^\circ$] – dinamički kut trenja
 R_h [$^\circ$] – statički kut trenja
 R_N – normalni koeficijent restitucije
 R_T – tangencijalni koeficijent restitucije
 R_w – otpor kotrljanju
 $R3S2$ – Rockfall Risk Rating for Settlements
 $RHRS$ – Rockfall Hazard Rating System
 RMR – Rock Mass Rating
 $RRRS$ – Rockfall Risk Rating System
 $RSRP$ – Rock Slope Rating Procedure
 S [m] – duljina plohe blokova

$S_w [kN]$ – računska čvrstoća sidra
 $s [m]$ – udaljenost koju blok prijeđe klizanjem
 s' – hrapavost površine padine
 T – otpor trenja
 T_{NCR} – povratno razdoblje
 $T_s [kN]$ – sila u sidru
 $t [s]$ – vrijeme
 $V [\%]$ – standardna devijacija
 $V_0 [m/s]$ – početna brzina bloka
 $V_A [m/s]$ – brzina bloka netom poslije udara
 $V_B [m/s]$ – brzina bloka netom prije udara
 $V_b [m^3]$ – volumen bloka
 $V_{EXIT} [m/s]$ – brzina bloka na kraju segmenta kod algoritma klizanja
 $V_i [m/s]$ – brzina odronjenog materijala netom prije udara u strukturu
 $V_{min} [m/s]$ – minimalna brzina
 $V_{NA} [m/s]$ – normalna komponenta brzine bloka netom poslije udara
 $V_{NB} [m/s]$ – normalna komponenta brzine bloka netom prije udara
 $V_{TA} [m/s]$ – tangencijalna komponenta brzine bloka netom poslije udara
 $V_{TB} [m/s]$ – tangencijalna komponenta brzine bloka netom prije udara
 $V_{X0} [m/s]$ – početna horizontalna brzina bloka
 $V_{XA} [m/s]$ – horizontalna brzina bloka netom poslije udara
 $V_{XB} [m/s]$ – horizontalna brzina bloka netom prije udara
 $V_{Y0} [m/s]$ – početna vertikalna brzina bloka
 $V_{YA} [m/s]$ – vertikalna brzina bloka netom poslije udara
 $V_{YB} [m/s]$ – vertikalna brzina bloka netom prije udara
 $W [kg]$ – masa nestabilnog bloka
 $X [m]$ – horizontalna koordinata bloka
 $X_0 [m]$ – horizontalna koordinata početnog položaja bloka
 $X_1 [m]$ – horizontalna koordinata prve krajnje točke pravca
 $X_2 [m]$ – horizontalna koordinata druge krajnje točke pravca
 $Y [m]$ – vertikalna koordinata bloka
 $Y_0 [m]$ – vertikalna koordinata početnog položaja bloka
 $Y_1 [m]$ – vertikalna koordinata prve krajnje točke pravca
 $Y_2 [m]$ – vertikalna koordinata druge krajnje točke pravca

Popis slika

Slika 1: Faktori koji utječu na nestabilnost kosine [4]	2
Slika 2: Konfiguracija kosine sa mehanizmom ponašanja odrona kroz četiri zone [5]	4
Slika 3: Raspucana stijenska masa sa različito orijentiranim setovima diskontinuiteta.....	5
Slika 4: Osnovne geometrijske karakteristike diskontinuiteta [8].....	5
Slika 5: Utjecaj geoloških uvjeta na stabilnost usjeka u stijenskoj masi: potencijalno nestabilan usjek (a), stabilna kosina kojoj je usjek usječen paralelno sa pružanjem slojeva (b), stabilno lice pokosa (c), slom prevrtanjem (d), stvaranje prevjesa u sloju pješčenjaka zbog utjecaja trošenja (e), plitki rotacijski slom u slaboj stijeni sa gustim diskontinuitetima različite orijentacije (f) [9].....	7
Slika 6: Različito blokovita stijenska masa	8
Slika 7: Najčešći oblici blokova [11]	10
Slika 8: Klasifikacija faktora oblika blokova β [12].....	10
Slika 9: Utjecaj smrzavanja vode na stijensku masu [13]	11
Slika 10: Kemijsko djelovanje vode na stijensku masu [14].....	11
Slika 11: Razaranje stijenske mase širenjem korijenja [15]	12
Slika 12: Određivanje osjetljivosti na odrone uslijed potresa [9].....	13
Slika 13: Odnos između kuta hrapavosti ε i polumjera tijela r [5]	16
Slika 14: Mehanizmi gibanja odronjenog materijala.....	17
Slika 15: Algoritam za simulaciju pada stijene [5].....	20
Slika 16: Promjena brzine nakon udara bloka	21
Slika 17: Klizanje prema dolje	22
Slika 18: Odnos kutne brzine i visine pada bloka [5].....	24
Slika 19: Utjecaj pada nepravilnog bloka na kutnu brzinu [5]	25
Slika 20: Sile tijekom udara [5].....	26
Slika 21: Odnos sile i deformacije u točki udara [5]	28
Slika 22: Promjena sile u vremenu i odnos koeficijenta restitucije [5]	28
Slika 23: Promjena normalne i tangencijalne komponente brzine u odnosu sa normalnom količinom gibanja [5]	29
Slika 24: Sile i brzine prilikom udara rotirajućeg tijela u ravninskom gibanju [5].....	32
Slika 25: Kategorije mjera zaštite stijenske mase od odrona	34
Slika 26: Odnos vremena udara i sile stvorene u različitim zaštitnim strukturama [5].....	35

Slika 27: Jarak za hvatanje odrona [3].....	38
Slika 28: MSE barijera [5].....	39
Slika 29: Ograda za detekciju odrona [19]	41
Slika 30: Zaštitna mreža učvršćena betonskim utezima [21]	42
Slika 31: Zaštitna mreža u kombinaciji sa sidrima [22]	42
Slika 32: Nestabilan blok pod zaštitom mreže i sidara [5]	43
Slika 33: Stabilizacija mlaznim betonom (lijevo), mlazni beton u kombinaciji sa sidrima, armaturnom mrežom i procjednicama (desno) [24]	44
Slika 34: Barijera za zaštitu od odrona sa elementima [27]	45
Slika 35: Barijera za zaštitu od odrona (a), prstenasta mreža (b), kočni prsten (c), stup na temeljnoj ploči (d) [27], [30]	47
Slika 36: Viseće mreže – atenuatori [31].....	48
Slika 37: Različite vrste zaštitnih galerija [4].....	49
Slika 38: Odnos deformacije i sile kroz apsorbirajući sloj različitih materijala [5]	50
Slika 39: Apsorbirajući sloj od vreća pijeska na koje je postavljen sloj šljunka [32]	50
Slika 40: Fleksibilna zaštitna galerija [33]	51
Slika 41: Odron na županijskoj cesti ŽC6034, lokacija Radljevac [36].....	58
Slika 42: Karta poredbenih vršnih ubrzanja temeljnog tla tipa A: a) vjerojatnost premašaja 10% u 50 godina za $T_{NCR}=95$ godina; b) vjerojatnost premašaja 10% u 10 godina za $T_{NCR}=475$ godina [36]	60
Slika 43: Istraživano područje podijeljeno po zonama [36]	61
Slika 44: Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase u zoni Z3 [36]	62
Slika 45: Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase u zoni Z5 [36]	64
Slika 46: Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase u zoni Z8 [36]	65
Slika 47: Trajektorija, energija udara blokova, visina odskoka te količina blokova koji su zaustavljeni na određenoj duljini.....	67
Slika 48: Trajektorija, energija udara blokova te visina odskoka tijekom putanje	68
Slika 49: Statističke vrijednosti energije udara u barijeru i visine odskoka.....	69
Slika 50: Trajektorija, energija udara blokova, visina odskoka te količina blokova koji su zaustavljeni na određenoj duljini.....	70
Slika 51: Trajektorija, energija udara blokova te visina odskoka tijekom putanje	71
Slika 52: Statističke vrijednosti energije udara u barijeru i visine odskoka.....	72
Slika 53: Trajektorija, energija udara blokova, visina odskoka te količina blokova koji su zaustavljeni na određenoj duljini.....	73

Slika 54: Trajektorija, energija udara blokova te visina odskoka tijekom putanje	74
Slika 55: Statističke vrijednosti energije udara u barijeru i visine odskoka.....	75

Popis tablica

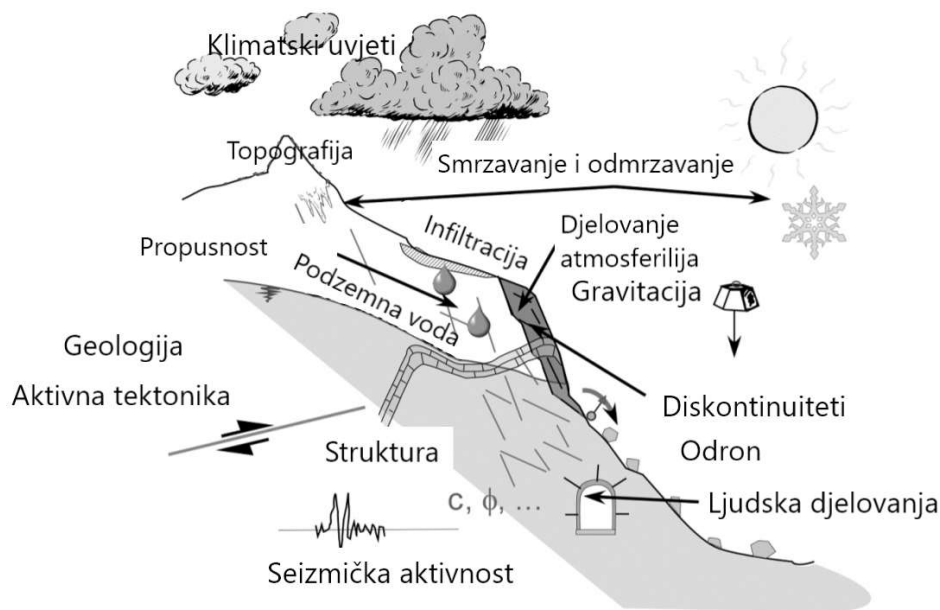
Tablica 1: Raspodjela veličine bloka s obzirom na stupanj razlomljenosti [8].....	8
Tablica 2: Klasifikacija volumetrijskog broja pukotina [11]	9
Tablica 3: Izrazi za volumen i polumjer vrtnje najčešćih oblika blokova [5]	31
Tablica 4: Detaljno ocjenjivanje kod RHRS sustava [3].....	56
Tablica 5: Inženjerskogeološke i geotehničke karakteristike stijenske mase u zoni Z3 [36]	62
Tablica 6: Inženjerskogeološke i geotehničke karakteristike stijenske mase u zoni Z5 [36]	63
Tablica 7: Inženjerskogeološke i geotehničke karakteristike stijenske mase u zoni Z8 [36]	65
Tablica 8: Parametri stijenske mase za potrebe programa Rockfall v6.1.....	66

1. UVOD

U planinskim područjima, prometna infrastruktura i naselja često su suočena s odronima stijenske mase. Budući da se pojava odrona događa iznenadno, mogućnost poduzimanja nekih izbjegavajućih radnji u trenutku početka odrona je iznimno malena, stoga ono kao posljedicu donosi ekonomske gubitke uzrokovane štetama na prometnicama, stambenim građevinama, infrastrukturi, a u najgorem slučaju može dovesti i do gubitka života. Odroni se najčešće pojavljuju na područjima velikih količina padalina, sa čestim ciklusima smrzavanja-odmrzavanja te u seizmički aktivnijim područjima. Takva kombinacija klimatskih čimbenika prisutna je i u Hrvatskoj, posebice na području vrlo strmih padina čvrstih karbonatnih stijena, te u zoni navlake karbonatnih stijena na naslage fliša (podsljemenska zona, područje Sjeverozapadne Hrvatske, obalni pojas u srednjoj Dalmaciji i Kvarneru) [1]. Kako bi se pravovremeno spriječile ili umanjile posljedice hazarda, potrebno je prepoznati potencijalno ugrožena područja te isprojektirati i provesti prikladne mjere zaštite koje uključuju ne samo fizičke konstrukcije već daju i prijedloge o poboljšanju gospodarenja zemljištem, odnosno izbjegavanju građenja infrastrukture i građevina u ugroženim područjima. Osnova ovoga rada je upoznavanje s odronima i proučavanje nestabilnosti stijenske mase, opis faktora koji utječu na njegov nastanak, analiza trajektorija odronjenih blokova i energija udara te opis različitih vrsta mjera zaštite i ublažavanja od odrona. Analiziran je odron na županijskoj cesti ZC6034 na lokaciji Radljevac u blizini Knina, čiji je ishod bio utvrditi geološke, hidrogeološke, inženjerskogeološke te geotehničke karakteristike i na temelju toga izvršiti analizu računalnim programom koja rezultira mogućim trajektorijama odronjenih blokova i njihovom energijom udara te odabirom jednog varijantnog rješenja za tri karakteristična poprečna profila. Trajektorije, kinetička energija i visina odskoka ovise o geometriji pokosa, karakteristikama površine pokosa i odronjenog materijala. Temeljem navedenih podataka moguće je izraditi dvodimenzionalni model simulacije odrona, nakon kojega se pristupa odabiru adekvatne metode zaštite. Iako je više od 40% površine Republike Hrvatske krško područje koje je izloženo odronima stijenske mase te je pritom izloženo njegovim posljedicama na infrastrukturu i ljude, država nema razvijenu metodologiju za identifikaciju područja podložnih odronima i za procjenu hazarda i rizika od odrona, već se kombinacijom raznih svjetskih metoda dolazi do zaključaka i primjene na naše lokalne uvjete.

2. IDENTIFICIRANJE NESTABILNOSTI KOD ODRONA

Prema Varnes-ovoj klasifikaciji iz 1978. godine, odron predstavlja odvajanje mase tla ili stijene sa strmih kosina po površini na kojoj gotovo uopće nema smicanja [2]. Tako odvojena masa može postići vrlo velike brzine kretanja kroz slobodni pad, prevrtanje ili kotrljanje, stoga je od iznimne važnosti pravovremeno prepoznati glavne uzročnike odrona i njihov utjecaj, kako bi se pružila adekvatna zaštita područja sa nestabilnim geološkim materijalom. Padinski procesi pokreću se kombinacijom nestabilne strukture geološkog materijela i inicijatora koji mogu biti prirodni i antropogeni. Globalna nestabilnost, odnosno potpuni slom kroz stijensku masu se događa iznimno rijetko, za razliku od lokalne nestabilnosti u kojoj se javljaju odroni blokova stijenske mase i osipavanje sitnih odlomaka stijene [3]. U narednim potpoglavljima spomenut će se procesi i uzroci koji dovode do sloma te lociranje područja osjetljivih na brze promjene stanja naprezanja u stijenskoj masi i sila koje djeluju na nju.

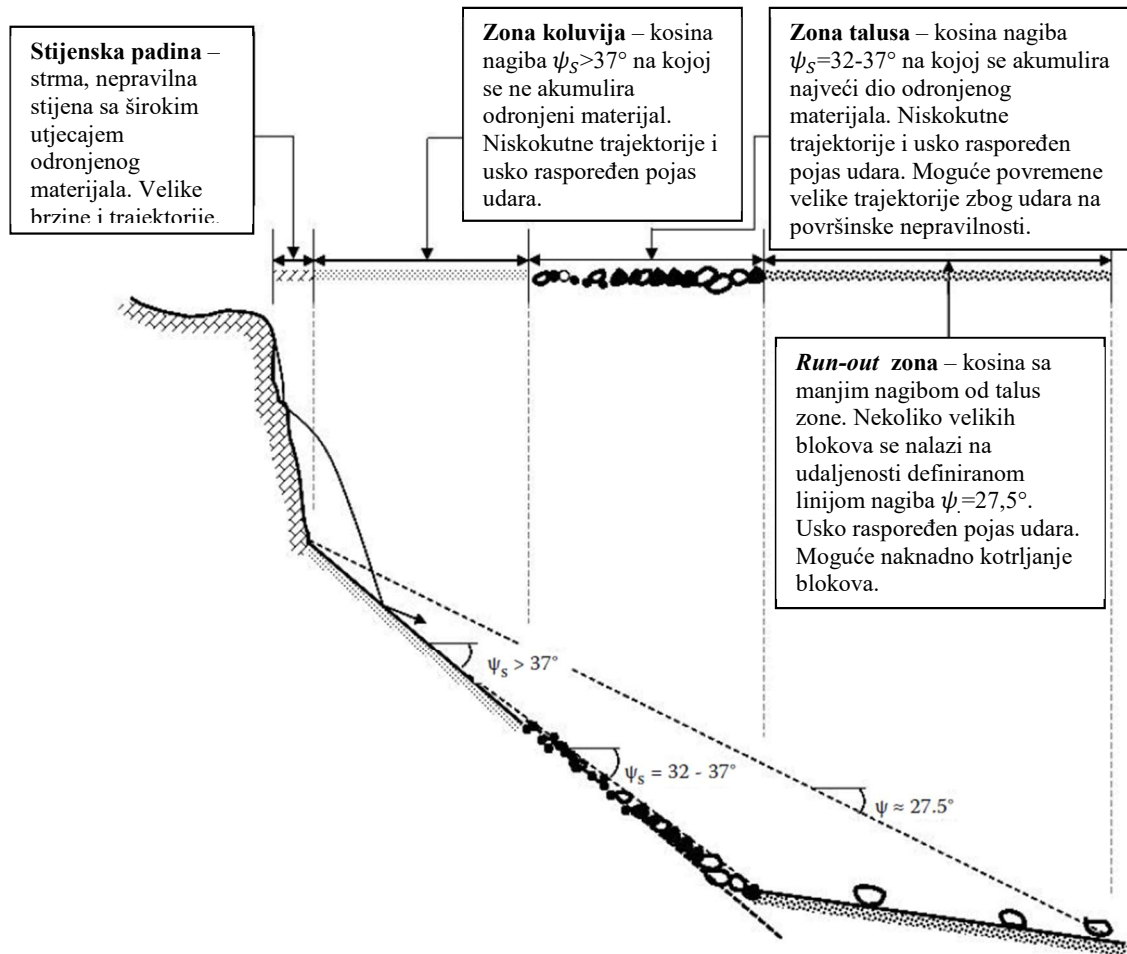


Slika 1: Faktori koji utječu na nestabilnost kosine [4]

2.1. Topografija terena

Kako bi se što točnije identificirala područja podložna hazardu odrona, potrebno je provesti detaljna istraživanja, koja osim samog obilaska terena uključuju i uporabu avionskih snimaka, pregled područja helikopterom te penjanje po stijeni. Glavni pokazatelj svježih,

odnosno nedavnih pokreta u stijenskoj masi je prisustvo otvorenih vlačnih pukotina, „razgolićenje“ površine stijene, naznake udara po vegetaciji duž putanje odronjenog materijala i akumulacija istog u nižim dijelovima kosine [5]. Topografija terena koristi se kao jedan od pouzdanih izvora za određivanje potencijalnih mjesta hazarda. Podaci o topografiji obuhvaćaju karte slojnica kojima je prikazan oblik reljefa i reljefne anomalije kao uzroci (pukotine, ispupčenja), tragove površinskog tečenja, profile kosina u korelaciji sa geološkom građom kosine te u korelaciji sa kartom slojnica te promjene topografije sa vremenom i u korelaciji sa podzemnom vodom, vremenskim uvjetima i vibracijama [6]. Na slici 2 prikazana je karakteristična konfiguracija kosine sa odgovarajućim mehanizmom ponašanja kroz četiri zone. Stijenska padina označava prvu zonu, odnosno stijensku kosinu sa strmom nepravilnom stijenom u kojoj pad stijenskog materijala ima široki utjecaj sa izrazito velikim translacijskim i rotacijskim brzinama te visokokutnim trajektorijama. Prvu zonu sijedi zona koluvija sa nagibom kosine ψ_S većim od 37° , dok je pojas utjecaja odronjenog materijala usko raspoređen, sa niskokutnim trajektorijama te se isti ne akumulira na padini. Zonu talusa karakterizira nagib kosine ψ_S u rasponu 32° do 37° s obzirom na nožicu stijenske padine. U njoj se akumulira najveći dio odronjenog materijala koji je podvrgnut prirodnom fracioniranju radi kojeg ta zona ima stožasti oblik naslaga – manji odlomci stijene talože se pri vrhu zone, dok veći blokovi završavaju na dnu zone. *Run-out* predstavlja zonu akumulacije najvećih blokova koji su postigli iznimno veliku energiju kako bi završili na znatno ravnijoj padini od zone talusa. Najveća udaljenost koju mogu postići stijenski blokovi u „run-out“ zoni definirana je linijom nagiba $\psi = 27,5^\circ$ gledajući od nožice stijenske padine ili vrha zone talusa sve do odronjenog bloka stijene koji je najviše udaljen u *run-out* zoni. Spomenuti nagib $\psi = 27,5^\circ$ predstavlja koeficijent kotrljanja odronjenog materijala. *Run-out* zona ima važnu ulogu prilikom definiranja zone utjecaja hazarda odrona, budući da se blokovi mogu nastaviti kretati prenošenjem energije kotrljanja s jednog bloka na drugi u nizu malenih sudara, stoga se njihovo napredovanje u toj zoni može zaustaviti plitkim jarcima ili ogradama [5].



Slika 2: Konfiguracija kosine sa mehanizmom ponašanja odrona kroz četiri zone [5]

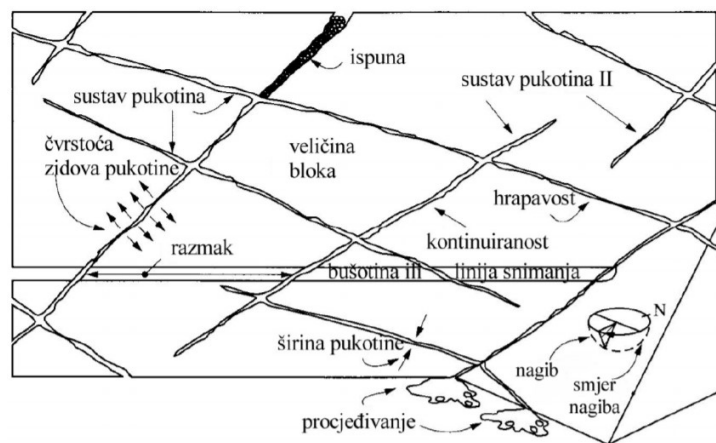
2.2. Geološki uvjeti

Stijenska masa definirana je vrstom stijene, odnosno njezinom genezom, te svim diskontinuitetima koji su prisutni u njoj [7]. Diskontinuiteti predstavljaju mehaničke prekide u stijenskoj masi i međusobno razdvajaju blokove intaktne stijene. Imaju veliki utjecaj na čvrstoću, deformabilnost, hidraulička svojstva stijenske mase te ju čine anizotropnom i diskontinuiranom, a prilikom procjene mehaničkih svojstava stijenske mase potrebno ih je detaljno opisati i karakterizirati. Inženjerskogeološka istraživanja provode se sa ciljem rješavanja problema iz područja inženjerske geologije pritom koristeći određene metode geoloških disciplina te rezultate laboratorijskih i geofizičkih ispitivanja.



Slika 3: Raspucana stijenska masa sa različito orijentiranim setovima diskontinuiteta

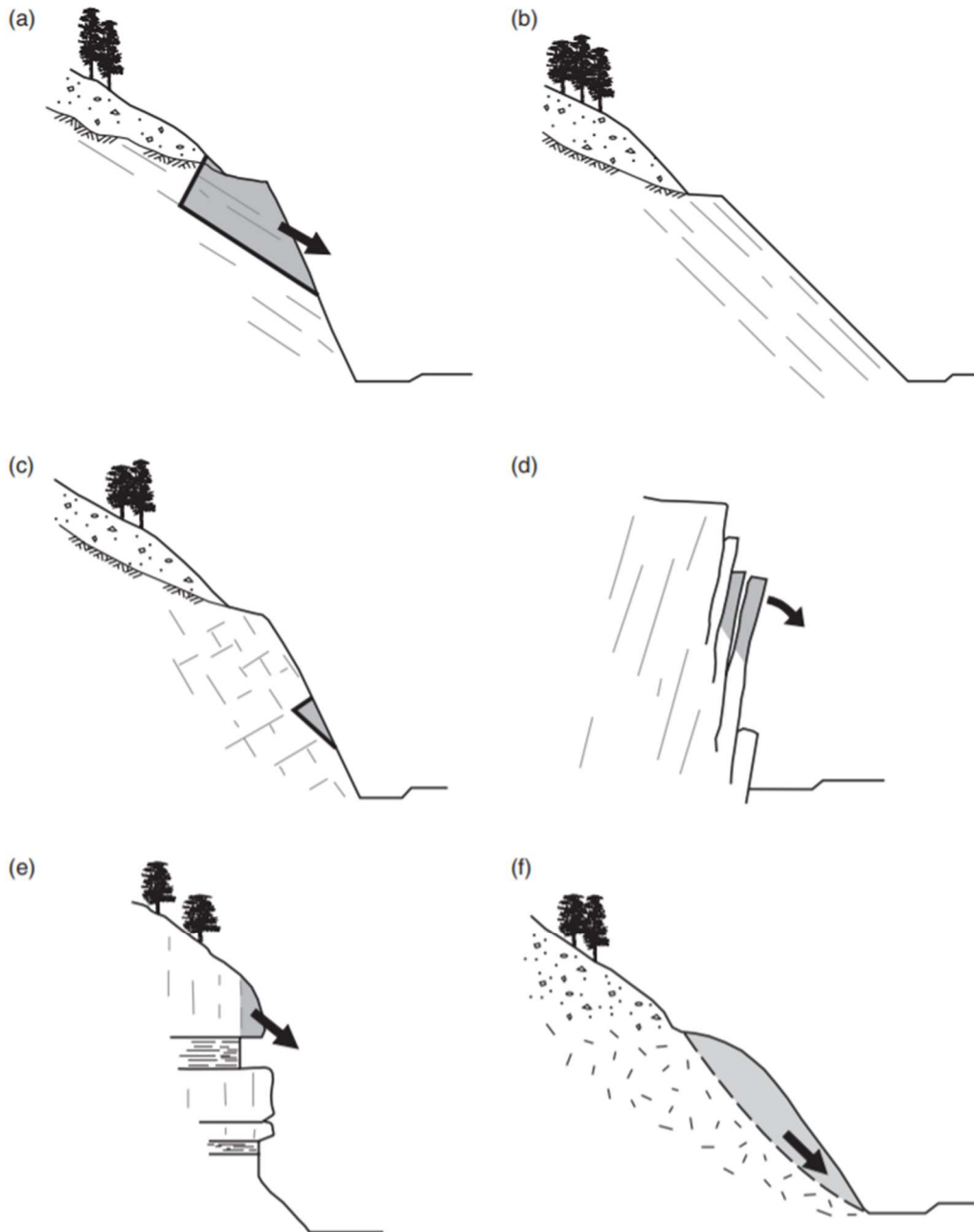
Da bi se interpretirala geološka građa užeg promatranog područja, potrebno je usporediti lokalno registrirane pojave sa regionalnom geološkom građom koja je dostupna iz Osnovne geološke karate (OGK) mjerila 1:100 000. Budući da zbog sitnog mjerila OGK nije dovoljno detaljna, ne može se koristiti kao jedini izvor geoloških podataka. Konačni rezultat dobiva se u kombinaciji sa inženjerskogeološkim kartama sličnih projekata napravljenim u mjerilu 1:25 000 i 1:5 000. Nakon prvotnog uvida u geološku građu šireg područja, potrebno je obaviti pregled ugroženog dijela *in situ* te utvrditi podatke o naslagama na kosini (prostorni položaj i redoslijed naslaga, granice sa osnovnom stijenom i rezidualnim tlom, postojanje minerala podložnih fizičkim i kemijskim promjenama), svojstvima diskontinuiteta i trošenju. Svojstva diskontinuiteta obuhvaćaju osnovne geometrijske karakteristike stijenske mase: razmak, orijentaciju, postojanost, zijev, ispunu, hrapavost, veličinu i oblik bloka te setove diskontinuiteta.



Slika 4: Osnovne geometrijske karakteristike diskontinuiteta [8]

Stupanj trošnosti utječe na blokove intaktne stijene i na diskontinuitete, a njegov opis uključuje opis čvrstoće, promjenu boje, prirodu procesa te promjene na diskontinuitetima. Čvrstoća stijenske mase najviše ovisi o posmičnoj čvrstoći samih diskontinuiteta na koju utječe hrapavost površine i neprekinutost diskontinuiteta te mineralni sastav, debljina i vlažnost [7]. Promatrajući geološke uvjete u kojima se događa slom u stijenskoj masi, može se izdvojiti nekoliko različitih tipova sloma: ravninski, klinasti, rotacijski slom i slom prevrtanjem [8]. Ravninski slom se smatra specijalnim slučajem klinastog sloma budući da se samo povremeno svi geometrijski elementi poslože tako da zadovolje određene uvjete. Blok stijenske mase treba klizati po jednoj ravnini, ravnina na kojoj se događa klizanje ima paralelno pružanje u odnosu na lice pokosa ($\pm 20^\circ$), nagib ravnine klizanja mora biti manji od nagiba lica pokosa, a veći od kuta unutarnjeg trenja materijala na toj ravnini. Kod klinastog sloma diskontinuiteti imaju različito pružanje u odnosu na lice pokosa, a klizanje se događa na presjeku takve dvije ravnine koje formiraju klin. Ravninski i klinasti slom kontroliran je postojećim ravninama diskontinuiteta u stijenskoj masi, dok je za vrlo trošnu stijensku masu ili stijensku masu s gustom mrežom diskontinuiteta karakterističan rotacijski slom do kojeg dolazi kada je veličina čestica mala u odnosu na veličinu stijenskog pokosa. Navedenim slomovima stijenske mase potrebno je postojanje specifičnih geoloških uvjeta koje bi uvjetovale određeni tip sloma, a što je prikazano na slici 5. Kosine (a) i (b) prikazuju svojstvene uvjete sedimentnih stijena kao što su uslojeni pješčenjaci i vapnenci čija slojevitost najviše utječe na stabilnost mase, a do sloma će doći ukoliko je nagib ravnine klizanja veći od kuta unutarnjeg trenja materijala na toj ravnini. Kosina (b) predstavlja usjek koji je usječen paralelno sa pružanjem slojeva, stoga je lice pokosa stabilno. Na kosini (c) lice pokosa je stabilno, ali ukoliko je tijekom građevinskih zahvata u stijeni i miniranja došlo do poremećaja među diskontinuitetima i spajanja setova pukotina, postoji rizik od pojave nestabilnih površinskih blokova. Slom prevrtanjem (d) uključuje mehanizam rotacije elementa stijenske mase (stupa ili bloka) oko fiksne baze. Pojavljuje se kao blokovsko prevrtanje u jakoj stijenskoj masi u kojoj setovi diskontinuiteta formiraju stupove strmog nagiba, te kao prevrtanje savijanjem koje se događa kada se vertikalni setovi diskontinuiteta savijaju kao da se naginju naprijed. Kosina (e) predstavlja niz od horizontalno uslojenog pješčenjaka i škriljavca. Budući da je škriljavac podložniji utjecaju vremenskih uvjeta i svojim trošenjem uzrokuje stvaranje prevjesa u sloju pješčenjaka, taj isti prevjes može pod utjecajem prevelikih vertikalnih naprezanja popustiti i odroniti se radi smanjenja čvrstoće. Na kosini (f) strmi pokos je izrezan u slaboj stijeni sa gustim diskontinuitetima različite

orientacije gdje stabilnost nije definirana samo jednim setom diskontinuiteta. Iz tih razloga, potencijalna klizna ploha formira se dijelom kroz diskontinuitete, a dijelom kroz intaktnu stijenu.



Slika 5: Utjecaj geoloških uvjeta na stabilnost usjeka u stijenskoj masi: potencijalno nestabilan usjek (a), stabilna kosina kojoj je usjek usječen paralelno sa pružanjem slojeva (b), stabilno lice pokosa (c), slom prevrtanjem (d), stvaranje prevjesa u sloju pješčenjaka zbog utjecaja trošenja (e), plitki rotacijski slom u slaboj stijeni sa gustim diskontinuitetima različite orijentacije (f) [9]

Svaka stijenska masa sastoji se od blokova osnovne stijene i diskontinuiteta čije krutosne karakteristike i međusobni odnos definiraju krutost stijenske mase [10]. Pri tome je važno definirati blok i opisati njegova svojstva, budući da ponekad oslobađanje ključnih blokova može ubrzati odrone značajnih razmjera. Blok predstavlja monolitni, neodvojeni dio stijene, većih dimenzija [8]. Oni u prirodi variraju i nepravilni su po obliku zbog varijabilnosti setova pukotina i njihove neortogonalne prirode nastanka u stijenskoj masi. Određivanje veličine i oblika individualnih blokova u raspucanoj stijenskoj masi ima značajnu ulogu tijekom inženjerskih zahvata u stijeni, gdje raspodjela veličine blokova može utjecati na propusnost i stabilnost stijenske mase, a time i na odabir optimalnog rješenja sanacije. U tablici 1 prikazana je raspodjela veličine blokova s obzirom na stupanj razlomljenosti stijenske mase.



Slika 6: Različito blokovita stijenska masa

Tablica 1: Raspodjela veličine bloka s obzirom na stupanj razlomljenosti [8]

STIJENA		
STUPANJ RAZLOMLJENOSTI	VELIČINA BLOKA	VOLUMEN BLOKA (V_b)
ekstremno	ekstremno mali	$<10 \text{ cm}^3$
vrlo jako	vrlo mali	$10\text{-}200 \text{ cm}^3$
jako	mali	$0,2\text{-}10 \text{ dm}^3$
umjereno	srednji	$10\text{-}200 \text{ dm}^3$
slabo	veliki	$0,2\text{-}10 \text{ m}^3$
vrlo slabo	vrlo veliki	$10\text{-}200 \text{ m}^3$
ekstremno slabo (masivno)	ekstremno veliki	$>200 \text{ m}^3$

S obzirom da je veličina bloka određena brojem setova diskontinuiteta, orijentacijom, razmakom i postojanošću, može se zaključiti da ima značajan utjecaj na čvrstoću stijenske mase, modul deformacije, čvrstoću smicanja i model sloma. Veličina bloka se može odrediti mjerenjima na terenu (izravno mjerenje volumena blokova, mjerenje razmaka diskontinuiteta, 1-D, 2-D i 3-D gustoća diskontinuiteta), mjerenjem na jezgri bušotine i geofizičkim mjerenjima (mjerenje brzine elastičnih valova metodom seizmičke refrakcije) [8]. Ako ne postoji mogućnost da se veličina bloka odredi na opisane načine, ona se može procijeniti. Volumen bloka, V_b (m^3), koji je određen s tri sustava diskontinuiteta računa se prema izrazu (1) preuzetom iz [11]:

$$V_b = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{\sin \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2 \cdot \sin \gamma_3} \quad (1)$$

gdje su simboli S_1, S_2, S_3 razmaci između diskontinuiteta pojedinog sustava, a $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ prostorni kutovi između diskontinuiteta. Razlomljenost, odnosno veličina blokova može se izraziti i preko volumetrijskog broja pukotina, J_v (pukotina/ m^3), koji je definiran kao broj pukotina u kubičnom metru stijenske mase, a računa se prema izrazu (2) preuzetom iz [11]:

$$J_v = \sum (1/S_i) = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (2)$$

gdje je S razmak između diskontinuiteta pojedinog sustava. U tablici 2 prikazane su vrijednosti razlomljenosti stijenske mase sa pripadajućim opisom.

Tablica 2: Klasifikacija volumetrijskog broja pukotina [11]

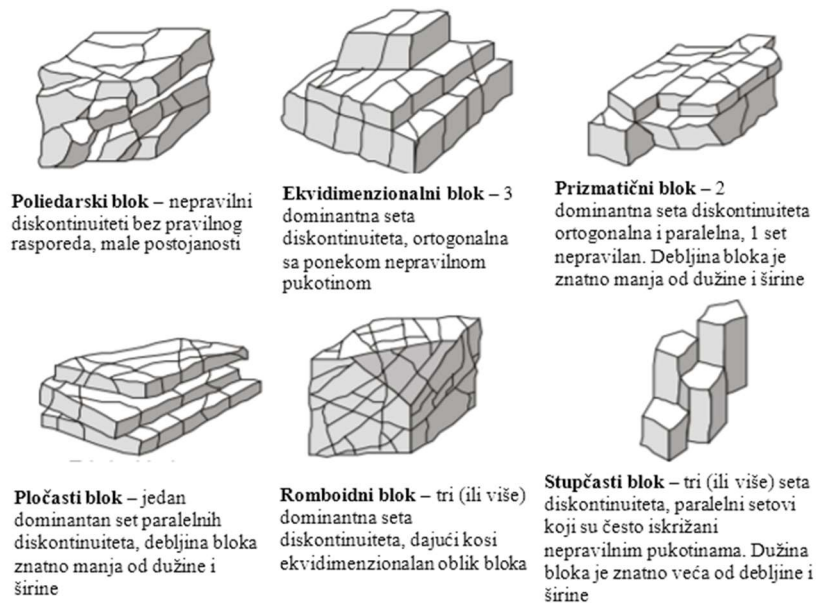
RAZLOMLJENOST	VOLUMETRIJSKI BROJ PUKOTINA, J_v
vrlo slabo razlomljeno	<1
slabo razlomljeno	1-3
umjereno razlomljeno	3-10
jako razlomljeno	10-30
vrlo jako razlomljeno	30-60
zdrobljeno	>60

Oblik blokova definira odnose duljina pojedinih bridova blokova, a određuje se faktorom oblika blokova β , prema izrazu (3) preuzetom iz [8]:

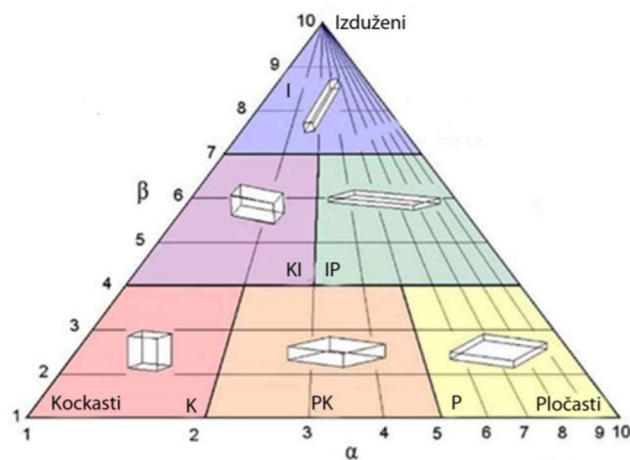
$$\beta = \frac{(\alpha_2 + \alpha_2 \cdot \alpha_3 + \alpha_3)^3}{\alpha_2 \cdot \alpha_3} \quad (3)$$

gdje je $\alpha_2 = \frac{S_2}{S_1}$, $\alpha_3 = \frac{S_3}{S_1}$, ako je $S_3 > S_1$ i $S_2 > S_1$ s time da S označava duljine ploha blokova. Izraz (3) vrijedi samo ako blok definiraju tri para paralelnih ploha što se u prirodi rijetko pojavljuje, stoga je uveden izraz (4) za β , preuzet iz [8], koji za blokove koji su definirani sa više od šest ploha, sadrži samo dimenzije najduže S_3 i najkraće S_1 plohe:

$$\beta = 20 + 7 \cdot \frac{S_3}{S_1} = 20 + 7 \cdot \alpha_3 \quad (4)$$



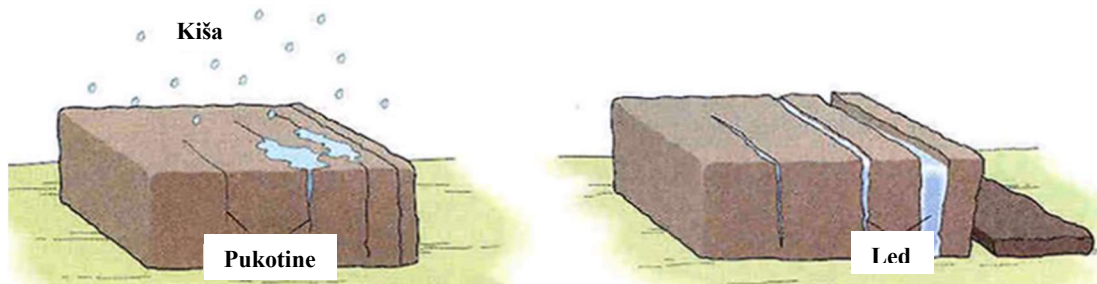
Slika 7: Najčešći oblici blokova [11]



Slika 8: Klasifikacija faktora oblika blokova β [12]

2.3. Klimatski uvjeti

Utjecaj klime i klimatske promjene koje se intenzivno proučavaju unazad nekoliko desetljeća odražavaju se vrlo negativno na stabilnost odrona. Klimatski čimbenici koji imaju najznačajniji utjecaj su povećanje porednog tlaka tijekom infiltracije oborina, erozija materijala tijekom jakih kiša te ciklusi smrzavanja-odmrzavanja [3]. Temperatura ima utjecaj na intenzitet kemijskog i fizičkog trošenja, posebice tijekom smrzavanja, grijanja i hlađenja koji dovode do dezintegracije stijenske mase. Više temperature ubrzavaju kemijske reakcije, pa zato trošenje poprima šire razmjere u tropskim područjima gdje su i temperature više, a padaline obilnije. U planinskim područjima s većim količinama snijega, topljenje snijega u proljeće uzrokuje povećanje porednih pritisaka i jedan je od glavnih inicijatora klizanja [8]. Voda je jedan od ključnih faktora koji kontrolira stabilnost odrona, budući da može stvoriti dodatne pritiske u pukotinama stijenske mase koji su dovoljni da uzrokuju pomake blokova, a time i odrone, te može uzrokovati kemijske reakcije koje mogu promijeniti sastav stijene, dok u mekim stijenama smanjuje parametre čvrstoće. Promjene u vlažnosti nekih stijena, posebice škriljaca, mogu uzrokovati ubrzano trošenje i smanjenje čvrstoće. Smrzavanje vode koja je prisutna u pukotinama može uzrokovati njihovo širenje zbog povećanja volumena leda, dok smrzavanje vode na površini padine može blokirati i zaustaviti drenažne puteve, povećati poredni pritisak i time smanjiti stabilnost stijenske mase [9].



Slika 9: Utjecaj smrzavanja vode na stijensku masu [13]



Slika 10: Kemijsko djelovanje vode na stijensku masu [14]

2.4. Biološki uvjeti

Područja sa vlažnijom klimom plodna su za rast vegetacije, a posebice drveća. Kako drveće raste, tako se korijenje širi i prodire sve dublje u pukotine stijenske mase, dok sa vremenom može biti dovoljno snažno da ih proširi i uzrokuje lom intaktne stijene [5]. Uklanjanje vegetacije također mijenja uvjete na stijeni, budući da uzrokuje brže otjecanje vode, a time i eroziju materijala te se povećava mogućnost nastanka odrona.



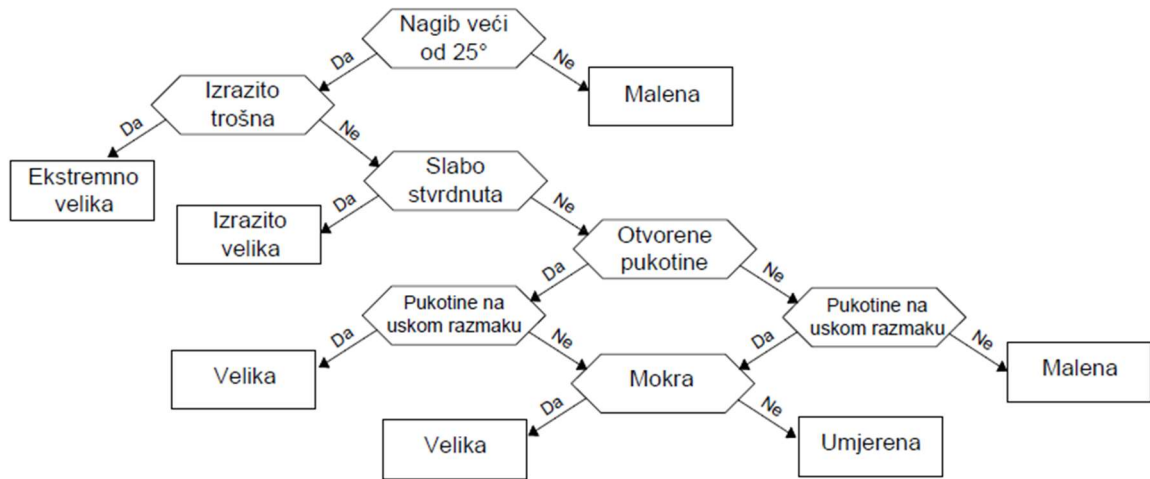
Slika 11: Razaranje stijenske mase širenjem korijenja [15]

2.5. Seizmička aktivnost

Odroni se često pojavljuju u brdovitom području na strmim padinama kao posljedica pomaka tla uslijed potresa. Takav događaj može biti popraćen odronom samo jednog bloka pa sve do višestrukih odrona i klizišta na širem području. Utvrđeno je pet parametara koji imaju najveći utjecaj na stabilnost stijenske mase tijekom trajanja potresa: nagib padine, trošenje, stvrdnjavanje, karakteristike diskontinuiteta te voda [9]. Odnos navedenih parametara i stabilnosti prikazan je na slici 12, a koji pomaže u identificiranju uvjeta na području podložnom nestabilnosti uslijed potresa. Ukoliko je potrebna rigoroznija procjena hazarda određenog područja, koristi se tehnika razvijena od Harpa i Wilsona koja uključuje računanje Ariasova intenziteta pomaka tla na određenom području interesa. Ariasov intenzitet, I_a (m/s), predstavlja ukupnu energiju podrhtavanja tla koja se određuje mjerenjem ubrzanja prolaznih seizmičkih valova prema izrazu (5), preuzetom iz [9]:

$$I_a = \frac{\pi}{2} g \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt \quad (5)$$

gdje je $a(t)$ akceleracija pomaka tla u određenom vremenu t , kroz ukupno trajanje od T_d , a g (m/s^2) je akceleracija sile teže.



Slika 12: Određivanje osjetljivosti na odronе uslijed potresa [9]

2.6. Antropogeni uvjeti

Širenjem populacije na nove prostore i stvaranjem novih gradova povećava se rizik od hazarda odrona kojeg najčešće prate ekonomski i/ili ljudski gubici. Antropogeni procesi se odnose na sve ljudske zahvate na klizištu ili u njihovoj neposrednoj blizini, a mogu obuhvaćati zasjecanje padina, navodnjavanje, loše održavanje drenažnih sustava, procjeđivanje iz komunalne infrastrukture, opterećenje padine, odstranjivanje vegetacije, rudarenje i umjetne vibracije nastale prometom i mehanizacijom, pri čemu se mijenja stanje naprezanja stijenske mase, pa novonastalo stanje naprezanja postaje prevladavajući čimbenik u povećanju nestabilnosti.

3. OSNOVNI PARAMETRI PROJEKTIRANJA ODRONA

Odron stijenske mase predstavlja slobodno padajuće blokove koji su odvojeni od osnovne stijene te se kreću nizbrdo, prilikom čega im se povećava energija i brzina. Budući da se vrijeme, lokacija i intenzitet pojave odrona ne može točno predvidjeti, najvažniji zadatak je odabrati optimalne mjere zaštite i sustava upozorenja od odrona. S obzirom na čitav niz utjecaja navedenih u prethodnom poglavlju, a koji mogu uzrokovati pojavu odrona, predviđanje njegove putanje i sile udara je veoma zahtjevno. Nakon provođenja svih potrebnih geotehničkih i inženjerskogeoloških istražnih radova prilikom kojih se klasificirala stijenska masa te su se odredili parametri čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase, pristupa se definiranju geotehničkog modela. Kako bi se problem riješio na što adekvatniji način, za simulaciju odrona se u većini slučajeva koriste dvodimenzionalni softverski alati. Prilikom računalnih simulacija odrona stijenske mase, ističe se nekoliko parametara koji imaju veliki utjecaj na njihovo ponašanje: normalni i tangencijalni koeficijent restitucije, tangencijalni koeficijent trenja, hrapavost površine padine te koeficijent trenja kotrljanja.

3.1. Normalni i tangencijalni koeficijent restitucije

Svojstvo usporavanja izražava se preko koeficijenta restitucije R , koji je definiran kao odnos energija prije i poslije udara bloka na padinu, što je određeno izrazom (6), preuzetom iz [16]:

$$R = \frac{\text{energija poslije udara}}{\text{energija prije udara}} \quad (6)$$

Budući da je energija poslije udara uvijek manja od enegrije prije udara, njegova vrijednost se kreće između 0 i 1. Vrijednost 0 označava da je došlo do potpunog gubitka energije, dok vrijednost 1 označava da nije došlo do nikakvih gubitka. Koeficijent restitucije sastoji se od normalnog i tangencijalnog dijela. Normalni koeficijent restitucije R_N opisuje promjenu normalne komponente brzine za vrijeme udara, a povezan je sa kutom pod kojim blok udara na padinu. Određen je izrazom (7), preuzetom iz [5]:

$$R_N = -\frac{V_{NA}}{V_{NB}} \quad (7)$$

gdje je V_{NA} normalna komponenta brzine bloka poslije udara, V_{NB} normalna komponenta brzine bloka prije udara, dok predznak minus dolazi zbog negativnog smjera brzine V_{NB} naspram pozitivno zadanog koordinatnog sustava. Tangencijalni koeficijent restitucije R_T

opisuje smanjenje tangencijalne komponente brzine za vrijeme udara, a povezan je sa silom trenja koja djeluje na kontaktu između padine i bloka. Određen je izrazom (8), preuzetom iz [5]:

$$R_T = \frac{V_{TA}}{V_{TB}} \quad (8)$$

gdje je V_{TA} tangencijalna komponenta brzine bloka poslije udara, V_{TB} tangencijalna komponenta brzine bloka prije udara. Na vrijednost koeficijenta restitucije znatno utječe vrsta materijala koja formira površinu udara. Čiste i tvrde površine stijene imaju visoku vrijednost koeficijenta, dok tla i rastrošne stijene imaju nisku vrijednost. Tipične vrijednosti za normalni koeficijent restitucije koje se koriste u analizama odrona su u rasponu od 0.3 do 0.5, dok je raspon za tangencijalni koeficijent restitucije između 0.8 i 0.95 [3].

3.2. Tangencijalni koeficijent trenja

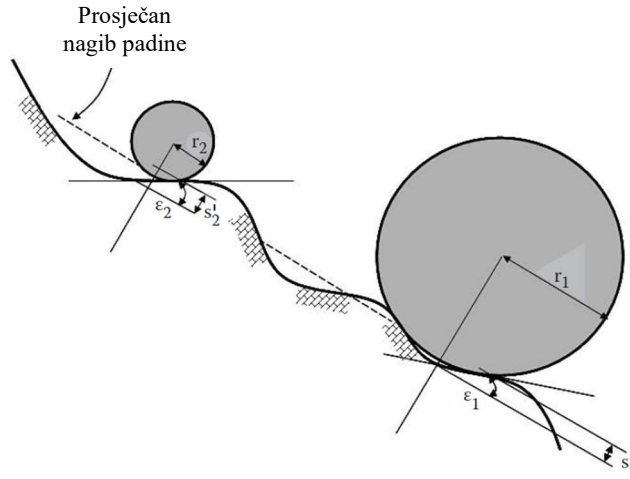
Tangencijalni koeficijent trenja predstavlja otpornost padine na klizanje bloka, koja je definirana tangensom kuta trenja pod kojim blok iz stanja mirovanja počinje klizati. Odnos tangencijalnog koeficijenta restitucije i tangencijalnog koeficijenta trenja je obrnuto proporcionalan, što znači kada je za isti materijal vrijednost tangencijalnog koeficijenta restitucije visoka, vrijednost tangencijalnog koeficijenta trenja će biti mala i obrnuto. Ovisi o čvrstoći materijala stijenske mase po kojoj se blok kreće, stoga će ukoliko je stijena glatka, kut trenja biti nizak, a time i tangencijalni koeficijent trenja.

3.3. Hrapavost površine padine

Hrapavost površine padine je definirana kao promjena kuta nagiba padine od prosječne vrijednosti nagiba zbog valovitosti površine [17]. Važan je parametar budući da utječe na ponašanje bloka prilikom udara na padinu i njegova daljnjeg gibanja, stoga će se u pravilu visina trajektorije povećati sa povećanjem hrapavosti. Može se odrediti stavljanjem u odnos promjene u okomitom odstupanju s' sa obzirom na prosječni nagib padine, a unutar dužine padine koja odgovara polumjeru tijela (bloka) r koji se giba. Kut ε definira hrapavost površine te je određen izrazom (9) preuzet iz [5]:

$$\varepsilon = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{s'}{r} \right) \quad (9)$$

gdje je ε (m) kut hrapavosti površine padine, s' (m) mjera okomitog odstupanja od prosječnog nagiba padine, a r (m) polumjer tijela. Vrijednost kuta hrapavosti ε smanjuje se povećanjem polumjera tijela, odnosno za približno jednaku hrapavost površine padine kut hrapavosti će se smanjiti povećanjem tijela: ($r_1 > r_2$) i ($\varepsilon_2 > \varepsilon_1$), što je i prikazano na slici 13.



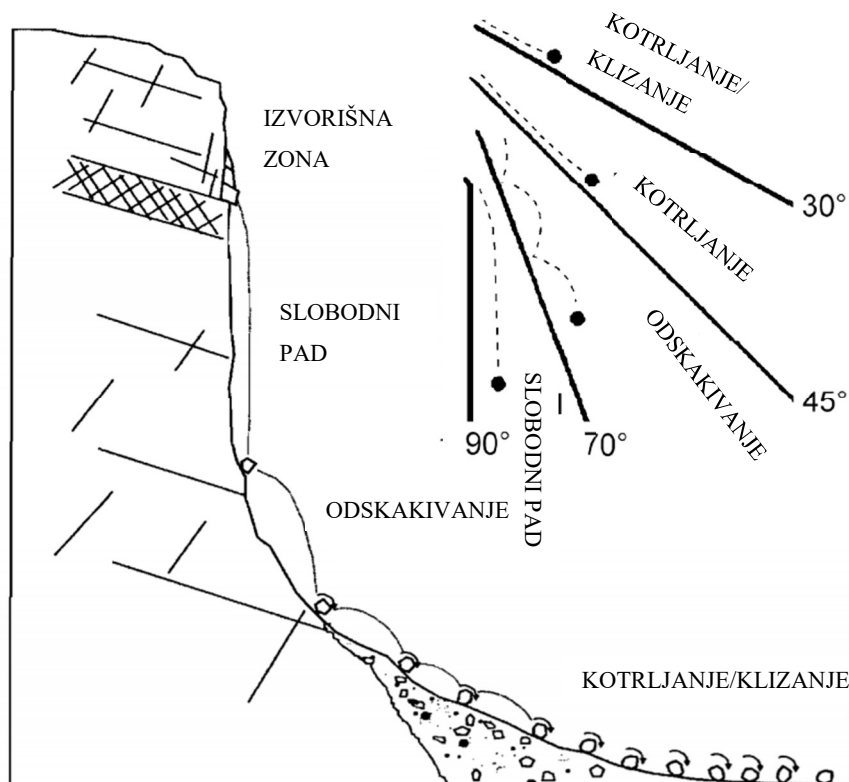
Slika 13: Odnos između kuta hrapavosti ε i polumjera tijela r [5]

3.4. Koeficijent trenja kotrljanja

Koeficijent trenja kotrljanja predstavlja tangens kuta trenja koji uzrokuje da se blok stijenske mase iz stanja mirovanja počne kretati po padini bez utjecaja vanjskih sila [16]. Utječe na smanjenje ili povećanje kutne brzine bloka za vrijeme njegova gibanja.

4. PRORAČUN STABILNOSTI ODRONA

Proračun moguće putanje, odnosno trajektorije odronjenog bloka stijenske mase duž padine je od iznimne važnosti kako bi se na pravilan način provela sanacija ugroženog područja. Trajektorija odronjenih blokova može se opisati kao kombinacija određenih mehanizama gibanja blokova: slobodni pad, odskakivanje, klizanje i kotrljanje [4]. Najvažniji faktor koji kontrolira i određuje mehanizam gibanja je geometrija, odnosno nagib pokosa. Kod strmih padina najčešće se javlja slobodni pad, dok se kod padina umjerenog nagiba uzastopno pojavljuje slobodni pad i odskakivanje, a na padinama blagog nagiba klizanje i kotrljanje. Veliki utjecaj na brzinu gibanja odronjenog materijala ima i prekrivenost stijenske mase vegetacijom. Čiste površine tvrde stijene, neoštećene vremenskim uvjetima ne usporavaju brzinu kretanja odronjenog materijala, dok površine prekrivene trošnim materijalom ili šljunom znatno apsorbiraju količinu energije udara, a u ponekim slučajevima ga mogu u potpunosti zaustaviti.



Slika 14: Mehanizmi gibanja odronjenog materijala

Brojni kompjutorski programi simuliraju ponašanje odrona i postoje s ciljem određivanja putanje te interakcije odronjenog materijala i površine padine. Modeli unutar kojih se provodi proračun najčešće razlikuju dvije metode: metode krutog tijela i metode skupljene mase [4]. Metoda krutog tijela smatra blok stijenske mase kao tijelo određena oblika i volumena, te rješava dinamičke jednadžbe svih vrsta gibanja bloka, uključujući kotrljanje. Metoda skupljene mase pretpostavlja da blok nema mase ili je masa koncentrirana u jednu točku, a oblik bloka i kotrljanje se ne uzimaju u obzir. Mnogi modeli koji simuliraju trajektorije odrona stijenske mase uzimaju u obzir jedino slobodni pad i odskakivanje, dok samo nekoliko njih uzima u obzir kotrljanje i klizanje. U daljnjem radu se koristi pretpostavka da je svaki blok modeliran kao čestica koja se može predočiti kao infinitezimalni krug, budući da se veličina bloka ne uzima u obzir. Upravo iz tih razloga nema ni međusobne interakcije između blokova, već jedino ima između segmenata na padini i barijerama. Iako se smatra da blokovi nemaju veličinu, pretpostavlja se da imaju masu koja je određena konstantnom vrijednosti na početku simulacije, a koja se uzima u obzir jedino u proračunu kinetičke energije prilikom izrade grafova i prikaza rezultata [18]. Trajektorije odronjenog materijala slijede Newtonove zakone uz pretpostavku da je otpor zraka zanemaren, budući da su blokovi dovoljno masivni i kreću se malenim brzinama. Ukoliko bi se otpor zraka uključio u jednadžbe, analiza bi postala mnogo složenija, a utjecaj na krajnje rezultate bi bio vrlo malen.

4.1. Algoritam za simulaciju pada stijene

Pretpostavlja se da blok ima određenu brzinu koja će ga pokretati kroz zrak, iz trenutne pozicije na neku novu gdje će udariti u pokos. Putanja koju blok napravi kroz zrak je zbog utjecaja gravitacijske sile parabola. Svrha algoritma za simulaciju pada stijene je pronaći lokaciju sjecišta parabole (putanje bloka) i pokosa. Nakon što se pronađe točka sjecišta, proračunava se brzina udara uz pomoć koeficijenta restitucije. Ukoliko se nakon udara blok i dalje kreće dovoljno brzo, proces traženja novog sjecišta započinje ponovno. Opis brzine „dovoljno brzo“ se može definirati kao minimalna brzina V_{min} (m/s) koja definira prijelaz između stanja slobodnog pada stijene i stanja u kojemu se blok kreće presporo da bi se smatrao slobodnim padom, gdje se umjesto toga kotrlja, kliže ili zaustavlja. Za određivanje putanje bloka, odnosno sjecišta njegove putanje i pokosa koriste se parametarski oblici

jednadžbi: parabola-putanja bloka-segment pokosa. Parametarska jednadžba pravca dana je izrazom (10), preuzetom iz [18]:

$$\begin{aligned} X &= X_1 + (X_2 - X_1) \cdot u \\ Y &= Y_1 + (Y_2 - Y_1) \cdot u ; \quad u \in [0, 1] \end{aligned} \quad (10)$$

gdje su X_1 i Y_1 prve krajnje točke pravca, a X_2 i Y_2 druge krajnje točke pravca. Parametarska jednadžba parabole dana je izrazom (11), preuzetom iz [18]:

$$\begin{aligned} X &= V_{X0} \cdot t + X_0 \\ Y &= \frac{1}{2} g t^2 + V_{Y0} \cdot t + Y_0 ; \quad t \in [0, \infty] \end{aligned} \quad (11)$$

gdje je g (m/s^2) akceleracija sile teže (negativan predznak), X_0 i Y_0 početni položaj bloka, a V_{X0} i V_{Y0} (m/s) početna brzina bloka. Parametarske jednadžbe za brzinu čestica dane su izrazom (12), preuzetom iz [18]:

$$\begin{aligned} V_{XB} &= V_{X0} \\ V_{YB} &= V_{Y0} + g t \end{aligned} \quad (12)$$

gdje je V_{XB} i V_{YB} (m/s) brzina bloka u bilo kojoj točki parabole prije udara. Izjednačavanjem točaka parabole i jednadžbe pravca (tj. $x=x$ i $y=y$) i stavljanjem u oblik $ax^2 + bx + c = 0$ dobivamo izraz (13), preuzet iz [18]:

$$\left[\frac{1}{2} g \right] \cdot t^2 + [V_{Y0} - qV_{X0}] \cdot t + [Y_0 - Y_1 + q(X_2 - X_1)] = 0 \quad (13)$$

$$q = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

gdje je q nagib pravca. Jednadžba (10) se može riješiti po t prema formuli kvadratne jednadžbe (14):

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (14)$$

gdje je: $a = \frac{1}{2} g$, $b = V_{Y0} - qV_{X0}$, $c = Y_0 - Y_1 + q(X_2 - X_1)$.

Nakon što je određeno sjecište, računaju se brzine neposredno prije udara. Brzine iz izraza (12) se transformiraju u normalnu i tangencijalnu komponentu u odnosu na pokos prema izrazu (15), preuzetom iz [18]:

$$\begin{aligned} V_{NB} &= (V_{YB}) \cdot \cos(\theta) - (V_{XB}) \cdot \sin(\theta) \\ V_{TB} &= (V_{YB}) \cdot \sin(\theta) + (V_{XB}) \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad (15)$$

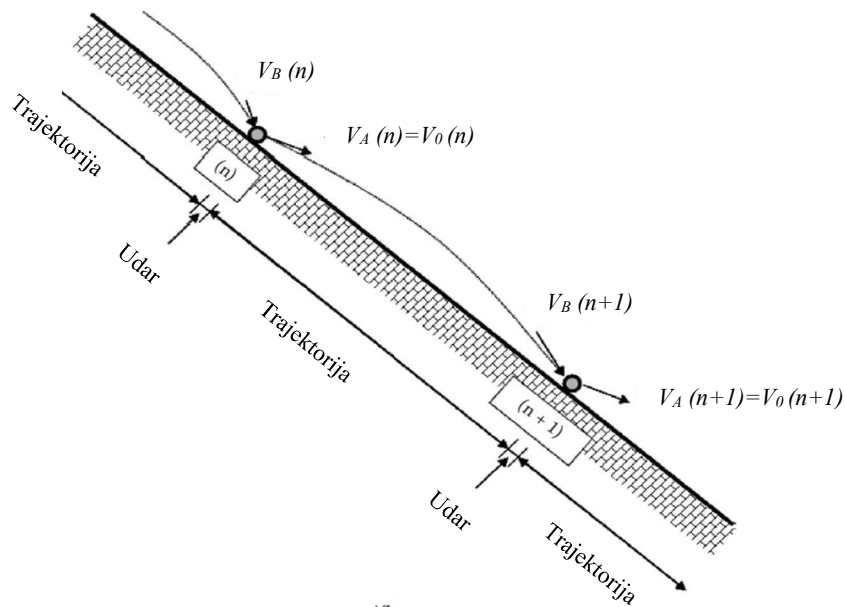
gdje su V_{NB} i V_{TB} (m/s) normalna i tangencijalna komponenta brzine bloka prije udara, a θ nagib segmenta. Brzine nakon udara računaju se koristeći koeficijent restitucije prema izrazu (16), preuzetom iz [18]:

$$\begin{aligned} V_{NA} &= R_N \cdot V_{NB}, & R_N &\in [0,1] \\ V_{TA} &= R_T \cdot V_{TB}, & R_T &\in [0,1] \end{aligned} \quad (16)$$

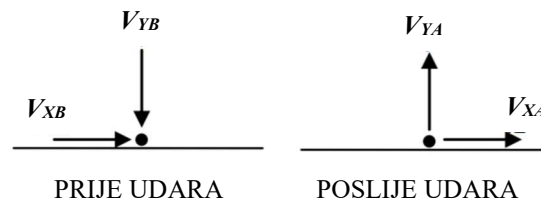
gdje je R_N normalni koeficijent restitucije, R_T tangencijalni koeficijent restitucije, a V_{NA} i V_{TA} (m/s) su normalna i tangencijalna komponenta brzine bloka nakon udara. Brzine poslije udara transformiraju se ponovno u horizontalne i vertikalne komponente prema izrazu (17), preuzetom iz [18]:

$$\begin{aligned} V_{XA} &= (V_{NA}) \cdot \sin(\theta) + (V_{TA}) \cdot \cos(\theta) \\ V_{YA} &= (V_{TA}) \cdot \sin(\theta) - (V_{NA}) \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad (17)$$

gdje su V_{XA} i V_{YA} (m/s) horizontalna i vertikalna komponenta brzine bloka nakon udara. Konačna brzina bloka se uspoređuje sa V_{min} . Ukoliko je ona veća od V_{min} proces počinje iz početka i traži se iduća točka sjecišta. Ako je brzina manja od V_{min} , blok se više ne smatra česticom te se zatim koristi algoritam klizanja.



Slika 15: Algoritam za simulaciju pada stijene [5]



Slika 16: Promjena brzine nakon udara bloka

4.2. Algoritam klizanja

Nakon što se blokovi više ne smatraju česticom ne može se nastaviti primjenjivati algoritam za simulaciju pada stijene, već se proračun gibanja blokova dok je on u kontaktu sa pokosom tada radi prema algoritmu klizanja. Blokovi mogu klizati po bilo kojem segmentu pokosa koji ima sljedeća svojstva: nagib pokosa θ i kut trenja φ koji može biti zadan konstantnom vrijednosti ili slučajnom distribucijom. Blok može početi klizati na bilo kojoj poziciji duž segmenta i imati početnu brzinu usmjerenu prema gore ili prema dolje, a u jednadžbu se uzima samo tangencijalna komponenta brzine u odnosu na segment pokosa. Klizanje prema dolje javlja se ako je početna brzina bloka usmjerena prema dolje ili je nula, a ponašanje bloka ovisi o veličini kuta trenja i nagibu pokosa. Ukoliko je nagib pokosa jednak kutu trenja $\theta = \varphi$, pokretačka sila (gravitacija) je jednaka sili otpora (trenje), te će blok kliznuti prema dolje na kraju segmenta brzinom koja je jednaka početnoj brzini ($V_{EXIT} = V_0$). Postoji poseban slučaj kada je $V_0 = 0$ i tada se blok ne miče, a simulacija završava. Ako je nagib pokosa veći od kuta trenja $\theta > \varphi$, pokretačka sila je veća od sile otpora i blok će kliznuti sa segmenta povećanom brzinom koja se računa prema izrazu (18), preuzetom iz [18]:

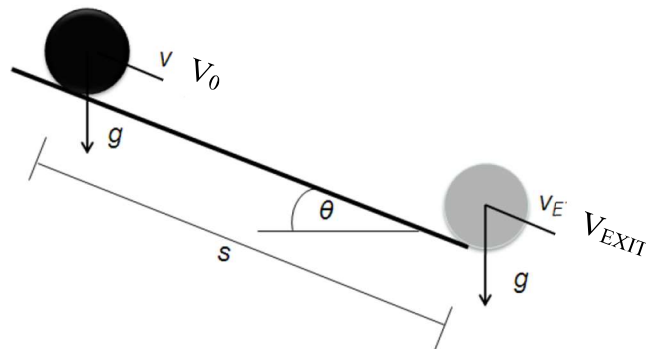
$$V_{EXIT} = \sqrt{V_0^2 - 2 \cdot s g k} \quad (18)$$

gdje V_{EXIT} predstavlja brzinu bloka koju ima na kraju segmenta, V_0 početnu brzinu bloka tangencijalnu na pokos, s udaljenost od početnog položaja do krajnje točke segmenta, g akceleraciju sile teže, $k = \pm \sin(\theta) - \cos(\theta) \cdot \tan(\varphi)$ (predznak + dolazi ukoliko je početna brzina bloka prema dolje ili nula, a predznak – ukoliko je početna brzina bloka prema gore). Ako je nagib pokosa manji od kuta trenja $\theta < \varphi$, sila otpora je veća od pokretačke sile i brzina bloka će se smanjiti. Uz pretpostavku da je segment beskonačno dug, računa se

duljina s (m) nakon koje će se blok zaustaviti, tako da se stavi da je izlazna brzina jednaka nuli $V_{EXIT} = \sqrt{V_0^2 - 2 \cdot s g k} = 0$, iz čega slijedi izraz (19), preuzet iz [18]:

$$s = \frac{V_0^2}{2 g k} \quad (19)$$

Ukoliko je duljina nakon koje će se blok zaustaviti veća od udaljenosti početnog položaja i kraja segmenta, blok će skliznuti na kraju segmenta, a izlazna brzina se tada računa prema izrazu (18). U suprotnom, blok će se zaustaviti na segmentu i simulacija će se zaustaviti.



Slika 17: Klizanje prema dolje

Kada blok kliže prema gore, sila trenja i akceleracija sile teže utječu na smanjenje brzine bloka. Uz pretpostavku da je segment beskonačno dug, blok će se zaustaviti nakon što prijeđe duljinu s (m) koju računamo prema izrazu (19). Ukoliko je duljina nakon koje će se blok zaustaviti veća od udaljenosti do kraja segmenta, blok će skliznuti, a izlazna brzina se računa prema izrazu (18). U suprotnom, blok će se zaustaviti na segmentu i simulacija će se zaustaviti. Ako blok kliže prema gore i zaustavi se, tada se na njega primjenjuje algoritam klizanja prema dolje. Ukoliko je segment dovoljno strm da dopusti klizanje, odnosno vrijedi odnos $\theta > \varphi$, blok će skliznuti sa donjeg kraja segmenta. Ako segment nije dovoljno strm, tada će se pozicija na kojoj se blok prestao kretati uzeti kao konačna pozicija i simulacija će se zaustaviti.

4.3. Visina i duljina trajektorije

Jednadžbe trajektorije koje opisuju putanju kamenog bloka kroz zrak mogu se koristiti i prilikom određivanja iduće točke udara, duljine pokosa između točaka udara te visine bloka iznad pokosa. Navedeni podaci korisni su za određivanje lokacije i projektiranje visine

zaštitnih ograda i barijera na pokosu. Koordinate točke udara mogu se odrediti izjednačavanjem jednadžbe trajektorije, odnosno paramaterske jednadžbe parabole definirane izrazom (11) i jednadžbe pokosa. Ukoliko pokos između točaka udara ima gradijent κ , tada se jednadžba pokosa može prikazati izrazom (20), preuzetom iz [5]:

$$Y = \kappa \cdot X \quad (20)$$

Izjednačavanjem izraza (10) i (19), gdje vrijedi $X_0 = Y_0 = 0$, dobije se x-koordinata točke udara X_{UDAR} (m) prikazana izrazom (21) koji je preuzet iz [5]:

$$\kappa \cdot X = -\frac{g}{2} \left(\frac{X}{V_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2 + X \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (21)$$

$$X_{UDAR} = \frac{-2 \cdot (\kappa - \operatorname{tg} \alpha)}{g \cdot \left(\frac{1}{V_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2}$$

gdje je α kut brzine V_0 za vrijeme $t = 0$. Nakon što je poznata vrijednost x-koordinate točke udara X_{UDAR} , ista se uvrsti u izraz (20) i dobije se y-koordinata Y_{UDAR} . Jednadžba trajektorije koristi se i za određivanje visine bloka h (m) u bilo kojoj točki iznad pokosa, kao i najveće visine h_{max} i njezine x-koordinate. Visina bloka iznad pokosa jednaka je razlici y-koordinata dobivenih izrazima (11) i (20), što je prikazano izrazom (22) koji je preuzet iz [5]:

$$\begin{aligned} h &= (Y_{traj} - Y_{pokos}) \\ &= (a \cdot X^2 + b \cdot X) - (\kappa \cdot X) \\ &= (a \cdot X^2) + X \cdot (b - \kappa) \end{aligned} \quad (22)$$

gdje je $a = -\frac{g}{2} \left(\frac{1}{V_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2$; $b = \operatorname{tg} \alpha$. Izraz (22) prikazuje visinu bloka iznad pokosa za bilo

koju vrijednost x-koordinate. Najveća visina bloka iznad pokosa dobiva se deriviranjem izraza (22) i izjednačavanjem jednadžbe sa nulom, što je prikazano izrazom (23) koji je preuzet iz [5]:

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dX} &= 2 \cdot a \cdot X + (b - \kappa) = 0 \\ X &= \frac{-(b - \kappa)}{2 \cdot a} \end{aligned} \quad (23)$$

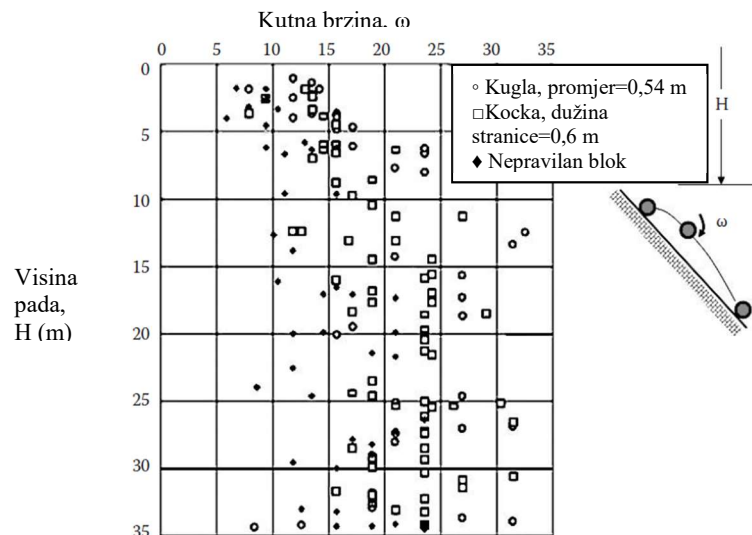
Vrijednost X se potom uvrsti u izraz (22) kako bi se dobila najveća visina trajektorije bloka iznad pokosa h_{max} .

4.4. Kutna brzina

Teorijska veza između translacijske i kutne brzine bloka na početku trajektorije te polumjera bloka stijenske mase može se odrediti preko izraza (24), preuzetog iz [5]:

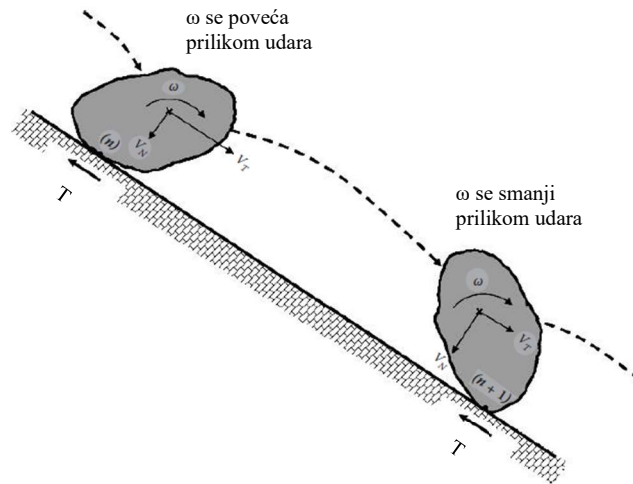
$$\omega_0 = \frac{V_0}{r} \quad (24)$$

gdje je ω_0 (rad/s) kutna brzina, V_0 (m/s) početna brzina, a r (m) polumjer bloka. Na slici 19 prikazan je dijagram odnosa kutne brzine ω i visine pada bloka H (m), koji je dobiven kao rezultat terenskog ispitivanja na tri različita oblika betonskog bloka (kugla, kocka, nepravilan oblik). Podaci prikazuju da kutna brzina može postići raspon od 6 do 33 rad/s . Raspon je sličan za sve vrste oblika blokova, s time da je kod betonskih blokova oblika kugle i kocke vrijednost kutne brzine neznatno veća (32 rad/s), dok je kod blokova nepravilnog oblika ona manja (27 rad/s).



Slika 18: Odnos kutne brzine i visine pada bloka [5]

Za vrijeme stvarnih odrona stijenske mase dolazi do značajnog rasipanja vrijednosti kutne brzine, te je realno za očekivati da će se tijekom udara ponekad povećati, a ponekad smanjiti. Varijacija kutne brzine ovisi o načinu pada nepravilnog bloka na grubu površinu kosine. Slika 19 detaljno prikazuje dva uzastopna udara nepravilna bloka, uz pojavu otpora trenja T na mjestu udara. Kod točke udara n , normalna i tangencijalna komponenta brzine stvaraju moment koji ima tendenciju povećanja kutne brzine, dok u točki $n+1$ moment stvoren od komponenta brzine je suprotna smjera, stoga djeluje ka smanjenju kutne brzine.



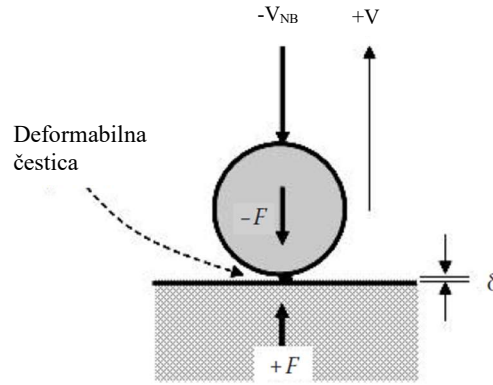
Slika 19: Utjecaj pada nepravilnog bloka na kutnu brzinu [5]

4.5. Mehanika udara bloka nerotirajućeg krutog tijela

Teorija mehanike udara može se primijeniti na odrone s ciljem boljeg razumijevanja samog procesa udara, a u nastavku je opisana promjena energije tijekom udara, proračun brzine i količine gibanja odronjenog materijala.

4.5.1. Sila i količina gibanja prilikom kolinearnog udara

Proračun sile i količine gibanja prilikom udara bloka o padinu sadrži drugi i treći Newtonov zakon gibanja. Udar nerotirajućeg krutog tijela koje se kreće relativnom brzinom V_N (m/s) i udara u nepomičnu površinu pod pravim kutom, može se simulirati beskonačnom deformabilnom česticom točno na mjestu kontakta između ta dva tijela (slika 20). Čestica se ponaša kao kratka, kruta opruga koja tijekom udara stvara jednake, ali suprotno orijentirane sile reakcije F i $-F$, paralelne sa smjerom brzine. Sile reakcije mijenjaju impuls tijela, a time i brzinu, dok masa ostaje konstantna.



Slika 20: Sile tijekom udara [5]

Promjena impulsa stvara konačnu količinu gibanja p koja neprekidno mijenja brzinu tijekom udara. Za vrijeme udara bloka mase m , promjena normalne brzine odvija se od brzine V_{Ni} u vrijeme udara ($t=i$) sve do brzine V_N u određenom vremenu t . Normalna komponenta količine gibanja p_N , nastala utjecajem normalne komponente kontaktne sile $F(t)$, dana je izrazom (25), preuzetom iz [5]:

$$dp_N = m \cdot (V_N - V_{Ni}) = Fdt \quad (25)$$

gdje je m (kg) masa bloka, F (N) sila reakcije. Daljnjom razradom odnosa količine gibanja i sile reakcije dobije se izraz (26) preuzet iz [5]:

$$\begin{aligned} F &= m \cdot \frac{dv}{dt} \\ dp_N &= m \cdot \frac{dv}{dt} dt \\ dV_N &= \frac{dp_N}{m} \\ m \cdot (V_N - V_{Ni}) &= \int_i^t Fdt = p_N \end{aligned} \quad (26)$$

Normalna brzina V_N se u bilo kojem trenutku t tijekom udara može dobiti integriranjem prema izrazu (27), preuzetom iz [5]:

$$\begin{aligned} V_N &= \int_{i(i)}^t \frac{1}{m} dp_N \\ V_N &= V_{Ni} + \frac{p_N}{m} \end{aligned} \quad (27)$$

uz uvjet $V_{Ni} < 0$, gdje je V_{Ni} (m/s) normalna komponenta brzine bloka za vrijeme udara. Brzina V_{Ni} je negativna zbog toga što je vertikalna pozitivna koordinatna os usmjerena

suprotno od smjera udara bloka. Izraz (27) prikazuje da je normalna komponenta brzine linearna funkcija normalne količine gibanja. Takav odnos brzine i količine gibanja je osnova za određivanje promjena u količini gibanja za vrijeme udara i pronalaženja konačne količine gibanja p_f pri završetku udara ($t=f$), kada se tijelo odvoji od pokosa. Izraz (27) se koristi i prilikom definiranja količine gibanja pri najvećoj kompresiji p_{cN} . U točki najveće kompresije normalna brzina je jednaka nuli, a količina gibanja p_N postaje p_{cN} , što je prikazano izrazom (28) preuzetom iz [5]:

$$0 = V_{Ni} + \frac{p_{cN}}{m} \quad (28)$$

$$p_{fN} = -m \cdot V_{Ni}$$

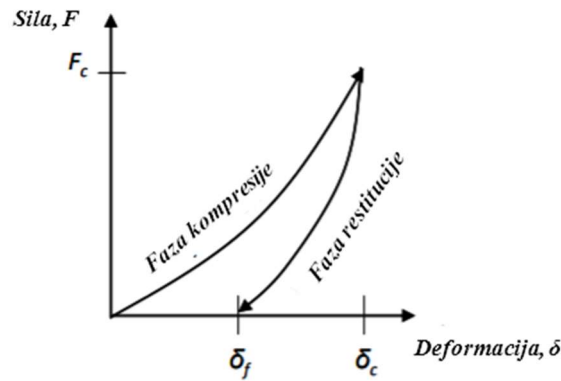
Po završetku udara ($t=f$), konačna normalna komponenta brzine V_{Nf} i konačna količina gibanja p_{fN} se također mogu odrediti preko izraza (29) koji je preuzet iz [5]:

$$p_{fN} = (m \cdot V_{Nf} - m \cdot V_{Ni}) \quad (29)$$

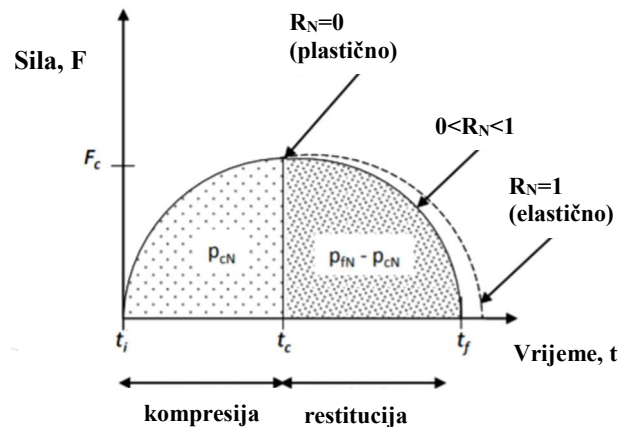
gdje je V_{Nf} (m/s) normalna komponenta konačne brzine bloka nakon udara.

4.5.2. Promjena energije tijekom udara

Proces udara deformabilne čestice (slika 20) tijekom faze kompresije, rezultira kompresijom δ , nakon koje slijedi ekspanzija tijekom faze restitucije. Promjena normalne kontaktne sile F u točki udara prikazana je na slici 21, gdje sila F_c i deformacija δ_c predstavljaju maksimalnu vrijednost kompresije koja se javlja na kraju istoimene faze, dok nakon nje slijedi djelomično obnavljanje δ_f od neelastičnog udara koji se javlja na kraju faze oporavka. Obnavljanje kinetičke energije je proces koji u završnoj fazi udara, nakon najveće kompresije, razdvaja tijela. Slika 22 prikazuje promjenu kontaktne sile F kroz vrijeme t . Površina ispod krivulje $t-F$ od vremena t_i do t_c predstavlja količinu gibanja p_c stvorenu tijekom faze kompresije, odnosno kinetičku energiju gibanja koja je pretvorena u unutarnju deformabilnu energiju. Područje između vremena t_c i t_f definira promjenu količine gibanja ($p_f - p_c$) i ono predstavlja obnovljenu energiju tijekom faze restitucije. Promjene u brzini za vrijeme udara mogu se kvantificirati kroz normalni koeficijent restitucije R_N koji predstavlja omjer normalne komponente brzine odmah nakon udara V_{NA} i brzine neposredno prije udara V_{NB} . Prilikom elastičnog udara obje površine ispod krivulje $t-F$ su jednake i vrijedi $R_N = 1$, dok kod plastičnog udara nema obnavljanja energije, te je $R_N = 0$.

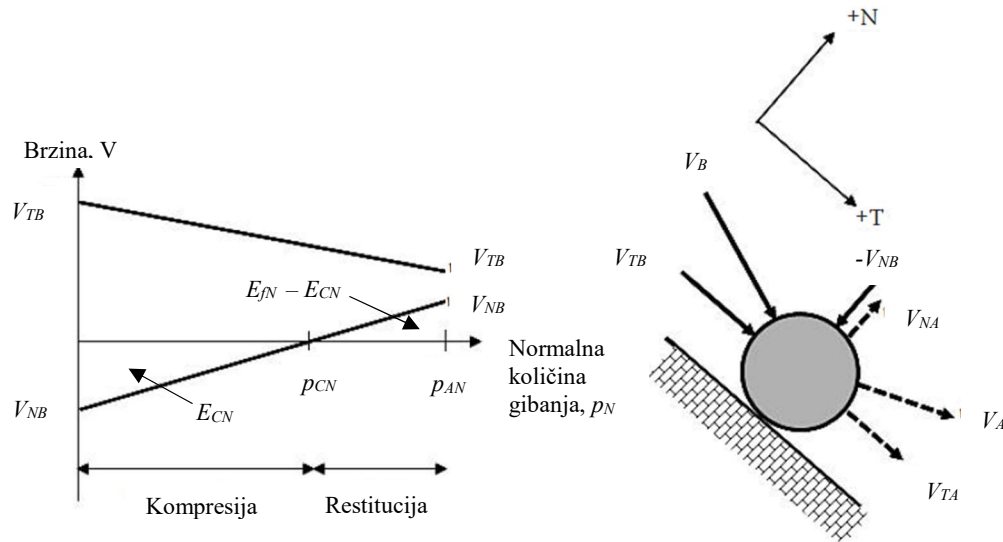


Slika 21: Odnos sile i deformacije u točki udara [5]



Slika 22: Promjena sile u vremenu i odnos koeficijenta restitucije [5]

Razdvajanje faza kompresije i restitucije prilikom udara može se prikazati kroz odnos količine gibanja te normalne i tangencijalne komponente brzine, što je i demonstrirano slikom 23. Normalna komponenta brzine mijenja se na način da počinje od negativne vrijednosti $-V_{NB}$ na mjestu udara, povećavajući se prema nuli u točki najveće kompresije p_c i na kraju, u točki odvajanja čestice, postiže pozitivnu vrijednost V_{NA} . Tangencijalna komponenta brzine kontinuirano se smanjuje od vrijednosti V_{TB} na mjestu udara, pa sve do vrijednosti V_{TA} koja je ostvarena za vrijeme odvajanja, a smanjenje se ostvaruje zbog utjecaja trenja na dodirnoj površini.



Slika 23: Promjena normalne i tangencijalne komponente brzine u odnosu sa normalnom količinom gibanja [5]

U odnosu na energiju deformacije, trokutasto područje E_{cN} predstavlja kinetičku energiju normalnog gibanja koja se apsorbira tijekom faze kompresije u deformabilnom području, dok trokutasto područje $E_{fN} - E_{cN}$ predstavlja energiju elastičnog naprezanja koja se javlja tijekom faze restitucije. Izraz (30), preuzet iz [5] predstavlja promjenu energije tijekom faze kompresije:

$$E_{cN} = \int_0^{p_{cN}} V dp = \int_0^{p_{cN}} \left(V_{NB} + \frac{p_N}{m} \right) dp \quad (30)$$

$$= V_{NB} \cdot p_{cN} + \frac{p_{cN}^2}{2m}$$

gdje je E_{cN} (J) kinetična energija prilikom normalnog gibanja. Uvrštavanjem izraza (28), dobije se izraz za kinetičku energiju (31), preuzet iz [5]:

$$E_{cN} = -\frac{1}{2} m \cdot V_{NB}^2 \quad (31)$$

Promjena energije tijekom faze restitucije dana je izrazom (32) koji je preuzet iz [5]:

$$(E_{NA} - E_{NB}) = \int_{p_{cN}}^{p_{fN}} \left(V_{NB} + \frac{p_N}{m} \right) dp = \left[V_{NB} \cdot p_N + \frac{p_N^2}{2m} \right]_{p_{cN}}^{p_{fN}} \quad (32)$$

$$= \frac{1}{2} m \cdot V_{NB}^2 \cdot \left(\frac{p_{fN}}{p_{cN}} - 1 \right)^2$$

uz uvjet $V_{NB} < 0$, gdje je $E_{NA} (J)$ energija neposredno nakon udara, a $E_{NB} (J)$ energija prije udara.

4.6. Mehanika udara bloka hrapavog rotirajućeg tijela

Kada odronjena stijenska masa udari o pokos, parametri koji utječu na uvjete ponašanja gibanja su translacijska i rotacijska brzina u trenutku udara, te kut udara θ u odnosu na padinu. Pored toga, karakteristike padine definirane su normalnim koeficijentom restitucije i koeficijentom trenja. Potrebno je odrediti i translacijske i rotacijske brzine neposredno nakon udara kao i kut pod kojim tijelo napušta padinu, odnosno odskače od nje. Teorija mehanike udara između dva nepravilna, hrapava, rotirajuća tijela koja se gibaju u trodimenzionalnom prostoru se za potrebe odrona pojednostavljuje na način da jedno tijelo (padina) ima beskonačnu masu i nepokretno je. Ostala pojednostavljenja uključuju pojavu trenja samo u točki udara te gibanje drugog tijela u dvodimenzionalnom prostoru. Veličina i oblik tijela definirani su polumjerom r i polumjerom vrtnje K .

4.6.1. Proračun količine gibanja

Sferično tijelo mase m , polumjera r , polumjera vrtnje K udara u pokos pod određenim kutem θ . Udar stijenske mase stvara normalne i tangencijalne komponente količine gibanja koje u trenutku udara tijela mijenjaju normalnu i tangencijalnu komponentu brzine. Na promjenu brzine utječe i veličina normalnog koeficijenta restitucije te granična vrijednost koeficijenta trenja μ . Za bilo koji trenutak tijekom udara postoji linearna jednadžba koja opisuje odnos između normalne komponente količine gibanja p_N i razlike u normalnim komponentama brzine V_N i V_{NB} , opisana izrazom (33) koji je preuzet iz [5]:

$$p_N = m \cdot (V_N - V_{NB}) \quad (33)$$

Odgovarajuća jednadžba tangencijalne komponente količine gibanja p_T dana je izrazom (34) koji je preuzet iz [5]:

$$-p_T = m \cdot (V_T - V_{TB}) \quad (34)$$

S obzirom na rotaciju bloka sa kutnom brzinom ω u vremenu t , početnom kutnom brzinom ω_i te momentom inercije I , izrazom (35) koji je preuzet iz [5] određuje se jednadžba kutne količine gibanja:

$$I(d\omega) = I(\omega - \omega_i) = \int_0^t Fr \, dt \quad (35)$$

$$m \cdot K^2(\omega - \omega_i) = p_T \cdot r$$

gdje je moment inercije $I = m \cdot K^2$ (kg m^2). Volumeni i polumjeri vrtnje tijela koji simuliraju pad odronjenog materijala su navedeni u tablici 3.

Tablica 3: Izrazi za volumen i polumjer vrtnje najčešćih oblika blokova [5]

OBLIK TIJELA	VOLUMEN, V	OSNI POLUMJER VRTNJE, K
Kocka: duljina stranice L	L^3	$\frac{L}{\sqrt{6}}$
Kugla: polumjer r	$\frac{4}{3}\pi r^3$	$\left(\frac{2}{5}\right)^{0.5} r$
Valjak: duljina L , polumjer r	$\pi r^2 L$	$\left(\frac{3r^2 + L^2}{12}\right)^{0.5}$
Elipsoid: osi $2a, 2b, 2c$	$\frac{4}{3}\pi abc$	$\left(\frac{(a^2 + b^2)}{5}\right)^{0.5}$

4.6.2. Brzine tijekom udara odronjenog materijala

Prilikom pada rotirajućeg bloka pod kosim kutem na padinu, blok će imati i translacijsku brzinu V i kutnu brzinu ω , pri čemu je translacijska brzina izražena kroz normalnu i tangencijalnu komponentu u odnosu na površinu padine. Na mjestu udara bloka javljaju se sile jednakog iznosa, a različitog smjera $F, -F$, koje se suprotstavljaju prodiranju bloka u padinu te stvaraju diferencijal količine gibanja dp u normalnom i tangencijalnom smjeru koji je prikazan izrazom (36), preuzet iz [5]:

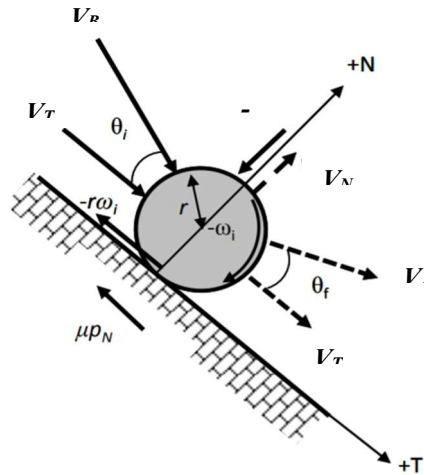
$$dp = F \cdot dt \quad (36)$$

Newtonov drugi zakon gibanja opisuje translacijsko gibanje centra mase padajućeg bloka u normalnim i tangencijalnim ravninama kroz izraz (37), te u ravninskoj rotaciji kroz izraz (38), a koji su preuzeti iz [5]:

$$dV_N = \frac{dp_N}{m} \quad (37)$$

$$dV_T = \frac{dp_T}{m}$$

$$d\omega = \frac{r}{m \cdot K^2} dp \quad (38)$$



Slika 24: Sile i brzine prilikom udara rotirajućeg tijela u ravninskom gibanju [5]

Principi mehanike udara tijela opisani u ovom poglavlju, vezani uz promjenu brzine i količine gibanja tijekom udara tijela, mogu se koristiti prilikom dobivanja jednadžbi za normalnu i tangencijalnu komponentu brzine (V_{NA} , V_{TA}) neposredno nakon udara. U slučaju udara pri kojem se dogodi prijelaz sa klizanja u kotrljanje, izrazi (39) i (40) preuzeti iz [5], predstavljaju tangencijalnu i normalnu komponentu brzine u centru mase kuglastog tijela neposredno nakon udara u padinu:

$$V_{TA} = V_{TB} - \frac{(V_{TB} + r \cdot \omega_i)}{\left(1 + \frac{r^2}{K^2}\right)} \quad (39)$$

$$V_{NA} = -V_{NB} \cdot R_N \quad (40)$$

Kutna brzina neposredno nakon udara ω_f (rad/s) određena je izrazom (41), preuzet iz [5]:

$$\omega_f = \omega_i - \frac{r}{K^2} \cdot \frac{(V_{TB} + r \cdot \omega_i)}{\left(1 + \frac{r^2}{K^2}\right)} \quad (41)$$

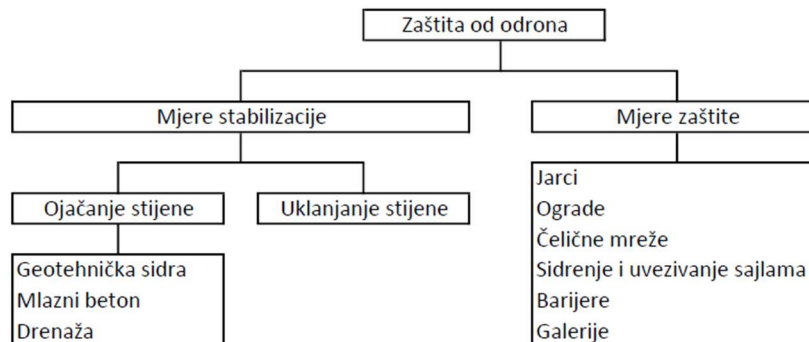
Preko izraza (39) i (40) može se odrediti brzina V_A (m/s) koja predstavlja povratnu brzinu neposredno nakon udara kojom tijelo dalje nastavlja putanju, što je prikazano izrazom (42), te kut θ_f pod kojim tijelo nastavlja putanju u odnosu na površinu padine, preko izraza (43), a koji su preuzeti iz [5]:

$$V_A = \sqrt{V_{TA}^2 + V_{NA}^2} \quad (42)$$

$$\theta_f = \operatorname{atg}\left(\frac{V_{NA}}{V_{TA}}\right) \quad (43)$$

5. MJERE ZAŠTITE OD ODRONA

Blokovi odronjene stijenske mase variraju od veličine šake pa sve do ekstremno velikih blokova stijene, koji se ovisno o veličini i obliku kotrljaju, odskakuju, padaju slobodnim padom te kližu, dok gibanje najčešće završavaju na području udaljenom od mjesta izvornog pada. Područja podložna hazardu, a koja se koriste za rekreaciju ljudi ili za prometnu infrastrukturu, trebala bi se adekvatno zaštititi odgovarajućim mjerama tako da posljedice odrona i/ili eventualna opasnost za ljude ostanu na minimalnoj razini. Mjere koje se primjenjuju u svrhu sprječavanja opasnosti od odrona se najčešće dijele na mjere stabilizacije, zaštite i upozorenja [16]. Mjere stabilizacije koriste se za trajno smanjenje opasnosti od odrona ili za poboljšanje stabilnosti kosine. Mjere zaštite imaju znatno niže troškove u odnosu na mjere stabilizacije zbog jednostavnosti ugradnje na stijenu, ali zahtijevaju redovito održavanje. Mjere upozorenja su ograničene na znakove i signalizaciju postavljenu na cestama i željeznicama koja navodi na oprez radi moguće opasnosti od odrona.



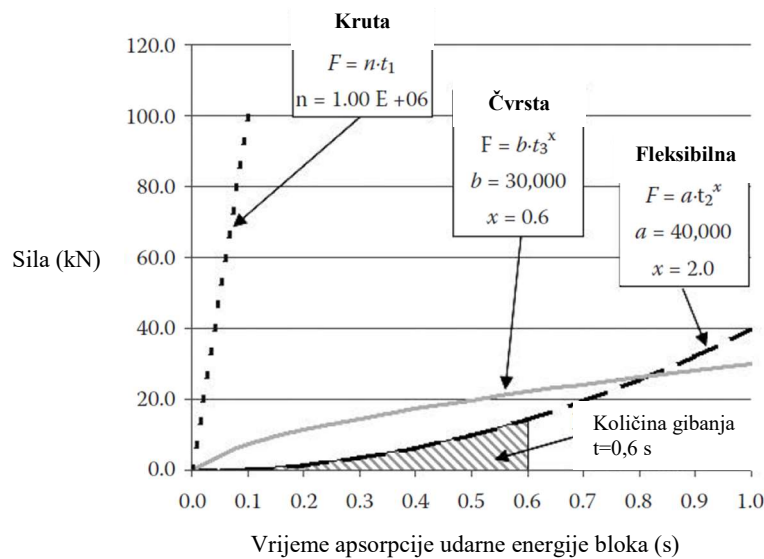
Slika 25: Kategorije mjera zaštite stijenske mase od odrona

Od iznimne je važnosti da se za svaku potencijalno nestabilnu lokaciju odabere prikladna mjera stabilizacije i zaštite pokosa. Na primjer, kod strmih padina čija se nožica nalazi u blizini ruba prometnice neće biti mjesta za kopanje jaraka ili postavljanje ograde, stoga se pristupa nekim alternativnijim rješenjima kao što je uklanjanje potencijalno opasnih i nestabilnih blokova, sidrenje blokova te prekrivanje stijene čeličnom mrežom. Barijere za zaštitu od odrona, ograde od čelične mreže te mreže postavljene po licu pokosa imaju jednu zajedničku karakteristiku, a to je učinkovita apsorpcija udarne energije bloka, koja zahtijeva da su navedene strukture u isto vrijeme i fleksibilne i krute. Fleksibilnost strukture omogućuje skretanje bloka prilikom udara, dok krutost omogućuje apsorpciju energije [5]. Jedan od važnijih čimbenika prilikom postavljanja zaštitnih struktura je određivanje lokacije

pada bloka gdje je energija udara mala. Kako bi se ograničila energija udara, struktura se treba nalaziti odmah nakon mjesta udara, budući da za to vrijeme dolazi do rasipanja energije prilikom plastične deformacije tla sa blokom stijenske mase.

5.1. Krute, fleksibilne i čvrste strukture

Kapacitet zaštitnih struktura da apsorbira energiju pada bloka određuje se ispitivanjem sile koja nastaje u zaštitnoj strukturi prilikom udara. Na slici 26 prikazan je dijagram *vrijeme-sila* za tri različite vrste zaštitne ograde, koji ne opisuje njihovo stvarno ponašanje, već prikazuje razliku između krutih, fleksibilnih i čvrstih struktura. Cilj proučavanja odnosa između vremena potrebnog za apsorpciju udarne energije i veličine sile stvorene udarom u zaštitnu strukturu je u projektiranju i odabiru odgovarajućih vrsta struktura kod kojih se sila samo umanjuje, a ne apsorbira se u potpunosti. Umanjivanjem sile moguće je konstruirati zaštitne strukture koristeći laganeje te ekonomski prihvatljivije materijale, nego koristiti strukture koje u potpunosti apsorbiraju svu energiju prilikom pada bloka.



Slika 26: Odnos vremena udara i sile stvorene u različitim zaštitnim strukturama [5]

Krute strukture reprezentiraju masivni betonski zidovi kod kojih razbijanje betona i trajno oštećenje strukture predstavlja osnovno sredstvo rasipanja energije. Takvo ponašanje je prikazano na slici 26 kao ravna linija strmog nagiba koja predstavlja veoma kratko vrijeme apsorpcije udara prije loma, koji nastaje kada sila dosegne čvrstoću betona. Iz navedenog se

može zaključiti kako betonski zidovi nisu učinkovite zaštitne strukture protiv odrona. Kod fleksibilnih struktura zahtijeva se fleksibilnost svih komponenti te apsorpcija energije kroz deformaciju elemenata bez naznake oštećenja istih. Deformacija se javlja prije apsorpcije energije, a ukoliko baze potpornih stupova sadrže zglobove sa malo trenja, energija se ne apsorpira sve dok stupovi na zglobovima rotiraju. Na slici 26 krivulja fleksibilnih struktura pokazuje kako se malena količina sile apsorpira na početku udara, a povećanjem deformacije strukture povećava se i sila. Takve strukture su učinkovite u prihvaćanju odronjene mase, ali moraju biti dovoljno snažne kako bi uspjele zadržati materijal na mreži i apsorbirati njegovu punu udarnu energiju. Čvrste strukture su modificirane fleksibilne strukture koje su projektirane tako da već na samom početku udara apsorbiraju energiju. Krivulja čvrstih struktura ima konstantan gradijent prirasta sile u vremenu nakon prvotnog udara sa zaštitnom strukturom.

5.1.1. Količina apsorbirane energije

Krivulje prikazane slikom 26 nastale su preko sljedećih odnosa. Kod krute strukture sila apsorpcije energije udara $F (N)$ određena je izrazom (44) koji je preuzet iz [5]:

$$F = n \cdot t_1 \quad (44)$$

gdje je n nagib linije analogne krutosti strukture, a $t_1 (s)$ predstavlja vrijeme trajanja kontakta tijekom udara između bloka i krute strukture. U primjeru masivnih betonskih nearmiranih zidova može se pretpostaviti nagib krivulje od $n = 1 \cdot 10^6$ jedinica, koji je u skladu sa kratkotrajnim kontaktom prilikom kojeg nastaju velike sile u strukturi. Krivulja fleksibilne strukture izražena je preko izraza (45) koji je preuzet iz [5]:

$$F = a \cdot t_2^x \quad (45)$$

gdje je oznaka a konstanta, $t_2 (s)$ predstavlja vrijeme trajanja kontakta, a eksponent x ima vrijednost veću od 1, koja generira krivulju kod koje je sila apsorpcije na početku kontakta zanemarena, dok se kroz vrijeme brzo povećava. Krivulja čvrste strukture određena je izrazom (46) koji je preuzet iz [5]:

$$F = b \cdot t_3^x \quad (46)$$

gdje je oznaka b konstanta, $t_3 (s)$ predstavlja vrijeme trajanja kontakta, a eksponent x ima vrijednost manju od 1, koja generira krivulju kod koje se sila neprekidno povećava tijekom vremena trajanja kontakta. Površina ispod krivulja sa slike 26 predstavlja količinu gibanja koja je apsorbirana tijekom udara odronjene stijenske mase u zaštitnu strukturu u bilo kojem

vremenskom intervalu. Količina gibanja definirana je kao $(m \cdot v_i)$, gdje m (kg) predstavlja masu odronjene mase, a v_i (m/s) brzinu neposredno prije udara u strukturu. Trajanje kontakta mora biti dovoljno dugo kako bi se količina gibanja prilikom udara mogla apsorbirati, a upravo ta razlika u trajanju kontakta navodi na različitu krutost konstrukcija. Svrha takvog proračunskog pristupa je smanjiti sile u zaštitnoj strukturi, a što se postiže relativno dugim trajanjem kontakta. Količina gibanja krutih struktura određuje se pomoću izraza (44) u vremenu trajanja kontakta t_1 , a dana je izrazom (47), preuzet iz [5]:

$$p = \int_0^{t_1} F dt = n \int_0^{t_1} t dt = \frac{1}{2} n \cdot t_1^2 \quad (47)$$

Količina gibanja fleksibilnih struktura dana je izrazom (48), preuzet iz [5]:

$$p = \int_0^{t_2} F dt = a \int_0^{t_2} t^x dt = \frac{a}{(x+1)} t_2^{(x+1)} \quad (48)$$

Količina gibanja čvrstih struktura dana je izrazom (49), preuzet iz [5]:

$$p = \int_0^{t_3} F dt = b \int_0^{t_3} t^x dt = \frac{b}{(x+1)} t_3^{(x+1)} \quad (49)$$

5.2. Vrste mjera zaštite od odrona

Odabir zaštitnih struktura koje su pogodne za određenu lokaciju ovisi o tri faktora: kinetičkoj energiji tijekom udara, geometriji područja te isplativosti troškova [5]. Kinetička energija prilikom udara definirana je masom m i brzinom V gibajućeg bloka kroz izraz (50) preuzet iz [5]:

$$E_K = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (50)$$

Masa odronjenog bloka ovisi o razmaku diskontinuiteta i dimenzijama blokova koji se mogu formirati. Čvrstoća stijenske mase također utječe na energiju udara. Blokovi slabije stijene više teže ka rasipanju na manje odlomke, dok blokovi čvrste stijene zadržavaju svoju masu prilikom pada. Brzina odrona ovisi o visini pada, kutu nagiba padine te efektivnom koeficijentu trenja koji povezuje hrapavost površine padine i materijal od kojega je padina izgrađena. Glavni parametri vezani uz geometriju područja su visina pada bloka te kut nagiba padine. Geometrija određuje trajektoriju, a time i zahtijevanu visinu zaštitnih struktura. Udaljenost između nožice padine i objekta koji se štiti uvjetuje prostor za postavljanje zaštitnih struktura. Mjere zaštite kao što su ograde ili krute barijere poželjno je smjestiti u

razini prometnice ili šticenog objekta budući da to olakšava izgradnju i daljnje održavanje. Ukoliko je prostor ograničen potrebno je postaviti strukture po padini, kao što je primjer usidrene čelične mreže. Troškovi izgradnje zaštitnih struktura trebaju biti u skladu sa očekivanim troškovima eventualnih šteta nastalim uslijed odrona. Skupa rješenja poput armiranobetonskih galerija su opravdana jedino u slučajevima moguće opasnosti od pojave velikih odrona na mjestima poput autocesta ili željeznica čije bi posljedice bile veoma kobne. U nastavku je opisano nekoliko najpoznatijih zaštitnih struktura koje se koriste širom svijeta.

5.2.1. Jarci

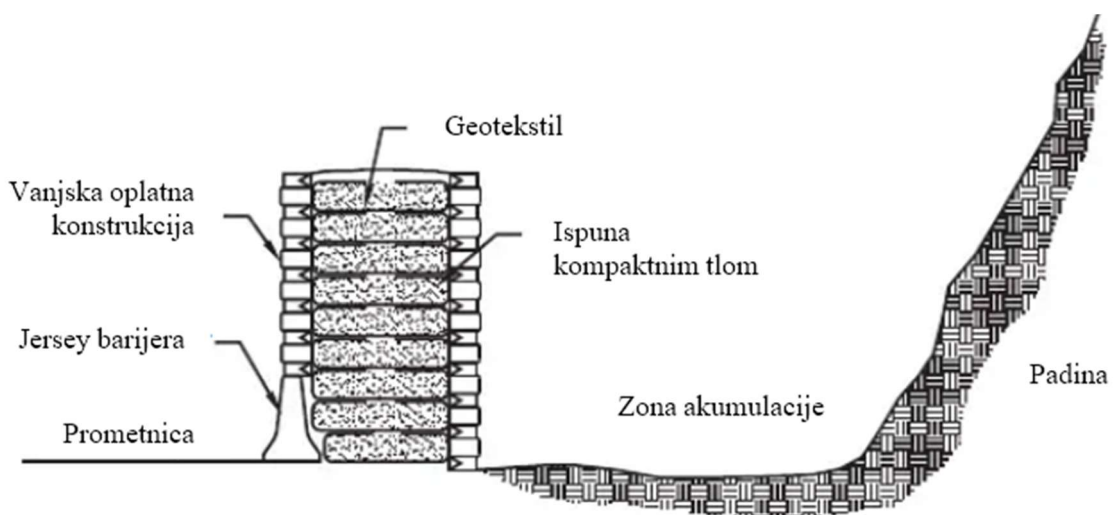
Jarci se svrstavaju u pouzdane i jeftine mjere zaštite koje zahtijevaju minimalno održavanje. Najčešće se izvode na nožici padine ukoliko postoji dovoljno prostora za njegov smještaj, a njegovo dno bi trebalo biti prekriveno slojem šljunka kako bi apsorbirao energiju odronjenog stijenskog bloka. Za projektiranje jarka potrebno je numeričkim analizama izračunati trajektorije potencijalno nestabilnih blokova [3]. Kako odronjeni blok ne bi nakon udara u jarak i odbijanja dosegao kolnik, prostor između jarka i prometnice se preporučuje zaštititi barijerama kao što su kruti betonski blokovi te gabioni. Kriterij za minimalnu udaljenost između nožice pokosa i barijere je taj da se ne smije dopustiti da bilo koji kamen pogodi barijeru prije nego što se njegova kinetička energija smanjila udarom u sloj šljunka u jarku. Obično ih se koristi u kombinaciji s drugim mjerama zaštite.



Slika 27: Jarak za hvatanje odrona [3]

5.2.2. MSE barijere

Zemljom mehanički stabilizirane barijere (*MSE – mechanically stabilized earth*) imaju sposobnost visokoenergetskog kapaciteta čije se dimanzije prilagođavaju potrebnom energetskom kapacitetu i očekivanoj trajektoriji odronjenog bloka. Masa *MSE* barijere definirana je njezinom širinom i visinom, a otpor posmičnoj deformaciji se postiže uporabom zbijenog, zrnatog tla u čijim se horizontalnim slojevima postavlja geomreža ili mreža od dvostruko uvijene žice heksagonalnog otvora. Takva se konstrukcija lako prilagođava nepravilnim temeljnim površinama, a poprečni presjek može poprimiti različite oblike kako bi što bolje odgovarao uvjetima dane lokacije. U praksi se pokazalo kao dobra ideja korištenje drvene građe, vreća sa pijeskom ili gabiona zaštićenih gumenom transportnom trakom kao vanjski dio barijere na strani koja je okrenuta prema padini, budući da djeluje povoljno na disipaciju energije bloka prilikom udara, dok se sa strane prema prometnici kao vanjska obloga postavljaju betonski blokovi duž cijele visine barijere, vegetacija te drvena građa. Nedostatak *MSE* barijera je potreba za velikim slobodnim prostorom koji uključuje i zonu akumulacije odronjenog stijenskog materijala. Osim toga, potrebno je imati i pristup za tešku mehanizaciju koja služi za njihovu izradu, ali i za uklanjanje nakupljenog odronjenog materijala. Prednost je u ekonomičnoj izradi i održavanju barijera, posebno na područjima koja su lako dostupna sa opremom i nalaze se u blizini glavnih prometnica.



Slika 28: MSE barijera [5]

Prilikom projektiranja *MSE* barijera važno je uzeti u obzir značajke njezinih pojedinih dijelova kako bi se što bolje zaštitilo područje podložno hazardu. Poželjno je da je vanjska obloga strma (nagiba većeg od 65°) kako bi mogla preusmjeriti odronjene blokove u zonu akumulacije materijala i spriječiti ih da se otkotrljaju preko nje. Međutim, nije potrebno da obje strane obloge budu istog nagiba. Temelj barijere ugrađuje se na dubinu polovice visine jednog elementa vanjske obloge kako bi se povećao otpor na smicanje duž baze konstrukcije. Visina obuhvaća dva dijela ($H=H_1+H_2$). Prvi dio visine H_1 definiran je uvjetom da spriječi daljnje napredovanje odronjenog bloka, a što ovisi o visini najveće moguće trajektorije. Drugi, gornji dio barijere visine H_2 nalazi se iznad najviše moguće točke udara, te služi za stvaranje dodatne težine koja osigurava potrebnu otpornost na smicanje horizontalnih slojeva u razini udara. Minimalna širina vrha iznosi 0,8 m, a prema potrebi se povećava u slučaju većih blokova i veće energije udara. Tijelo, odnosno središnji dio barijere ispunjeno je tlom koje je ojačano horizontalnim elementima (geomreža, mreža od dvostruko uvijene žice) postavljenim na vertikalnom razmaku između 0,7 i 1 metra. Ojačanje je povezano sa elementima vanjske obloge kako bi se stvorila homogena struktura. Materijal ispune tijela barijere sastoji se od samodrenirajućih, čistih i uglatih zrna veličine 5 do 50 mm. Slojevi se postavljaju na debljinu od najviše 300 mm i potom se zbijaju na 95% Proctorove gustoće. Svrha zbijanja je povećati gustoću i masu barijere čime se povećava posmična čvrstoća i karakteristike apsorpcije energije [5].

5.2.3. Ograde za detekciju odrona

Ograde za detekciju odrona sastoje se od niza stupova postavljenih u nožici padine između kojih se nalaze horizontalno postavljene električne žice i senzori, a najčešće se koriste uz željezničke pruge. Ukoliko dođe do odrona pri kojemu blok slomi jednu od žica, šalje se signal koji upozorava na oprez i smanjenu brzinu na tom dijelu pruge. Prikladne su na željeznicama za teretni promet gdje se promet kontrolira pomoću signalnih sustava, a njihova im brzina omogućuje zaustavljanje na udaljenosti od oko 1 do 2 kilometra. Prednost je u laganoj izvedbi konstrukcije i održavanju, dok se kao nedostatak očituje alarmiranje sustava već prilikom pada manjih fragmenata stijene ili snijega i leda koji nisu dovoljno veliki da bi ugrozili promet, te potreba za izvorom snage za potrebe rada električne mreže i sustava za alarmiranje.



Slika 29: Ograda za detekciju odrona [19]

5.2.4. Mreže za zaštitu pokosa

Tehničko rješenje kod kojeg se koristi pocinčana dvostrukopletena heksagonalna mreža, koja može biti puštena sa vrha kosine (kao zavjesa) ili se nalaziti u kombinaciji sa sidrima, čeličnom užadi i ankerima [20]. Svrha postavljanja mreže nije zaustaviti odronjeni materijal, nego uhvatiti blokove između površine stijene i mreže i time smanjiti horizontalnu komponentu brzine koja uzrokuje odbijanje bloka na kolnik ili neku drugu šticienu konstrukciju [3]. Kako bi se ostvarila funkcija stabilizacije manjih kamenih blokova, potrebna je dobra prionjivost mreže s podlogom koja bi trebala biti relativno ravna, a najveće odstupanje 5 cm na 1 m duljine. Mreže se postavljaju na površinu pokosa koju je potrebno očistiti od vegetacije i nestabilnih blokova, a osim pokosa potrebno je počistiti i 1,5 m kosine iznad ruba. Najprije se po vrhu kosine izvode bušotine i u njih ugrađuju sidra minimalne duljine 80 cm na međusobnom razmaku od 1,5 m, a kuke na završetku sidra okreću se od ruba kosine tako da mogu prihvatiti čeličnu užad kojom se hvata zaštitna mreža. Razmotavanje mreže se može odvijati od nožice kosine prema gore ili sa krune kosine prema dolje. Nakon postavljanja mreže, potrebno je ispreplesti čelično uže promjera 12 mm ispod ugrađenih sidara po vrhu kosine te sa mrežom napraviti preklap preko čelične užadi, kako bi učvrstilo mrežu cijelom širinom panela, a ne samo na mjestu sidara. Postoje dva najčešća načina učvršćivanja zaštitnih mreža: betonski utezi i kratka sidra. Betonski utezi su dimenzija 30×30×10 cm, a iz njih izviruje armaturna šipka u obliku kuke preko koje se uteg

prihvaća za mrežu i omogućuje učvršćenje mreže na dnu kosine. Drugi način predstavlja kratka sidra duljine 40 cm koja također prihvaćaju i učvršćuju mrežu na dnu kosine [21]. Takav oblik zaštite predstavlja jedan od najbržih i ekonomski najpovoljnijih načina zaštite pokosa, ali bez dodatnog ojačanja sidrima može prihvatiti samo oko 0,5 do 1 m³ odronjenog materijala [5].



Slika 30: Zaštitna mreža učvršćena betonskim utezima [21]

Zaštitna mreža u kombinaciji sa sidrima i čeličnim sajlama koristi se na području gdje nema slobodnog prostora za akumuliranje odronjenog materijala u nožici padine, stoga je potrebno zadržati blok na pokosu [5]. Pričvršćena mreža osigurava stabilnost lica pokosa na način da se sidra ugrađuju u potencijalno nestabilne blokove na prethodno definiranom razmaku koji može biti od 1 do 1,5 m, ali ne veći od 3 m, dok se sila otpora razvija dodatnim zatezanjem mreže i pričvršćivanjem ispod podložne pločice sidra koja se potom dobro zategne. Jedna od prednosti je u dobroj zaštiti tijekom potresa zbog fleksibilnosti cijelog sustava, te se takvom zaštitom mogu zadržati pojedinačni blokovi stijenske mase ili nakupljeni materijal manjih fragmenata stijene.



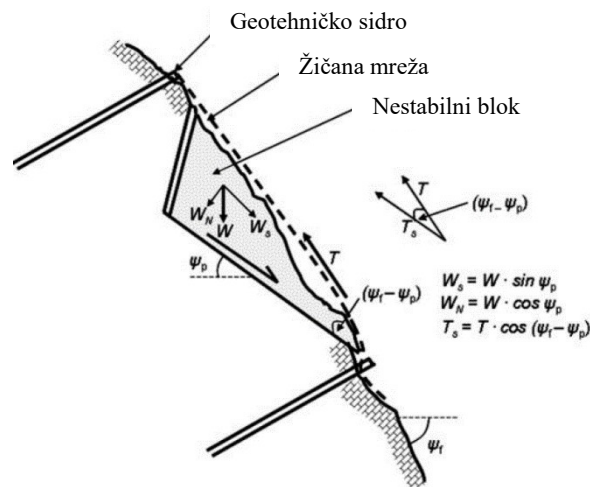
Slika 31: Zaštitna mreža u kombinaciji sa sidrima [22]

Projektiranje mreže sa sidrima obuhvaća metodu analize granične ravnoteže gdje se pokretačke (aktivne) sile nastale odronom bloka suprotstavljaju silama otpora nastalim kombinacijom posmične čvrstoće na kliznoj površini i naprezanjem u mreži koja zadržava blok. Na slici 32 prikazan je potencijalno nestabilan blok između dva geotehnička sidra sa svim pripadajućim silama koje djeluju uslijed njegova pomaka. Pretpostavlja se da nema hidrostatskog tlaka vode u blizini površine pokosa. Faktor sigurnosti bloka na klizanje FS , kojim je definirano najveće dopušteno naprezanje mreže da zadrži blok, određen je izrazom (51) preuzet iz [5]:

$$FS = \frac{\Sigma \text{ sile otpora}}{\Sigma \text{ aktivne sile}} \quad (51)$$

$$FS = \frac{c \cdot A + (W \cdot \cos \psi_p) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{W \cdot \sin \psi_p - T_s \cdot \cos(\psi_f - \psi_p)}$$

gdje W (kg) predstavlja masu nestabilnog bloka, ψ_f (°) nagib padine, ψ_p (°) nagib ravnine klizanja, A (m²) površinu ravnine po kojoj se događa klizanje, c (kPa) koheziju tla, φ (°) kut unutarnjeg trenja, a T_s (kN) silu u sidrima.



Slika 32: Nestabilan blok pod zaštitom mreže i sidara [5]

Utvrđeno je da ukoliko su sva ugrađena sidra jednake duljine, može doći do razvoja plohe nestabilnosti odmah iza krajeva sidara. Da bi se to spriječilo preporuča se korištenje sidara različitih duljina kako bi se dobila nepravilna površina koja ne leži na samo jednom diskontinuitetu, a samim time bi se povećala i posmična čvrstoća intaktne stijene [5].

5.2.5. Mlazni beton

Mlazni beton nanosi se pod jakim pritiskom na pokos. Prvenstveno se koristi da bi se zaustavio utjecaj erozije od djelovanja klimatskih ili mehaničkih utjecaja, a pomaže i u zadržavanju nestabilnih blokova na pokosu kod vrlo nestabilnih i okršenih podloga. Na pokosima gdje su stijene samo površinski raspucane zaštita se provodi nanošenjem mlaznog betona debljine oko 30 mm [23]. U slučajevima većih nestabilnosti koristi se kombinacija sidara, armaturnih mreža te mlaznog betona s mogućnosti korištenja procjednica radi eliminacije eventualnog hidrostatskog pritiska iza mlaznog betona [24].

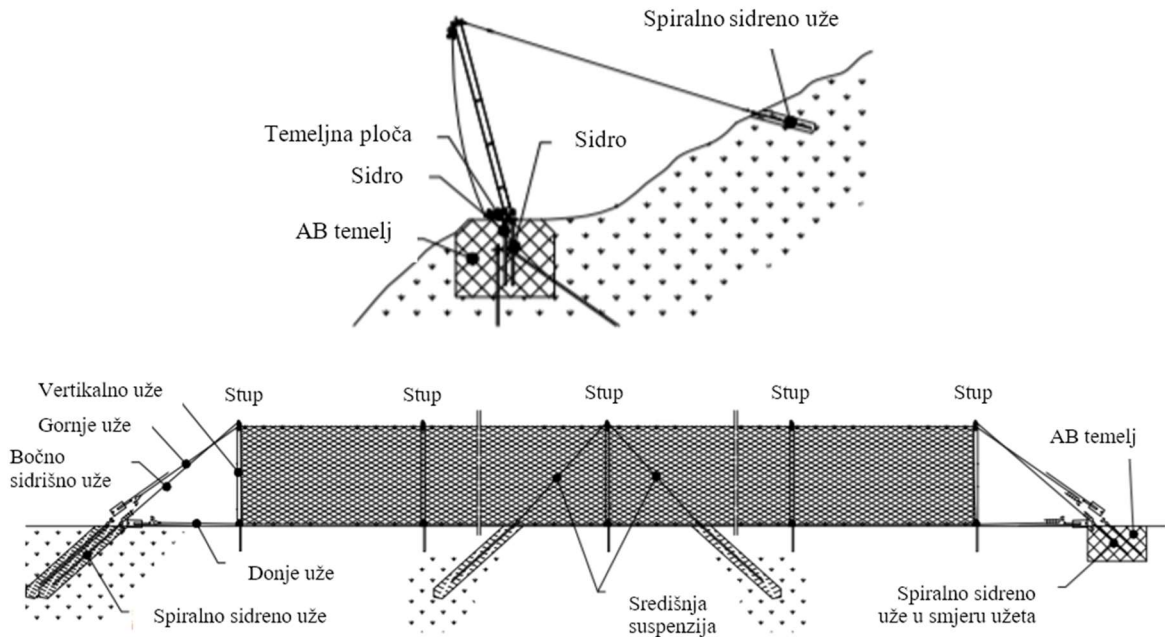


Slika 33: Stabilizacija mlaznim betonom (lijevo), mlazni beton u kombinaciji sa sidrima, armaturnom mrežom i procjednicama (desno) [24]

5.2.6. Barijere

Barijere za zaštitu od odrona izvode se kao fleksibilne konstrukcije koje omogućuju deformaciju prilikom udara bloka. Postavljene su na nižim dijelovima padine iz razloga lakše izrade i održavanja te uklanjanja akumuliranog materijala, a manifestiraju se kao ograde s ciljem zaštite od pada odronjenog stijenskog bloka. Prilikom udara apsorbiraju veliku količinu kinetičke energije deformacijom sustava i disipacijom kroz sustav kočenja. U početku uvođenja ovakve nove tehnologije istraživanja su se fokusirala na postizanje što veće fleksibilnosti i sigurnosti zaštite, dok su se kasnije proširila na unaprjeđenje dosadašnjeg znanja, korištenje numeričkih simulacija te na standardizaciju kroz formiranje normi i propisa [25]. Barijere za zaštitu od odrona uglavnom se koriste za energiju do 5000 kJ, iako su nedavno postignuti i svjetski rekordi u dosezanju energetske razreda do 10 000 kJ.

kJ apsorpcije [26]. Sastoje se od temelja, temeljne ploče, stupova, čelične užadi, sidara, nosive mreže te sustava kočenja.



Slika 34: Barijera za zaštitu od odrona sa elementima [27]

Najprije se izvode temelji barijere kroz koje se ugrađuju štapna sidra, a potom se na temelj ugrađuje temeljna ploča. Stupovi se pričvršćuju na temeljne ploče te se dodatno osiguravaju čeličnom užadi, dok je između stupova rastegnuta prstenasta mreža. Vrsta temelja ovisi o nosivim materijalima, karakteristikama tla/stijene te sustavu opterećenja. Temelji u stijeni izrađeni su kao grupe štapnih sidara koje se postavljaju u prethodno izrađene bušotine. Čelična temeljna ploča stupa prihvaća se za betonski temelj pomoću spomenutih štapnih sidara čiji broj i čvrstoća ovise o projektiranoj energiji udara te o vrsti temeljne ploče, odnosno da li je ona kruta ili pomična preko zglobnog ležaja. Duljina sidara L_s injektiranih cementnom smjesom određuje se kroz otpornost na izvlačenje gdje se pretpostavlja linearna raspodjela posmičnog naprezanja u cijeloj duljini sidra preko izraza (52) koji je preuzet iz [5]:

$$L_s = \frac{S_w}{\pi \cdot d_b \cdot \tau_{all}} \quad (52)$$

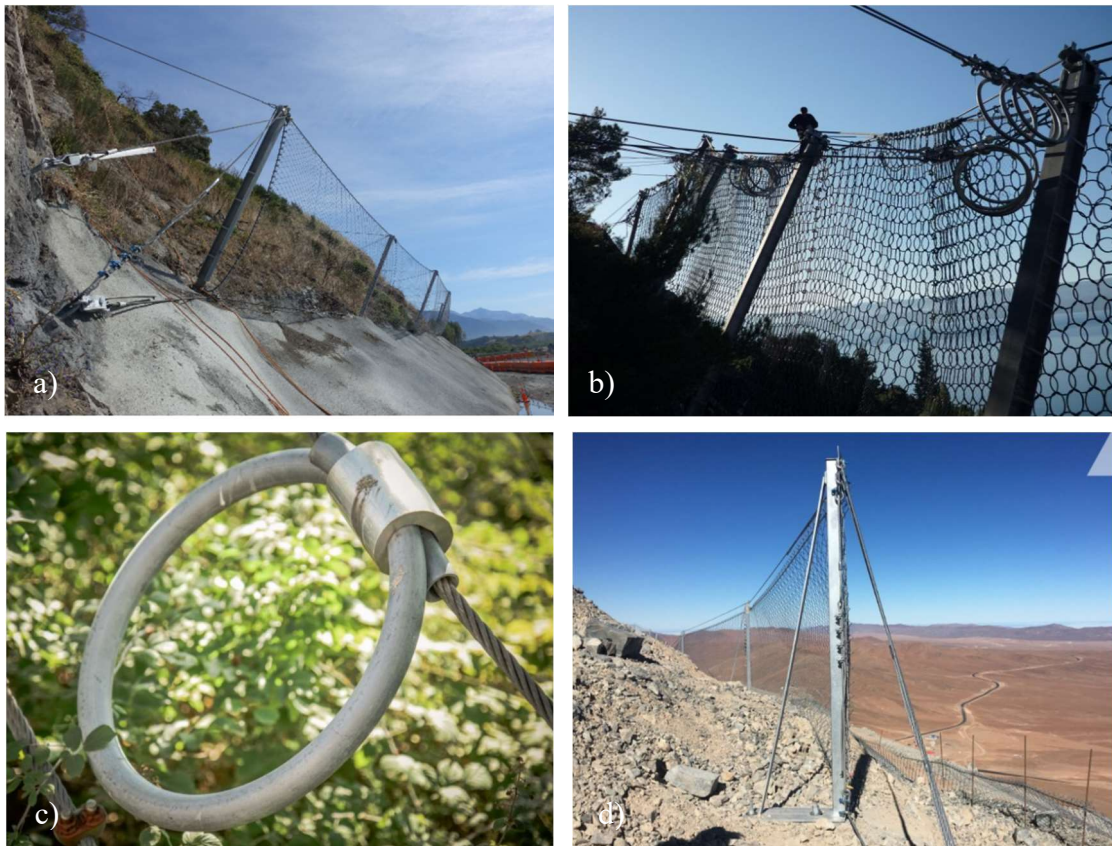
gdje je L_s (m) duljina sidara, S_w (kN) računski čvrstoća sidra (obično iznosi oko 50% ukupne čvrstoće sidra), d_b (m) promjer bušotine, a τ_{all} (kPa) dozvoljeno posmično naprezanje veze sidra i injekcijske smjese. Budući da veza sidra i injekcijske smjese obično ima manju čvrstoću od veze sidra i stijenske mase, veza sidra i injekcijske smjese uzima se kao

mjerodavni parametar u projektiranju duljine sidra. Posmično naprezanje veze sidra i injekcijske smjese τ_{all} određeno je izrazom (53) koji je preuzet iz [5]:

$$\tau_{all} = \frac{\sigma_{u(r)}}{30} \quad (53)$$

gdje je $\sigma_{u(r)}$ (MPa) jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase u blizini bušotine. Kod temelja u tlu ističu se dvije varijante – izrada pomoću samobušivih sidara ili betonskih temelja. Samobušiva sidra na vrhu imaju odgovarajuću bušaću glavu, a injektiranje se odvija kroz šuplju čeličnu šipku pri čemu injekcijska smjesa izlazi kroz otvore na bušačoj glavi sve dok ne počne izlaziti na ušću bušotine [28]. Koriste se u jako oštećenim stijenskim masama ili krupnozrnatim tlima loše propusnosti. Dopušteno naprezanje veze sidra i injekcijske smjese je 0,05 do 0,1 MPa [5]. Ukoliko samobušiva sidra nisu prikladna za korištenje, pristupa se izradi betonskih temeljnih blokova u iskopanom tlu, čija se stabilnost i otpor izvlačenju povećava zbijanjem okolnog tla. Čelični stupovi imaju funkciju podupiranja nosive mreže i čelične užadi, a postavljaju se na razmaku 8 do 12 m, visine do 8 m, odnosno za svaku se barijeru posebno određuju profili stupova ovisno o njenom energetsom kapacitetu. Raspored stupova ima znatan utjecaj na samu konstrukciju barijere i na njezin učinak, stoga je poželjno da se stupovi postave u približno pravocrtnu liniju kako zbog naglih promjena u tlocrtnom razmještaju ne bi bilo potrebe za dodatnim ojačanjima. Između stupova rastegnuta je nosiva mreža koja je najvažniji dio sustava. Ona je najčešće prva koja podnosi udarac te mora prenijeti silu udara na strukturu, odnosno na nosivu užad, stupove, pričvrсну užad pa sve do sidara. Prstenovi mreža sastoje se od čelične žice male debljine te velike čvrstoće, a u jednom prstenu nalazi se snop sa više namotaja žice, koji zajedno sa promjerom prstena ovise o potrebnoj energiji apsorpcije. Nosiva užad sa prstenovima najčešće dolazi u kombinaciji sa dodatnom zaštitnom dvostrukouvijenom mrežom koja služi za hvatanje manjih fragmenata stijene. Glavna uloga potporne čelične užadi je prijenos sila koje se javljaju u mreži tijekom udara bloka na zatezna sidra. Sustav kočenja sastoji se od elemenata koji se u slučaju većih odrona deformiraju i na taj način apsorbiraju preostalu energiju iz prstenaste mreže. Konstruirani su tako da mogu podnijeti višestruke udare na sustav bez da se smanji njihova čvrstoća ili da se razori užad. Razlikuje se više vrsta kočnih elemenata, a najpoznatiji su elementi sa kočnim prstenom (rješenje tvrtke Geobrug), zavojnicom (tvrtka Trumer Schutzbauten) te tlačnom cijevi (tvrtka Maccaferri). Prednosti barijera su u brzom vremenu izrade, većina ih ima potrebne standarde zaštite propisane oznakom CE, materijali koji se koriste su lagani i njihov utjecaj na okoliš je gotovo pa neznan, a s obzirom na široki spektar apsorpcije energije mogu se koristiti za različite namjene [27]. Kao nedostatak ističe

se potreba za osiguranjem svih dijelova sustava zaštitom od korozije, a ukoliko je na mrežu pao kamen srednje veličine od najveće predviđene dogodit će se deformacija koja će rezultirati smanjenom sposobnosti prihvaćanja budućih odrona za koje je u početku dimenzionirana. Prilikom projektiranja barijera za zaštitu od odrona ključni faktori odabira su visina odskoka i energija udara blokova [29]. Oni se određuju preko analiza simulacije odrona različitim specijaliziranim računalnim programima koji omogućuju simulaciju putanje odrona, visine odskoka i energije udara. Kao važan ulazni parametar za proračun i simulaciju je veličina i oblik bloka koji se određuje detaljnim inženjerskogeološkim kartiranjem. Budući da su odroni prirodne pojave i ne može se predvidjeti njegovo točno vrijeme nastanka kao niti veličina i jačina, simulacije predstavljaju samo približno moguće stvarne vrijednosti te se ne mogu uzeti sa stopostotnom sigurnošću.



Slika 35: Barijera za zaštitu od odrona (a), prstenasta mreža (b), kočni prsten (c), stup na temeljnoj ploči (d) [27], [30]

5.2.7. Viseće mreže – atenuatori

Viseće mreže predstavljaju kombinaciju zaštitnih mreža (zavjesa) i barijera za zaštitu od odrona. Konstruirane su s ciljem samočišćenja te apsorpiranja jednog dijela energije udara bloka. Koriste se u područjima podložnim čestim pojavama odrona, budući da konstrukcija može zadržati fleksibilnost čak i nakon nekoliko događaja odrona. Gornji dio zaštitne strukture skreće odronjeni blok i preuzima dio energije, dok mreža usmjerava blok prema predviđenoj zoni akumulacije materijala u nožici pokosa [31]. Učinkovitost strukture može biti i do 50% ukoliko se učinkovitost određuje prema izrazu (54) koji je preuzet iz [5]:

$$\text{učinkovitost} = \frac{\text{konačna energija}}{\text{energija udara}} \cdot 100\% \quad (54)$$

Prednost sustava je u malim troškovima održavanja upravo zbog karakteristike samočišćenja mreža kojom se blokovi skupljaju u jarugama pri dnu pokosa, a optimalna raspodjela opterećenja na mrežu i sidra tijekom udara sprječava probijanje mreže i slom sustava [31].

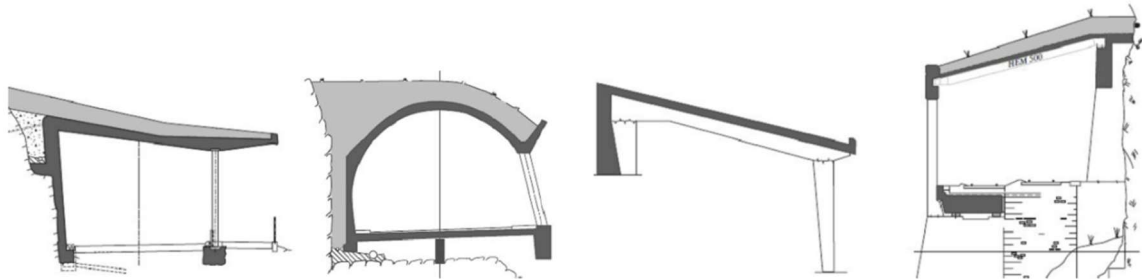


Slika 36: Viseće mreže – atenuatori [31]

5.2.8. Galerije

Armiranobetonske galerije razvijene su s ciljem osiguranja visoke razine pouzdanosti u zaštiti prometnica tijekom čestih odrona koje prate velike energije udara. Postoje razne mogućnosti natkrivanja ugroženog dijela, od u potpunosti zatvorenih konstrukcija pa sve do nadstrešnica koje mogu biti izrađene od armiranog betona, čelika ili nekog drugog materijala. Njihova najvažnija karakteristika su komponente koje apsorpiraju energiju, kao što je dodatni sloj na vrhu galerije za ublažavanje udara bloka te fleksibilni elementi stupova.

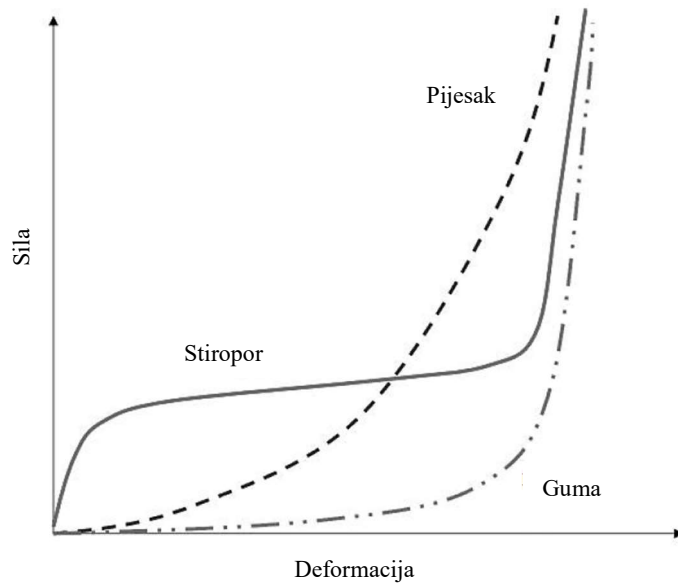
Prednosti se ističu prilikom projektiranja energetskog kapaciteta galerija koje mogu podnijeti energiju udara bloka znatno većeg kapaciteta nego što ju podnose barijere i zaštitne mreže [5]. Projektirani vijek uporabe je dug, uz potrebu minimalnog održavanja. Najveći nedostatak je u velikim troškovima izgradnje.



Slika 37: Različite vrste zaštitnih galerija [4]

Krovovi većine galerija su skoro pa horizontalni, nagiba do 5° radi osiguranja drenaže i postavljanja ujednačenog sloja pijeska ili drugih materijala koji apsorbiraju dio energije udara. Kod galerija smještenih ispod strmih pokosa, dimenzioniranje sustava se temelji na izravnom udaru blokova stijene u njezin krov pod kutom oko 90° , što rezultira time da će konstrukcija u potpunosti apsorbirati energiju udara. Suprotno navedenome, galerije smještene ispod blažih pokosa težiti će da imaju nagib krova pod sličnim kutem kao što je nagib padine, budući da se u tom slučaju blok stijenske mase kotrlja po krovu, a zaštitna struktura ne apsorbira u potpunosti energiju udara te je moguće koristiti i laganije materijale. Prilikom projektiranja galerija iznimno veliku ulogu ima ranije spomenuti apsorbirajući sloj koji se postavlja na krovu konstrukcije. Cilj sloja je postizanje što većeg prigušenja i apsorpcije energije udara bloka kroz plastičnu kompresiju i raspodjelu sile udara iz malog koncentriranog područja na šire područje krova. Materijal takvog sloja bi trebao biti jeftin, imati malu gustoću kako bi stalno opterećenje konstrukcije bilo što niže, treba se oduprijeti silama udara bez značajnog oštećenja i biti dugotrajan [5]. Najčešće korištene vrste materijala apsorbirajućeg sloja su pijesak, stiropor, stare gume te kuglice stakla, čiji je odnos deformacije i apsorpcije energije, odnosno prenesene sile kroz konstrukciju prikazan na slici 38. Stiropor počinje apsorbirati energiju netom nakon udara bloka, te je učinkovitiji u apsorpciji i disipaciji energije dalje u konstrukciju za razliku od pijeska i gume. Međutim, različita testiranja pokazala su da stiropor puca ukoliko nije dodatno ojačan polipropilenskim trakama koje raspodjeljuju silu udara na šire područje. Nedostatak mu je u visokoj cijeni s

obzirom na cijenu pijeska te raspadanje prilikom izlaganja ultraljubičastom svjetlu, dok je najveća prednost iznimno malena gustoća i težina s obzirom na težinu pijeska.



Slika 38: Odnos deformacije i sile kroz apsorbirajući sloj različitih materijala [5]



Slika 39: Apсорbirajući sloj od vreća pijeska na koje je postavljen sloj šljunka [32]

5.2.9. *Fleksibilna zaštitna galerija*

Sustav fleksibilne galerije stvoren je s ciljem zaštite infrastrukture od odrona sa strmih padina, kao alternativa armiranobetonskim galerijama ili tunelima čija je izrada značajno skuplja i dugotrajnija. Konstrukcija se može usporediti sa velikim krovom koji se nadvija iznad ceste, a sastoji se od elemenata fleksibilnih barijera. Prstenastu mrežu drže dva reda stupova između kojih se nalazi nosiva užad. Takvi redovi stupova na pokosu tvore dvije krovne konstrukcije različitih nagiba. Prva počinje na stijeni padine i završava na rubu ceste

uz padinu, a druga se konstrukcija nadovezuje na prvu i natkriva cestu [33]. Funkcioniraju slično kao i viseće mreže, preusmjeravanjem blokova stijene čime se samo jedan dio energije udara bloka apsorbira u mrežu, a ostatak energije je dovoljan za nastavak gibanja bloka preko donjeg ruba konstrukcije dalje po padini gdje više nema opasnosti od nastanka štete.



Slika 40: Fleksibilna zaštitna galerija [33]

5.3. Sustavi zaštite u Republici Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj se kao osnovna zaštita pokosa koristi dvostrukopletena mreža za zaštitu od odrona u kombinaciji s geotehničkim štapnim sidrima, a u složenijim slučajevima koristi se mlazni beton u kombinaciji sa štapnim sidrima, osobito kada je podloga vrlo nestabilna i okršena [34]. Ukoliko je pokos ugrožen velikim odronima stijenske mase, koriste se specijalne konstrukcije s mrežama visoke nosivosti kao i barijere za zaštitu od odrona. Temeljne konstrukcije ovih sustava čine samobušiva sidra ili sidra od čelične užadi velikih promjera radi postizanja fleksibilnosti samih sustava. Barijere protiv odrona ostvaruju svjetske rekorde u dosezanju energetske razreda do 10 000 kJ apsorpcije, čime omogućuju vrlo efikasno rješenje za zaustavljanje blokova izrazito velikih brzina i energije [26]. Temeljem rezultata dobivenih inženjerskogeološkim ispitivanjima izrađuje se projekt sanacije stijenske mase. Ukoliko se radi o manjim odronima, mogu se ukloniti samo potencijalno nestabilni blokovi uz dodatnu zaštitu čeličnih mreža ili mlaznog betona i geotehničkih sidara. U ovome slučaju moguće je kontrolirati buduće pojave erozije i manjih odrona redovitim održavanjem u smislu čišćenja lokaliteta od odronjene mase koja se nalazi

ispod zaštitnih mjera. Prilikom mogućih većih odrona ili potencijalno nestabilne zone stijenske mase na pokosu, koriste se kombinacije prethodno navedenih mjera, no posebice uz korištenje mreža visoke nosivosti i barijera za zaštitu od odrona velikih energetske apsorbirajućih sposobnosti [34]. Zbog fleksibilnih karakteristika prilikom udara bloka u zaštitnu konstrukciju neće doći do sloma iste, već će ona i dalje biti sposobna obavljati svoju ulogu i štiti od novih odrona. Takav sustav ima široku primjenu, posebice kod pokosa velikih visina, budući da znatno smanjuje troškove izrade i održavanja.

6. PROCJENA HAZARDA OD ODRONA

Hazard od odrona određuje vjerojatnost pojave odrona određene magnitude ili intenziteta u određenom vremenskom periodu i na određenom području, a ovisi o tri faktora [35]. Prvi faktor je vjerojatnost odvajanja bloka određene magnitude od stijenske litice na određenoj lokaciji u određenom periodu vremena, što uključuje prostornu i vremensku komponentu vjerojatnosti pojave odrona. Drugi faktor je propagacija bloka niz kosinu što uključuje trajektoriju gibanja i maksimalni doseg pokrenutog bloka, dok je treći faktor intenzitet odrona izražen kinetičkom energijom pokrenutog bloka duž trajektorije gibanja. Intenzitet odrona predstavlja složenu funkciju koja ovisi o masi i brzini, a određuje se u ovisnosti o usvojenom fizičkom modelu propagacije bloka. Rizik od odrona opisan je hazardom, izloženosti elemenata pod rizikom te njihovom ranjivosti. Moguće ga je ublažiti tek nakon što je određen, a ublažavanje rizika podrazumijeva odgovarajuće mjere i tehnike upravljanja rizikom, kako bi se ograničio štetan utjecaj hazarda [35].

6.1. Metode procjene hazarda i rizika od odrona

Metode procjene hazarda i rizika od odrona stijenske mase mogu biti kvalitativne (opisne vrijednosti) i kvantitativne (brojčane vrijednosti). S obzirom na općeniti nedostatak dokumentacije u svijetu o aktivnosti odrona, potpuni inventari o odronima su veoma rijetki te se vrlo često odnose samo na velike događaje. Najčešće korištene metode za analizu hazarda i rizika od odrona su kvalitativne metode, a u svijetu je oko njih 20 u intenzivnoj inženjerskoj praksi. U Republici Hrvatskoj nije usvojena niti razvijena nijedna metoda procjene podložnosti, hazarda ili rizika od odrona, a s obzirom da se pojavljuje i sanira sve više odrona, nužno je razviti metodu koja se može primjeniti za lokalne uvjete. U nastavku je opisana najpoznatija metoda procjene hazarda od odrona – *Rockfall Hazard Rating System (RHRS)* te neke njezine modifikacije kronološkim redom njihova nastajanja.

6.1.1. *Rockfall Hazard Rating System (RHRS)*

Originalni *RHRS* razvijen je 1980-ih godina za potrebe procjene hazarda od odrona uz prometnice u Oregonu (SAD). Namijenjen je kao alat koji će omogućiti detektiranje područja opasnosti od odrona proaktivno, umjesto da reagira na već pokrenute odrone [3].

RHRS predstavlja bodovni sustav koji koristi dva načina ocjenjivanja pokosa. Preliminarno ocjenjivanje se provodi tijekom popisa pokosa i eliminira mnoge pokose iz daljnjeg razmatranja, dok se prilikom detaljnog ocjenjivanja pojavljuje devet kategorija, odnosno bodovanih parametara. Svrha preliminarnog ocjenjivanja je grupiranje pregledanih područja odrona tijekom popisa pokosa u tri kategorije (visoka, umjerena, niska) te racionalizacija vremena i osoblja na način da se detaljno ne ocjenjuju područja koja su okarakterizirana kao nisko do umjereno opasna u pogledu opasnosti od odrona. Takav način ocjenjivanja je subjektivna procjena potencijala odrona koja zahtijeva iskusno osoblje. S obzirom na to da događaji odrona često nisu dobro dokumentirani, važni su i podaci iz prošlosti, budući su prethodni odroni savršeni pokazatelj što se može očekivati u budućnosti. Detaljno ocjenjivanje brojčano razlikuje rizike na identificiranim lokacijama kako bi se na temelju rezultata lokacije mogle rangirati prema mjestu sanacije. Ono dijeli kosine od najniže do najviše izloženih hazardu koristeći devet parametara koji se eksponencijalno boduju od 3 do 81 bod, dok ukupna suma svih bodova predstavlja sveukupnu vrijednost hazarda, gdje više vrijednosti označuju viši hazard [35]. Kategorije koje se koriste unutar detaljnog ocjenjivanja prikazane su u tablici 4. Ukupna vrijednost hazarda slijedi iz sume svih bodova (između 9 i 900), a koristi se za određivanje prioriteta pri odabiru mjera ublažavanja hazarda od odrona. Jedna je od najstarijih metoda za procjenu hazarda, a sadrži gotovo sve elemente za određivanje hazarda od odrona osim energije bloka koji se giba niz kosinu.

6.1.2. *Colorado Rockfall Hazard Rating System (CRHRS)*

CRHRS metoda je u odnosu na *RHRS* metodu sofisticiranija te razdvaja komponente hazarda i rizika [35]. Uzima u obzir više geoloških i klimatskih faktora koji utječu na odrone te su njome uklonjeni nedostaci koji se tiču subjektivne terminologije. Hazard i rizik su odijeljeni u dva zasebna bodovanja, koji se računaju kao sume od 18 i 3 parametra.

6.1.3. *Rock Slope Rating Procedure (RSRP)*

Razvijen je s ciljem poboljšanja *RHRS* metode razdvajanjem parametara hazarda i rizika. Ukupni relativni rizik određuje se množenjem tri glavna faktora: geološkog faktora, faktora dionice prometnice te faktora izloženosti populacije [35]. Iako takav rizik nije realan budući

da ne usvaja sve elemente pod rizikom već samo vozila, njegovo uvođenje predstavlja značajan doprinos.

6.1.4. Talijanski modificirani RHRS (mRHRS)

Cilj navedene metode je u smanjenju subjektivnosti u bodovanju. Osnovna struktura i bodovanje je u cjelosti preuzeto iz RHRS, a 7 parametara (djelotvornost jarka za prikupljanje odronjenog materijala, postotak duljine preglednosti za donošenje odluke, širina prometnice, geološke značajke, volumen bloka, povijest odrona) je modificirano tako da su bodovani kvantitativno [35].

6.1.5. Rockfall Risk Rating for Settlements (R3S2)

Razvijena je za potrebe procjene hazarda od odrona za naseljena područja u Austriji [35]. Zasnovana je na preliminarnoj fazi, odnosno identifikaciji lokacija na kojima odroni mogu dosegnuti naseljena područja te na detaljnoj fazi u kojoj se provodi procjena hazarda bodovanjem 3 parametara kojom se karakterizira izvorišno područje odrona i 6 parametara kojima se ocjenjuje gibanje i doseg pokrenute stijenske mase. Rezultat procjene je svrstavanje područja u jednu od zona rizika: zona prihvatljivog rizika, zona s utvrđenim rizikom, zona neprihvatljivog rizika.

6.1.6. Falling Rock Hazard Index (FRHI)

Razvijen je za procjenu hazarda od odrona uz umjetne kosine u stijenskoj masi te se zasniva na procjeni 10 parametara. Ukupni zbroj bodova svih parametara predstavlja rizik koji je podijeljen u 4 klase: minimalni, niski, srednji i visok. Budući da u metodu nisu uvedeni elementi pod rizikom, metoda procjenjuje hazard, a ne rizik [35].

6.1.7. Rockfall Risk Rating System (RRRS)

Metoda je namijenjena procjeni rizika od odrona na prirodnim kosinama, te kao i FRHI metoda rezultira klasama hazarda. Uključuje bodovanje 20 parametara podijeljenih u 4 kategorije, pri čemu 3 kategorije analiziraju elemente hazarda (značajke kosine, značajke

stijenske mase, utjecaj dreniranja i seizmičnosti), a četvrta kategorija analizira potencijalne posljedice. Dobiveni rezultati su opisani kvalitativno, dok je procjena subjektivna [35].

6.1.8. Rock Engineering System (RES)

Metoda se koristi prilikom rješavanja kompleksnih inženjerskih problema u stijenskoj masi velikih razmjera [35]. Procjenjuju se glavni parametri utjecaja, a zatim se analizira njihova interakcija u asimetričnoj matrici bodovanjem od 0 (nema interakcije) do 4 (značajan utjecaj). Sume interakcija predstavljaju uzrok i utjecaj za svaki pojedini parametar utjecaja.

Tablica 4: Detaljno ocjenjivanje kod RHRS sustava [3]

KATEGORIJA		KRITERIJ OCJENE I REZULTATI				
		3 BODA	9 BODOVA	27 BODOVA	81 BOD	
VISINA POKOSA		25 feet	50 feet	75 feet	100 feet	
UČINKOVITOST JARAKA		Dobro hvatanje	Umjereno hvatanje	Ograničeno hvatanje	Nema hvatanja	
PROSJEČNI RIZIK VOZILA		25% vremena	50% vremena	75% vremena	100% vremena	
DULJINA VIDNOG POLJA		Adekvatna duljina vidnog polja, 100% od donje projektne vrijednosti	Umjerena duljina vidnog polja, 80% od donje projektne vrijednosti	Ograničena duljina vidnog polja, 60% od donje projektne vrijednosti	Vrlo graničena duljina vidnog polja, 40% od donje projektne vrijednosti	
ŠIRINA KOLNIKA UKLJUČUJUĆI POPLOČAN RUB		44 feet	36 feet	28 feet	20 feet	
GEOLOŠKE ZNAČAJKE	SLUČAJ 1	STRUKTURALNI UVJETI	Diskontinuirane pukotine, povoljne orijentacije	Diskontinuirane pukotine, nasumične orijentacije	Diskontinuirane pukotine, nepovoljne orijentacije	Kontinuirane pukotine, nepovoljne orijentacije
		KOEFICIJENT TRENJA	Grube, nepravilne stijenke	Valovite stijenke	Planarne stijenke	Ispuna glinom ili glatka izbrzdana površina
	SLUČAJ 2	STRUKTURALNI UVJETI	Nekoliko značajka diferencijalne erozije	Povremene značajke erozije	Mnogobrojne značajke erozije	Glavne značajke erozije
		RAZLIKE U BRZINI EROZIJE	Male razlike	Umjerene razlike	Velike razlike	Ekstremne razlike
	VELIČINA BLOKA VOLUMEN ODRONA PO DOGAĐAJU		1 feet/ 3 kubična yarda	2 feet/ 6 kubičnih yarda	3 feet/ 9 kubičnih yarda	4 feet/ 12 kubičnih yarda
KLIMA I PRISUTNOST VODE NA POKOSU		Niske do umjerene oborine, bez perioda smrzavanja, nema prisustva vode na površini	Umjerene oborine ili kratkotrajni periodi smrzavanja ili povremeno prisustvo vode na pokosu	Jake oborine ili dugi periodi smrzavanja ili stalno prisustvo vode na pokosu	Jake oborine i dugi periodi smrzavanja ili stalno prisustvo vode na pokosu I dugi periodi smrzavanja	
POVIJEST ODRONA		Nekoliko odrona	Povremeni odroni	Mnogobrojni odroni	Stalni/Konstantni odroni	

Kroz određeni period izvedene su brojne modifikacije *RHRS-a* koje su prilagođavane lokalnim uvjetima za koje su namijenjene, pri čemu neke uvažavaju veći dio *RHRS*, dok druge mijenjaju osnovni pristup, ali zadržavaju većinu parametara. Budući da u Republici Hrvatskoj ne postoji sustavno prikupljanje podataka o odronima koji mogu dati korisne informacije o veličini i frekvenciji odrona, potrebno je razviti strategiju zaštite od odrona koja bi iskoristila dostupne podatke o dosadašnjim odronima i klimi, te iz toga razvila karte hazarda i rizika od pojave odrona te sustav zaštite koji bi odgovarao hrvatskom podneblju. U tom smislu, razvoj metode za procjenu hazarda i rizika u Republici Hrvatskoj bi se eventualno trebao zasnivati na sljedećim modificiranim metodama: Colorado Rockfall Hazard Rating Systemu (*CRHRS*) koja razdvaja komponente hazarda i rizika, talijanskoj modificiranoj *RHRS* (*mRHRS*) i Rockfall Risk Rating Systemu (*RRRS*) koje su zasnovane na sličnim geološkim i klimatskim uvjetima u Italiji i Grčkoj te na Rockfall Risk Rating for Settlements (*R3S2*) koja služi za procjenu hazarda od odrona za naseljena područja [35].

7. SANACIJA POKOSA NA LOKACIJI RADLJEVAC U BLIZINI KNINA

Izgradnjom prometnica i infrastrukturnih građevina u područjima koja su ugrožena odronima javlja se sve veća opasnost za ljudske živote te imovinu. U radu je analiziran slučaj odrona koji se dogodio na stijenskom pokosu na dijelu županijske ceste ŽC6034 na lokaciji Radljevac, a čije rješenje sanacije prati ranije opisani teoretski dio o uzrocima pojave odrona, projektiranju i metodama zaštite od odrona stijenske mase.

7.1. Općenito o odronu Radljevac

Odron koji se dogodio 02.01.2018. godine na dijelu županijske ceste ŽC6034 nalazi se oko 4,3 km južno od naselja Plavno, odnosno 8 km sjeverozapadno od Knina na lokaciji Radljevac. Ostvaren je globalni slom kroz stijensku masu čiji je pokrenuti materijal prekrrio i ošteti prometnicu u duljini oko 100 m, a što je i prikazano slikom 41. Orijentacija padine na kojoj se nalazi navedeni pokos je sjeverozapad-jugoistok do sjever-jug, a padina je nagnuta prema jugozapadu i zapadu. Visina pokosa iznad prometnice je od 30 do 40 m, pri čemu je najmanja na njegovom južnom dijelu, a najveća u središnjem [36]. Za potrebe izrade projekta sanacije stijenskog pokosa provedeno je geodetsko snimanje pokosa i okolnog terena putem laserskog skeniranja, inženjerskogeološko kartiranje terena, pregled terena od strane geotehničara te laboratorijsko ispitivanje uzoraka stijenske mase.



Slika 41: Odron na županijskoj cesti ŽC6034, lokacija Radljevac [36]

7.2. Geološka građa

Geološkim kartiranjem terena i uvidom u OGK SFRJ M 1:100 000 – list Knin, utvrđeno je da matičnu stijenu na lokaciji pokosa predstavljaju kampilske naslage, odnosno izmjena pješčenjaka, silita i vapnenaca donjotrijaske starosti T_1^2 [36]. Kartiranjem pokosa utvrđeno je da se sjeverni dio pokosa nalazi u JZ krilu antiklinale pružanja SZ-JI, a od južnog dijela pokosa odvojen je s rasjedom nepoznatog karaktera pomaka i pretpostavljenog pružanja I-Z. U južnom dijelu utvrđena je bora metarskih dimanzija čije je pružanje I-Z. Istraživano područje nalazi se na središnjem dijelu tektonske jedinice Poštak-Plavno-Pađene, tj. u sklopu boranog područja Plavno-Golubić-Debelo Brdo. U sklopu navedene tektonske jedinice naslage trijaskе starosti izgrađuju krovinu navlake. Područje je karakterizirano i rasjednim sustavima pružanja SZ-JI i I-Z do SI-JZ. Naslage matične stijene izmjene pješčenjaka, silita i vapnenaca u inženjerskom smislu predstavljaju osnovnu stijenu, a koja je prekrivena koluvijalnim naslagama Q_k [36].

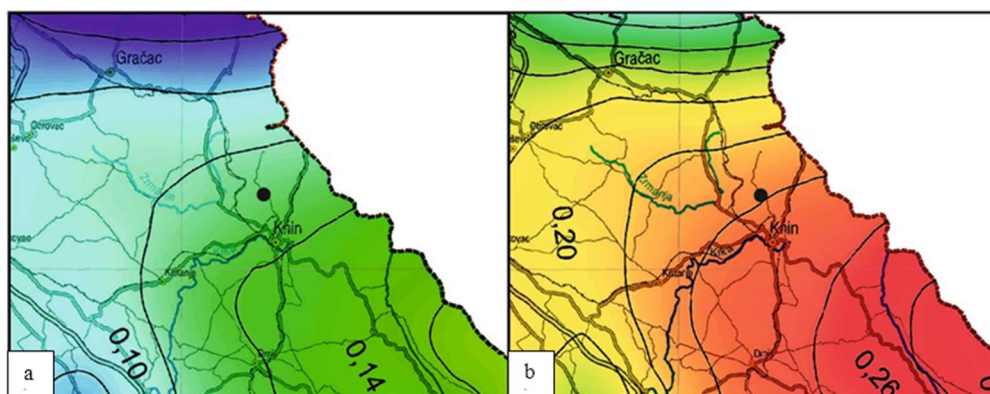
7.3. Hidrogeološke značajke

Hidrogeološki uvjeti na promatranom području uvjetovani su litološkom građom, strukturnim odnosima te stupnjem trošnosti. Pješčenjaci, siliti i vapnenci imaju slabu do srednju propusnost. Središnji i donji dio pokosa je na površini prekriven koluvijalnim naslagama koje se sastoje od prahovitog šljunka sa blokovima centimetarskih dimenzija. Takve naslage imaju srednju do visoku propusnost zbog međuzrnskog (primarnog) tipa poroznosti, ali zbog granulometrijskog sastava koji se mijenja lateralno i po dubini, propusnost varira. Većina diskontinuiteta ima vlažnu ispunu, što ukazuje na procjeđivanje podzemne i oborinske vode. Zbog ograničenih podataka o razini podzemne vode, pretpostavlja se da je ona relativno visoko budući da se u blizini pokosa nalazi potok Radljevac, te se pretpostavlja da bi mogla imati utjecaj na stabilnost kosine [36].

7.4. Seizmičke značajke

Prema slici 42, odnosno prema karti potresnih područja Republike Hrvatske izrađenih u mjerilu 1:800 000, može se zaključiti kako je područje Šibensko-kninske županije seizmički vrlo aktivno. Vrijednosti horizontalnih vršnih ubrzanja temeljnog tla a_{gR} (tlo tipa A) se u

prosijeku premašuju tijekom povratnog razdoblja od 95 i 475 godina. Vjerojatnosti premašaja 10% u 50 godina za poredbeno povratno razdoblje $T_{NCR}=95$ za promatrano područje prikazani su na slici 42, a iznose 0,12g, gdje g predstavlja gravitacijsko ubrzanje od $1g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Vjerojatnost premašaja 10% u 10 godina za poredbeno povratno razdoblje $T_{NCR}=475$ za promatrano područje iznosi 0,22 g [36].



Slika 42: Karta poredbenih vršnih ubrzanja temeljnog tla tipa A: a) vjerojatnost premašaja 10% u 50 godina za $T_{NCR}=95$ godina; b) vjerojatnost premašaja 10% u 10 godina za $T_{NCR}=475$ godina [36]

7.5. Inženjerskogeološke i geotehničke značajke

Inženjerskogeološki istražni radovi obuhvaćali su inženjerskogeološko kartiranje šireg terena, određivanje strukturno-tektonskih značajki stijenske mase, seizmičnosti područja te inženjerskogeoloških karakteristika stijenske mase na pokosu, čiji su podaci služili za potrebe izrade *RMR* (Rock Mass Rating) klasifikacije, a iz *RMR* bodova izračunat je geološki indeks čvrstoće *GSI*. Prilikom određivanja referentnih ulaznih podataka za geotehničku klasifikaciju, pokos je podijeljen na 8 glavnih inženjerskogeoloških/geotehničkih zona s pripadajućim inženjerskogeološkim jedinicama, od kojih su u nastavku detaljno obrađene zone 3, 5 i 8. U svakoj zoni pojavljuju se slični inženjerskogeološki uvjeti s obzirom na karakteristike stijenske mase, odnosno na značajke intaktnog materijala i raspucanost stijenske mase. Na 13 nepravilna uzorka stijenske mase uzetih s pokosa po pojedinim zonama provedeno je ispitivanje čvrstoće stijene točkastim opterećenjem (eng. *Point Load Test, PLT*), na osnovu kojeg je ustanovljeno da je čvrstoća uzoraka stijene u točki $I_{s(50)}$ u rasponu od 0,82 do 5,67 MPa, odnosno jednoosna tlačna čvrstoća stijene σ_{uc} iznosi od 21,82 do 90,43 MPa [36]. Zakon čvrstoće određuje se koristeći empirijski Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase pomoću računalnog programa RocLab, Version 1.0, Rocscience Inc.

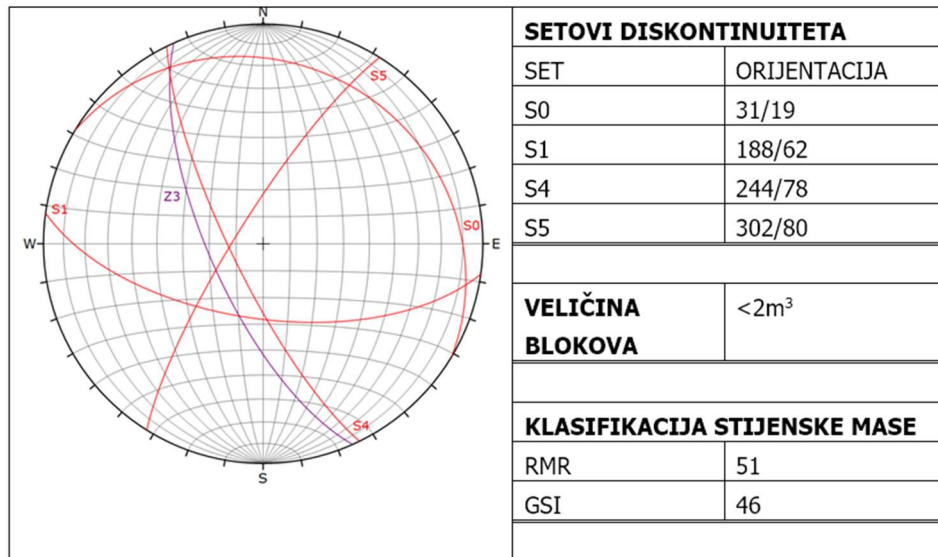


Slika 43: Istraživano područje podijeljeno po zonama [36]

7.5.1. Inženjerskogeološka zona Z3

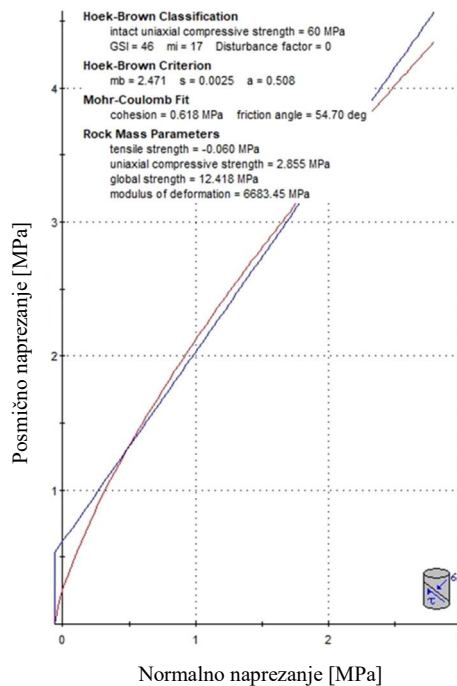
Zona Z3 zauzima gornji dio središnjeg dijela pokosa površine oko 418 m². Prosječni nagib pokosa je 70°, a mjestimično je vertikalna ili u prevjesu. Oko vrha pokosa prisutna je niska grmolika vegetacija. Pokos je izgrađen od stijenske mase koja se sastoji od izmjene slojeva pješčenjaka, silita te mjestimično vapnenca. Pješčenjak je sitnozrnat, srednje sive do svijetlo maslinasto sive boje, srednje do intenzivno trošan, srednje čvrst (lomi se srednje snažnim udarcem čekića; $\sigma_c = 60\text{MPa}$). Pojavljuje se u slojevima debljine do 40 cm. Silit je plavkasto sive do žućkasto sive boje, srednje do intenzivno trošan, srednje čvrst (lomi se srednje snažnim udarcem čekića; $\sigma_c = 60\text{MPa}$). Pojavljuje se u slojevima debljine do 5 cm. Vapnenac je sive boje, srednje trošan, čvrst (lomi se snažnim udarcem čekića). Pojavljuje se u slojevima debljine do 40 cm. Stijenska masa je intenzivno razlomljena i prisutna su četiri seta diskontinuiteta orijentacije S0=31/19, S1=188/62, S4=244/78 i S5=302/80. Postojanost diskontinuiteta je srednja do velika, dok su stijenske diskontinuiteta hrapave, trošne, zijeva većeg od 1 mm (mjestimično veće od 5 mm), s mekom ispunom. Veličina blokova u ovoj zoni iznosi < 2m³. S obzirom na kvalitetu stijenske mase zbroj bodova RMR klasifikacije iznosi 51, a broj bodova GSI klasifikacije iznosi 46 [36].

Tablica 5: Inženjerskogeološke i geotehničke karakteristike stijenske mase u zoni Z3 [36]



Usvojene su sljedeće karakteristike stijenske mase u zoni Z3:

- odabrana vrijednost materijalne konstante m_i za pješčenjake iznosi 17
- GSI = 46
- jednoosna tlačna čvrstoća pješčenjaka $\sigma_c = 60\text{MPa}$
- faktor stupnja poremećenosti stijenske mase $D = 0$
- zapreminska težina stijenske mase $\gamma = 25\text{ kN} / \text{m}^3$

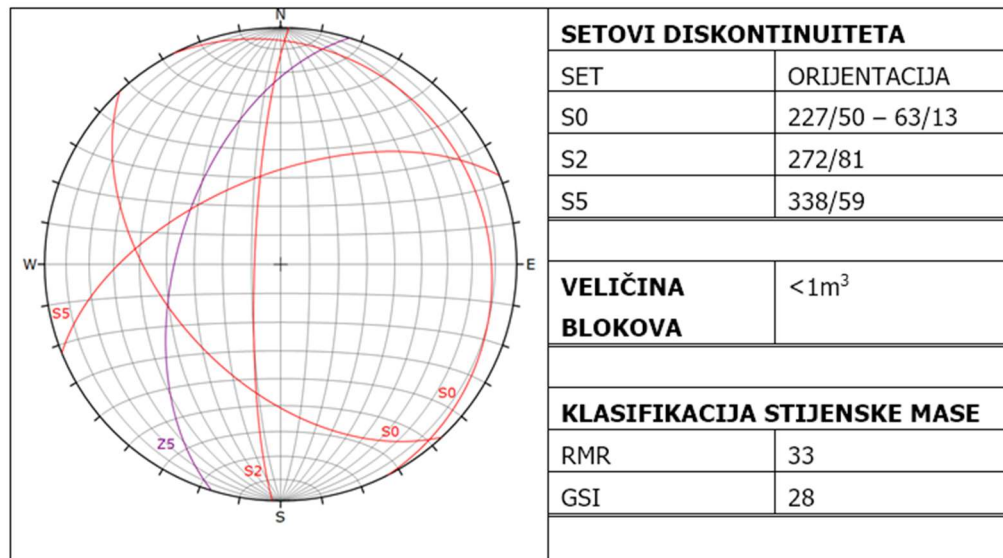


Slika 44: Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase u zoni Z3 [36]

7.5.2. Inženjerskogeološka zona Z5

Zona Z5 zauzima središnji dio pokosa površine oko 840 m². Prosječni nagib pokosa je 55°. Oko vrha pokosa prisutna je niska grmolika vegetacija. Pokos je izgrađen od stijenske mase koja se sastoji od izmjene slojeva pješčenjaka, silita te mjestimično vapnenca. Pješčenjak je sitnozrnat, svijetlo maslinasto sive boje, intenzivno trošan, mekan do srednje čvrst (lomi se slabim do srednje snažnim udarcem čekića; $\sigma_c = 60MPa$). Silit je žućkasto sive boje, intenzivno trošan, mekan (lomi se laganim udarcem čekića; $\sigma_c = 20MPa$). Vapnenac je sive boje, srednje trošan, srednje čvrst (lomi se srednje snažnim udarcem čekića). Debljina slojeva u izmjeni iznosi do 20 cm. Stijenska masa je tektonski poremećena, borana i intenzivno razlomljena, s nekoliko setova diskontinuiteta čija se orijentacija mijenja, ovisno o položaju u odnosu na os bore i rasjed. Postojanost diskontinuiteta je srednja do velika. Stijenke diskontinuiteta su hrapave, intenzivno trošne, mjestimično vlažene, zijeva većeg od 5 mm, s mekom ispunom debljom od 5 mm. Veličina blokova je u ovoj zoni < 1m³. S obzirom na kvalitetu stijenske mase zbroj bodova RMR klasifikacije iznosi 33, a broj bodova GSI klasifikacije iznosi 28 [36].

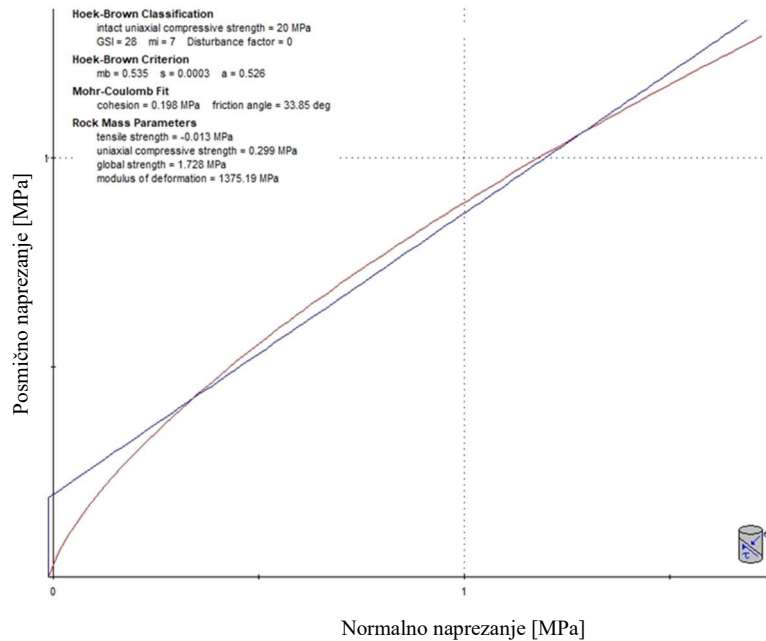
Tablica 6: Inženjerskogeološke i geotehničke karakteristike stijenske mase u zoni Z5 [36]



Usvojene su sljedeće karakteristike stijenske mase u zoni Z3:

- odabrana vrijednost materijalne konstante m_i za silitite iznosi 7
- GSI = 28
- jednoosna tlačna čvrstoća silita $\sigma_c = 20MPa$

- faktor stupnja poremećenosti stijenske mase $D = 0$
- zapreminska težina stijenske mase $\gamma = 25 \text{ kN} / \text{m}^3$

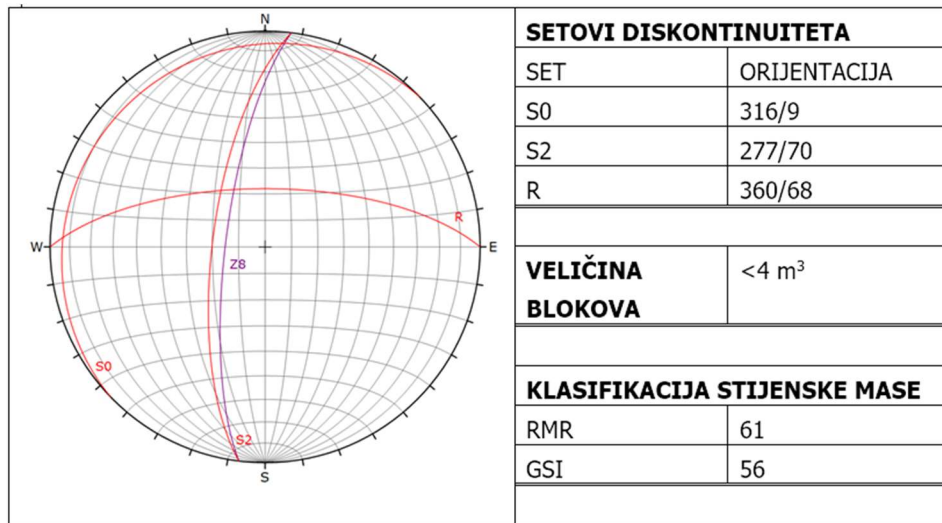


Slika 45: Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase u zoni Z5 [36]

7.5.3. Inženjerskogeološka zona Z8

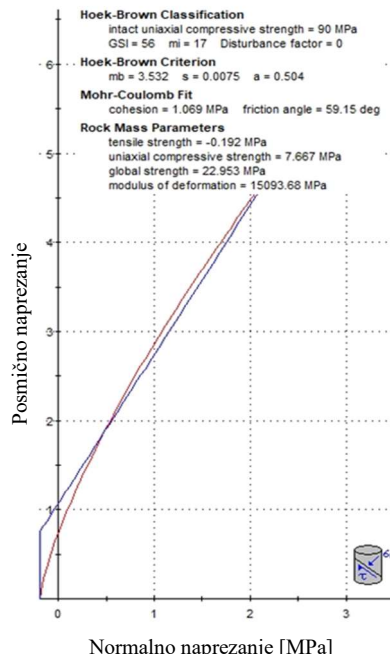
Zona Z8 zauzima krajnji jugoistočni dio pokosa, površine oko 100 m^2 . Prosječni nagib pokosa je oko 75° , te je djelomično vertikalalan. Pokos je izgrađen od stijenske mase koja se sastoji od pješčenjaka, siltita i vapnenca. Pješčenjak je sitnozrnat, srednje sive boje, blago do srednje trošan, čvrst (lomi se snažnim udarcem čekića; $\sigma_c = 90 \text{ MPa}$). Pojavljuje se u slojevima debljine do $1,5 \text{ m}$. Siltit je plavkasto sive do žućkasto sive boje, srednje trošan (trošnji uz diskontinuitete), srednje čvrst (lomi se srednje snažnim udarcem čekića; $\sigma_c = 50 \text{ MPa}$). Pojavljuje se u laminama i slojevima debljine do 30 cm . Subhorizontalani sloj debljine 1 m izgrađuje bazu stijenske mase, neposredno uz dno zajeka. Vapnenac je sive boje, blago trošan, čvrst (lomi se snažnim udarcem čekića). Pojavljuje se u slojevima debljine do 40 cm . Stijenska masa je slabo do srednje razlomljena, a utvrđena su tri seta diskontinuiteta orijentacije $S_0=316/9$, $S_2=277/70$ i $R=360/68$ vezan za rasjede. Postojanost diskontinuiteta je velika. Stijenke diskontinuiteta su hrapave, blago trošne, zijeva većeg od 1 mm (mjestimično veće od 5 mm), s mekom ispunom, mjestimično vlažne. Veličina blokova u ovoj zoni iznosi do 4 m^3 . S obzirom na kvalitetu stijenske mase zbroj bodova RMR klasifikacije iznosi 61 , a broj bodova GSI klasifikacije iznosi 56 [36].

Tablica 7: Inženjerskogeološke i geotehničke karakteristike stijenske mase u zoni Z8 [36]



Usvojene su sljedeće karakteristike stijenske mase u zoni Z8:

- odabrana vrijednost materijalne konstante m_i za pješčenjake iznosi 17
- GSI = 56
- jednoosna tlačna čvrstoća pješčenjaka $\sigma_c = 90\text{MPa}$
- faktor stupnja poremećenosti stijenske mase $D = 0$
- zapreminska težina stijenske mase $\gamma = 25\text{ kN} / \text{m}^3$



Slika 46: Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase u zoni Z8 [36]

7.6. Analiza nestabilnih blokova

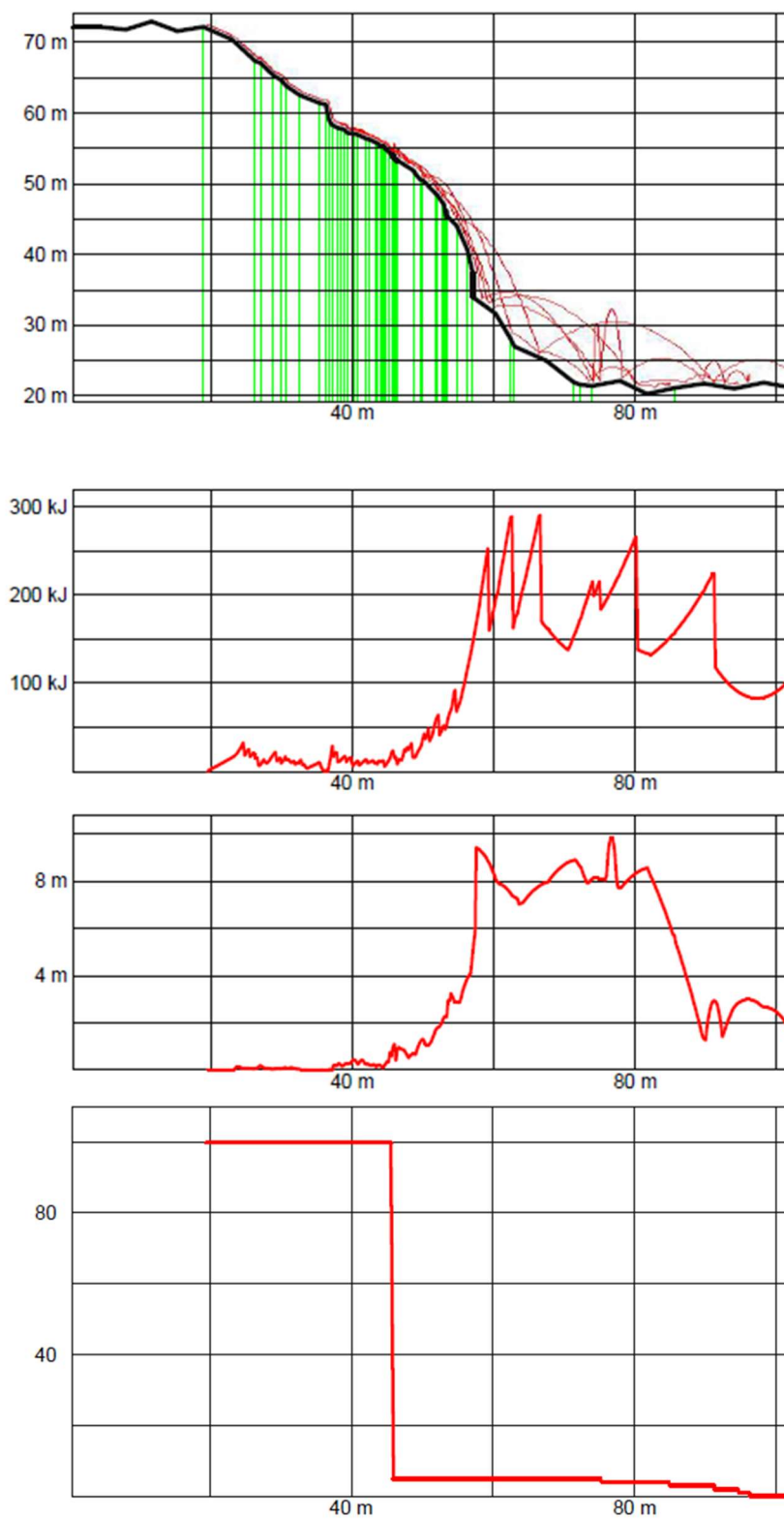
Simulacije odrona provedene su uz pomoć računalnog programa Rockfall, Version 6.1. Kako je već ranije spomenuto, trajektorija gibanja i visina odskoka ovise o geometriji pokosa, karakteristikama površine padine te karakteristikama bloka. Parametri stijenske mase koji su uzeti za analizu prikazani su u tablici 8, gdje Rg predstavlja dinamički kut trenja, Rh statički kut trenja, Dn normalno prigušenje, Dt tangencijalno prigušenje, Rw otpor kotrljanju, Oa [m] amplitudu hrapavosti površine pokosa, Of [m] frekvenciju hrapavosti, a V [%] odstupanje, odnosno standardnu devijaciju. U nastavku su prikazani rezultati analiza mogućeg ponašanja odrona stijenske mase za kritične poprečne presjeka Z3, Z5 i Z8, gdje su u prvom slučaju provedene simulacije na postojećem profilu bez uporabe mjera za zaštitu od odrona, dok su u drugom slučaju korištene mjere u vidu barijera za zaštitu od odrona. Navedena rješenja predstavljaju varijantna rješenja projekta koje kao glavno rješenje ima izvedbu gabionskog zida visine 3 m u nožici pokosa uz korištenje sidara, mreža za zaštitu od odrona, uklanjanje materijala te izvedbu obodnog kanala po vrhu pokosa za odvodnju oborinskih voda.

Tablica 8: Parametri stijenske mase za potrebe programa Rockfall v6.1

Stijenska masa	Rg	V%	Rh	V%	Dn	V%	Dt	V%	Rw	V%	Oa	Of
	30	10	35	10	0,8	10	0,5	10	0,1	10	1	4

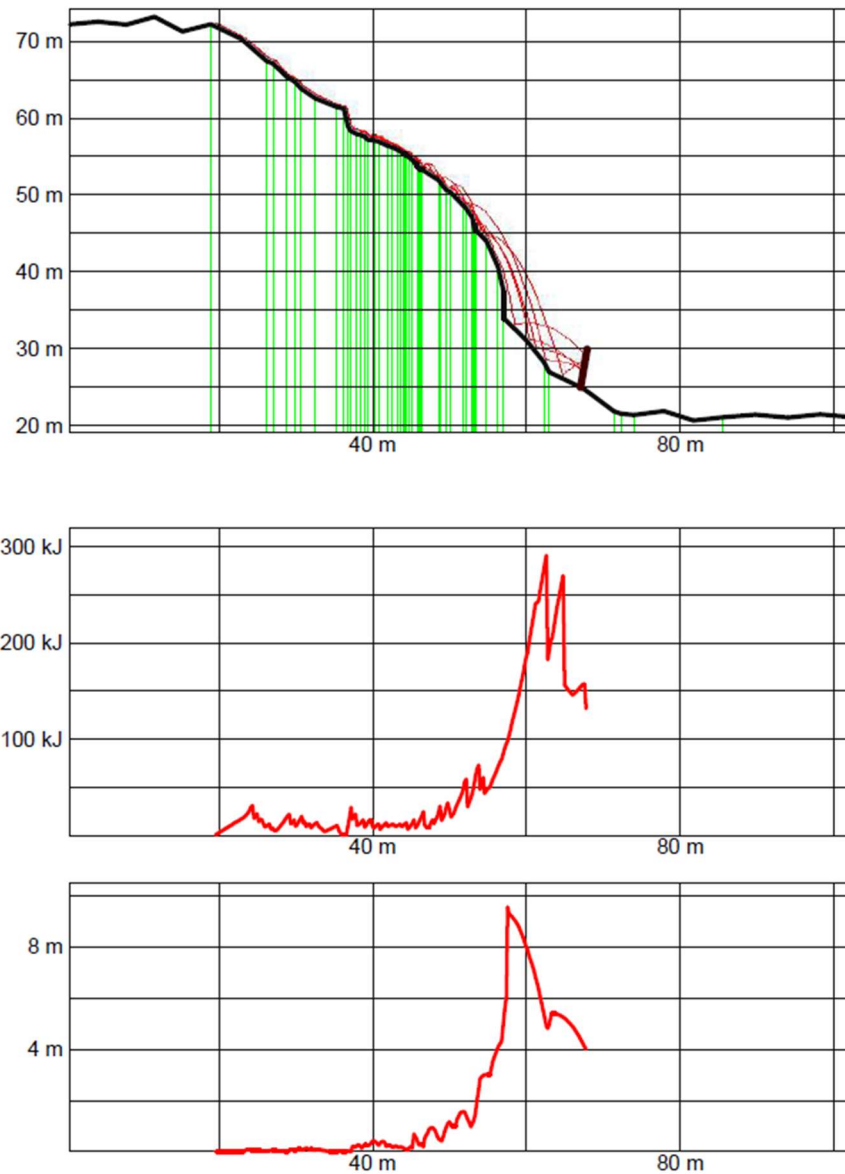
7.6.1. Poprečni presjek Z3

Kod poprečnog presjeka Z3 prilikom analize trajektorije, visine odskoka bloka i energije udara u slučaju bez sanacije dobiva se rješenje prikazano slikom 47. Analiza je rađena na simulaciji odrona 100 blokova promjera 1 m, gustoće $2,5 \text{ t/m}^3$, koji padaju sa vrha pokosa, a početna brzina im je $0,1 \text{ m/s}$.

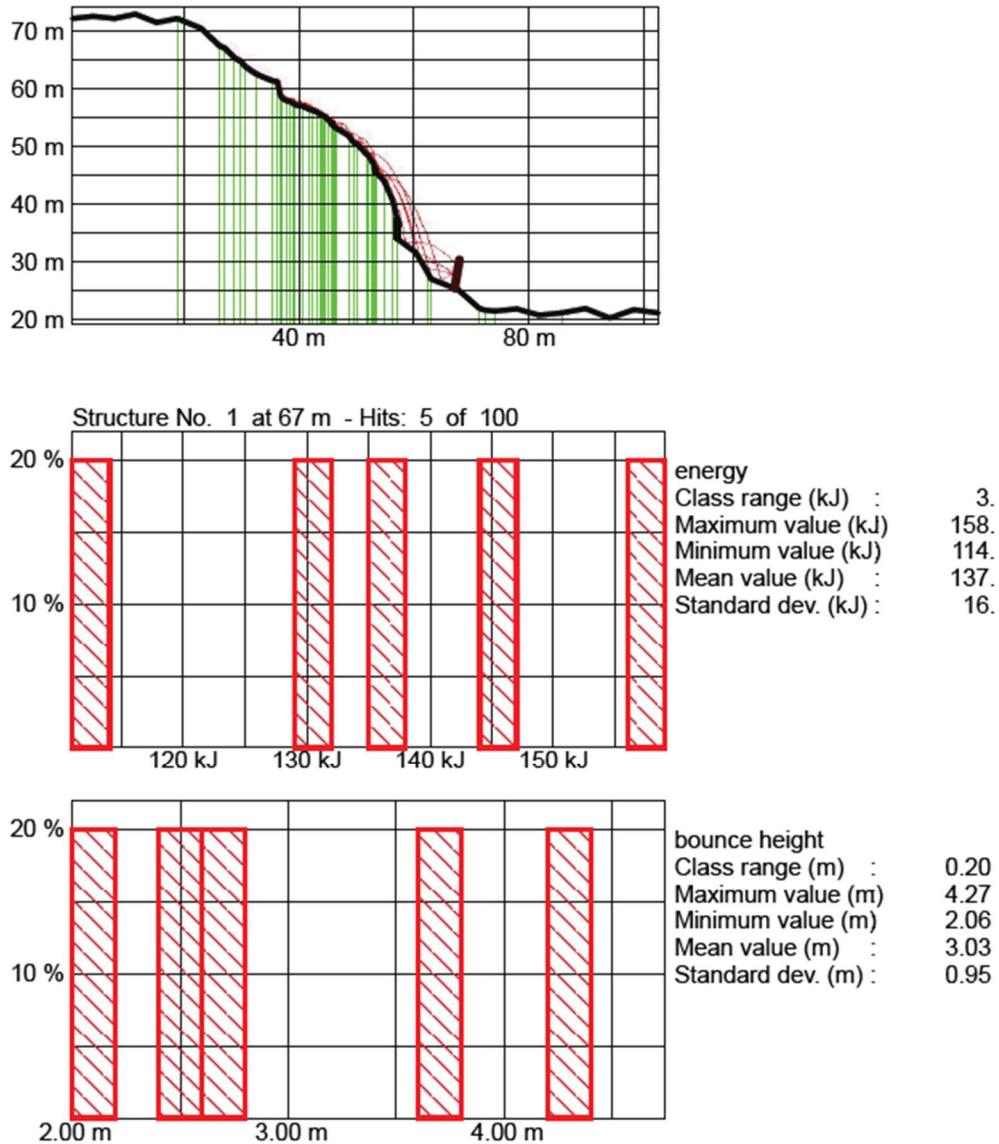


Slika 47: Trajektorija, energija udara blokova, visina odskoka te količina blokova koji su zaustavljeni na određenoj duljini

U slučaju sanacije pokosa fleksibilnim barijerama za zaštitu od odrona dobiva se rješenje prikazano slikama 48 i 49. Barijera je visine 5 m, postavljena u nožici pokosa pod nagibom od 10° . Njome je spriječeno daljnje gibanje odronjenih blokova stijenske mase, s time da je najveća postignuta energija udara bloka u barijeru iznosila 158 kJ, dok je najveća visina odskoka bila 4,27 m.



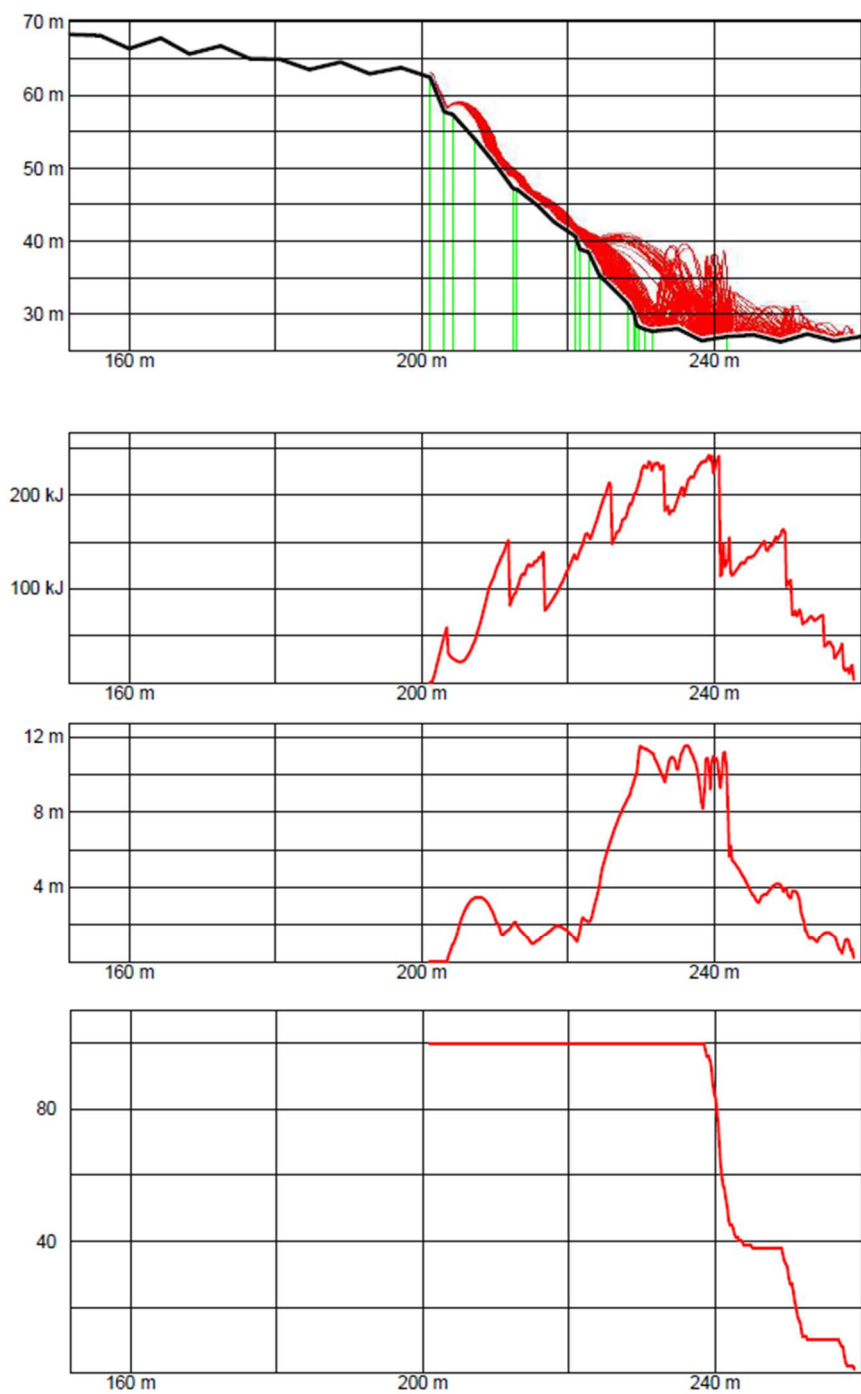
Slika 48: Trajektorija, energija udara blokova te visina odskoka tijekom putanje



Slika 49: Statističke vrijednosti energije udara u barijeru i visine odskoka

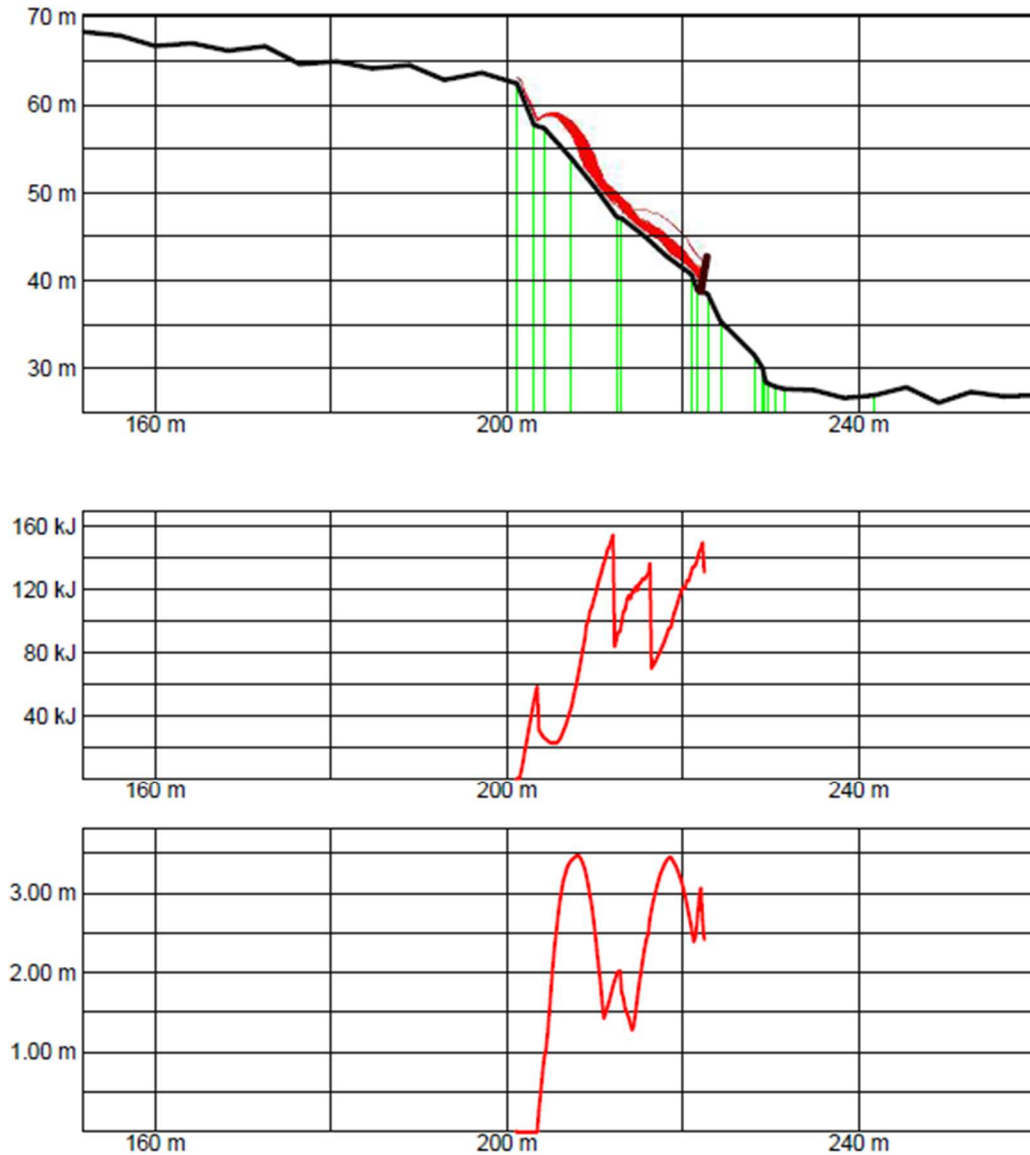
7.6.2. Poprečni presjek Z5

Kod poprečnog presjeka Z5 prilikom analize trajektorije, visine odskoka bloka i energije udara u slučaju bez sanacije dobiva se rješenje prikazano slikom 50. Analiza je rađena na simulaciji odrona 100 blokova promjera 1 m, gustoće $2,5 \text{ t/m}^3$, koji padaju sa vrha pokosa, a početna brzina im je $0,1 \text{ m/s}$.

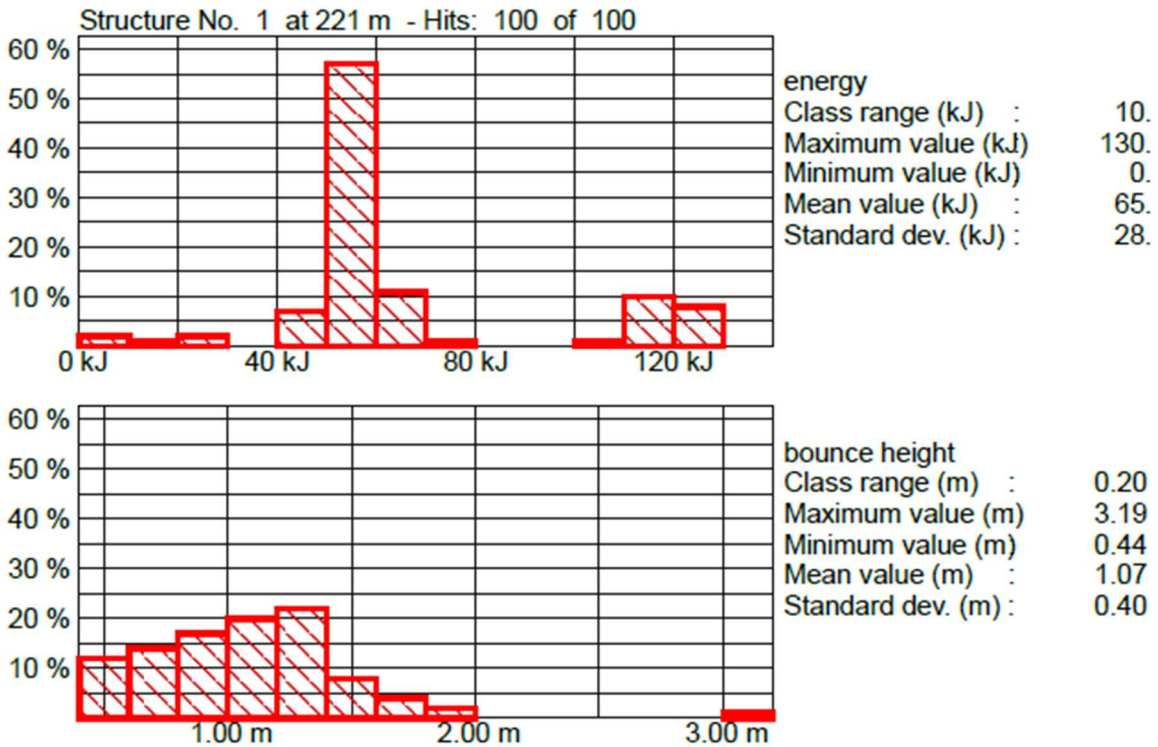
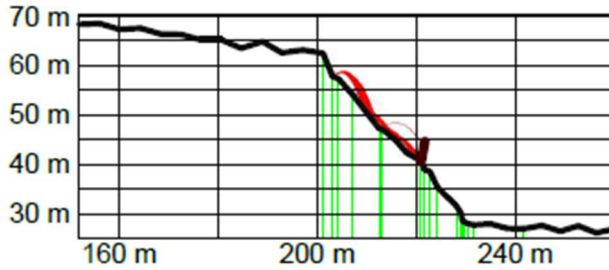


Slika 50: Trajektorija, energija udara blokova, visina odskoka te količina blokova koji su zaustavljeni na određenoj duljini

U slučaju sanacije pokosa fleksibilnim barijerama za zaštitu od odrona dobiva se rješenje prikazano slikama 51 i 52. Barijera visine 4 m postavljena je u nožici pokosa pod nagibom od 10° . Njome je spriječeno daljnje gibanje odronjenih blokova stijenske mase, s time da je najveća postignuta energija udara bloka u barijeru iznosila 130 kJ, dok je najveća visina odskoka bila 3,19 m.



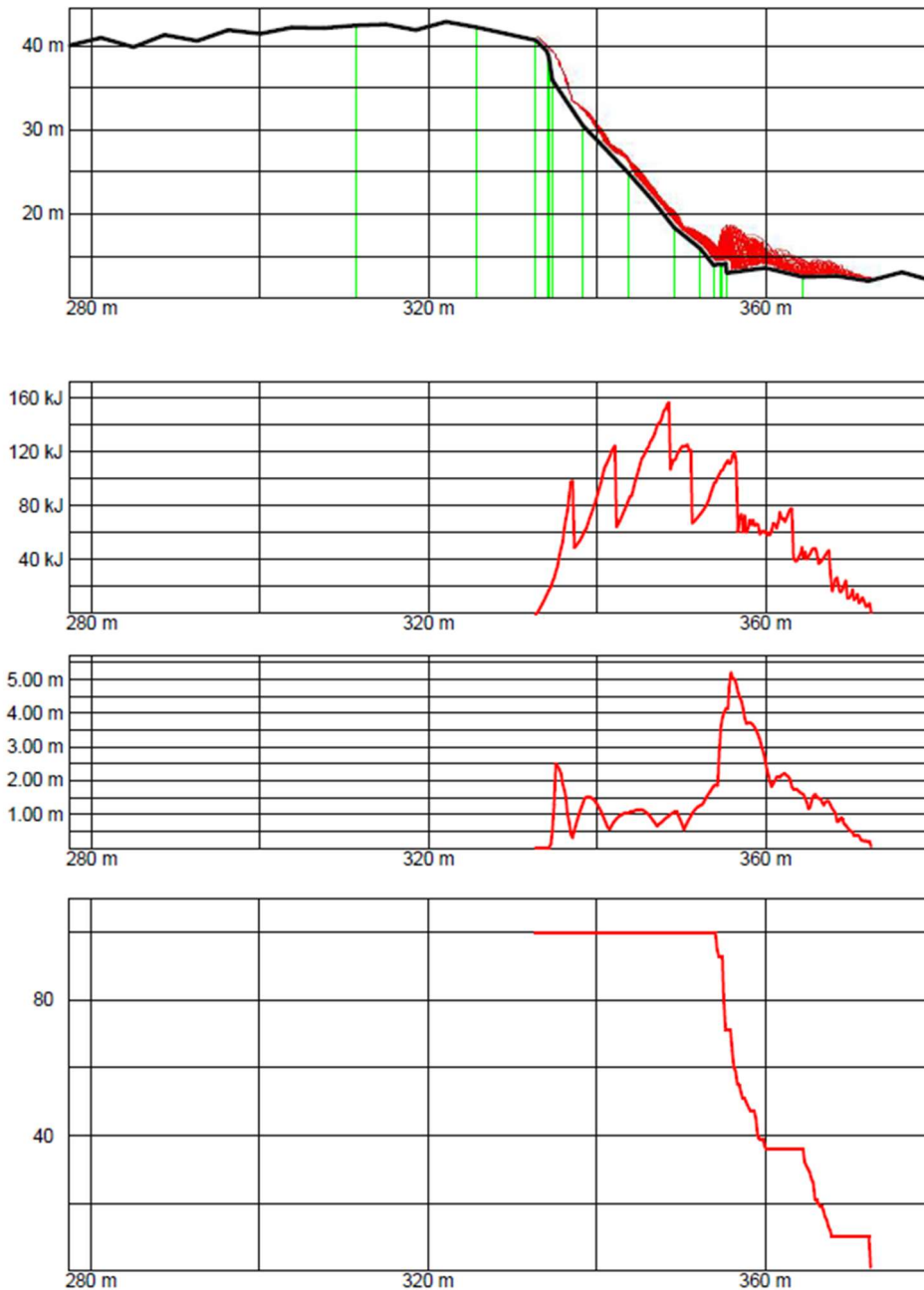
Slika 51: Trajektorija, energija udara blokova te visina odskoka tijekom putanje



Slika 52: Statističke vrijednosti energije udara u barijeru i visine odskoka

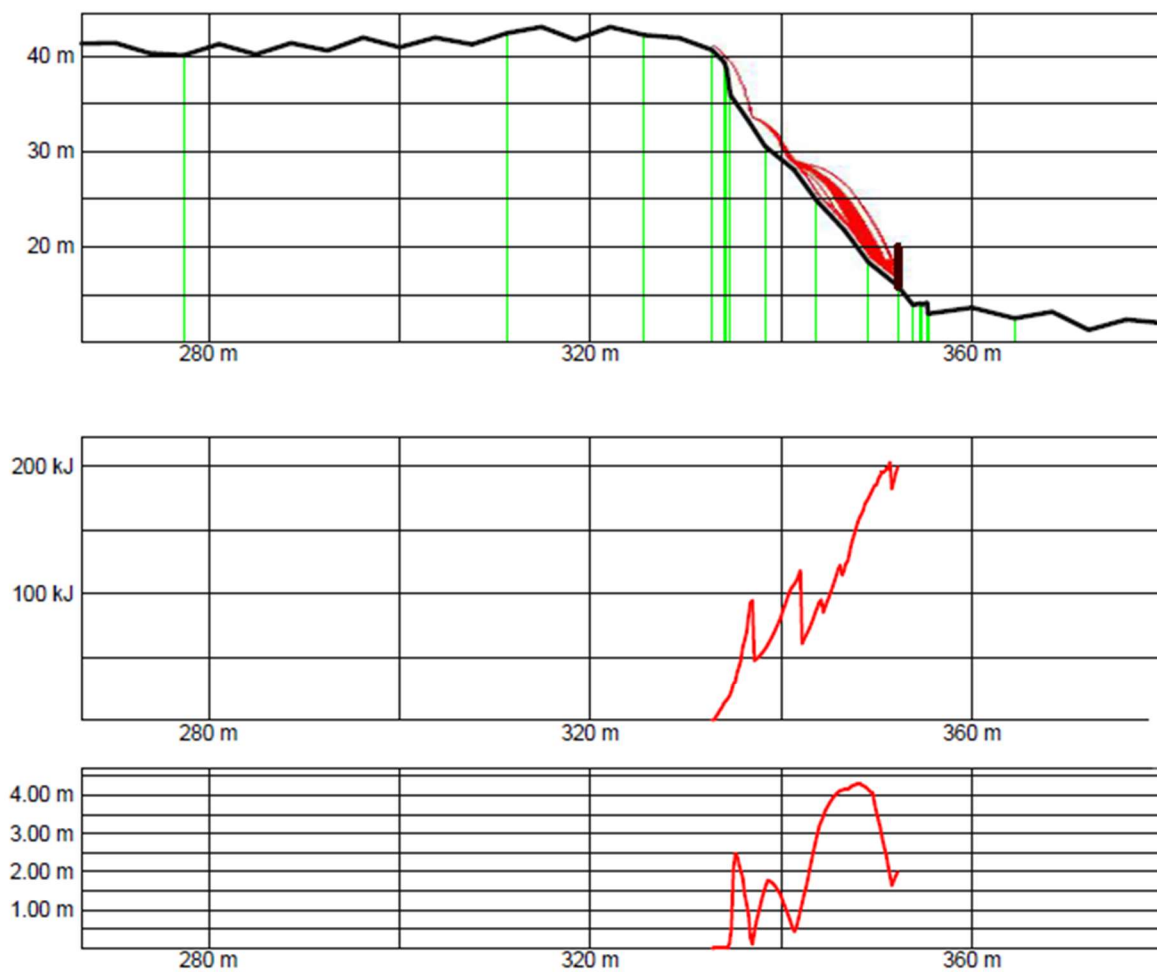
7.6.3. Poprečni presjek Z8

Kod poprečnog presjeka Z8 prilikom analize trajektorije, visine odskoka bloka i energije udara u slučaju bez sanacije dobiva se rješenje prikazano slikom 53. Analiza je rađena na simulaciji odrona 100 blokova promjera 1 m, gustoće $2,5 \text{ t/m}^3$, koji padaju sa vrha pokosa, a početna brzina im je $0,1 \text{ m/s}$.

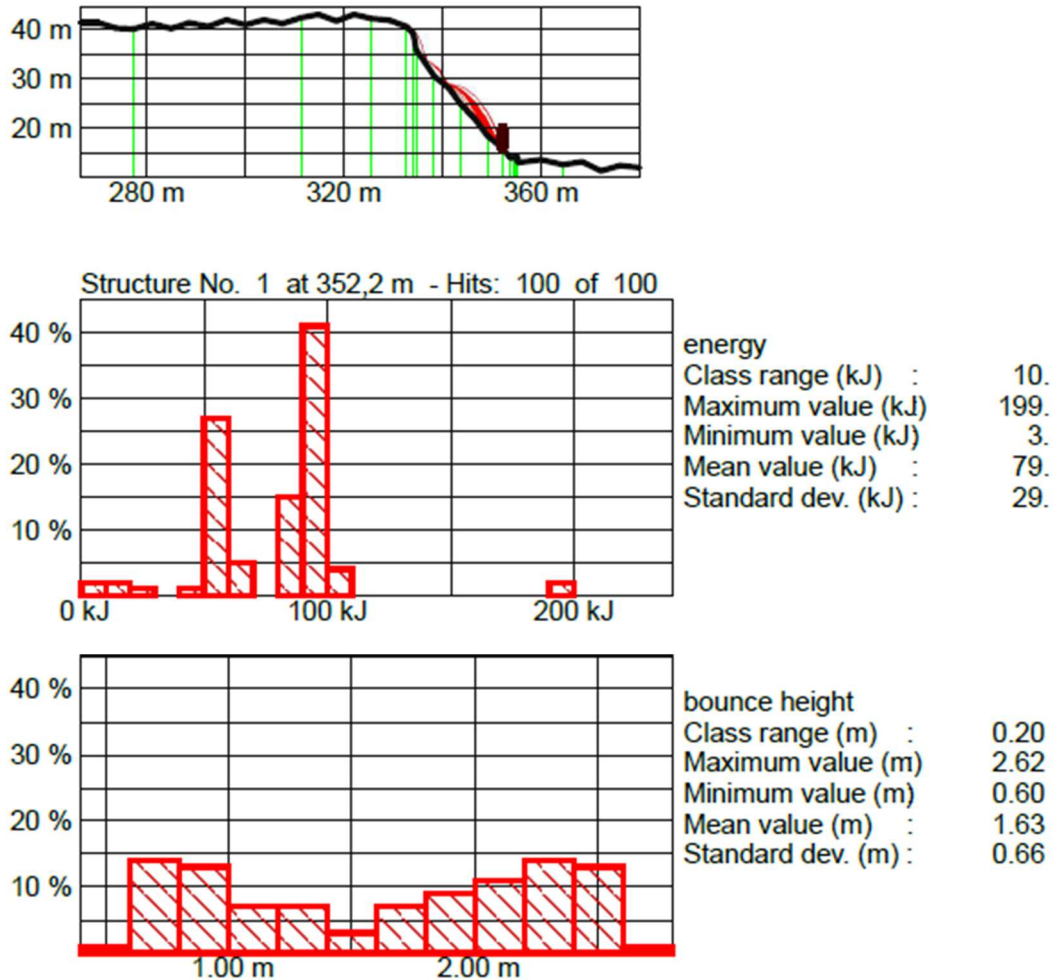


Slika 53: Trajektorija, energija udara blokova, visina odskoka te količina blokova koji su zaustavljeni na određenoj duljini

U slučaju sanacije pokosa fleksibilnim barijerama za zaštitu od odrona dobiva se rješenje prikazano slikama 54 i 55. Barijera je visine 4 m, postavljena okomito u nožici pokosa. Njome je spriječeno daljnje gibanje odronjenih blokova stijenske mase, s time da je najveća postignuta energija udara bloka u barijeru iznosila 199 kJ, dok je najveća visina odskoka bila 2,62 m.



Slika 54: Trajektorija, energija udara blokova te visina odskoka tijekom putanje



Slika 55: Statističke vrijednosti energije udara u barijeru i visine odskoka

Na temelju najvećih energija od 158 kJ kod poprečnog presjeka Z3, 130 kJ kod poprečnog presjeka Z5, te energije od 199 kJ kod poprečnog presjeka Z8, odabran je tip barijere GBE-500A tvrtke Geobrug AG (slika 34), čija je mogućnost apsorpcije udara do 500 kJ dokazana certifikatom na slici 56. Položaj barijere u profilu Z3 je 47 m od vrha pokosa, u profilu Z5 je 24 m od vrha pokosa, dok je u profilu Z8 postavljena 25 m od vrha pokosa.

8. ZAKLJUČAK

Odron je definiran kao odvojena masa stijenskog materijala sa strmih kosina ili površina na kojima nema smicanja. Hazard odrona ima najveći utjecaj u zonama ljudskih aktivnosti kao što su prometnice, infrastruktura, naselja i slično, gdje može uzrokovati značajne ekonomske i/ili ljudske gubitke, stoga je važno unaprijed razviti funkcionalan sustav zaštite od odrona kako bi posljedice bile minimalne. Tehnologija zaštite stijenskih pokosa te prevencija od odrona je znatno napredovala u posljednjem desetljeću, posebice radi mnogobrojnih iskustava koja su stečena u prošlosti, ali i konstantnim razvojem novih metoda zaštite. Dok se u prošlosti uglavnom koristila zaštitna mreža s vrlo niskom kvalitetom čelika i antikorozivne zaštite, danas se tehnologija zaštite temelji na sidrenju velikih blokova te na prihvaćanju odronjenog stijenskog materijala pomoću fleksibilnih barijera velikih apsorpcijskih kapaciteta koje se nalaze na samoj stijenskoj masi i na taj način štite ugrožena područja ispod sebe. Najveći problem koji se javlja kod hazarda odrona je taj što trenutno u Republici Hrvatskoj ne postoji klasifikacija stijenskih odrona koja je prilagođena hrvatskom kršu, niti je razvijeno sustavno prikupljanje podataka o već postojećim odronima koji mogu dati informacije o veličini i učestalosti pojavljivanja. Potrebno je poraditi ne samo na razvoju tehnologija zaštite, već i na uspostavljanju sustava praćenja potencijalnih odrona.

U ovome je radu kao projektni zadatak analizirano varijantno rješenje sanacije županijske ceste ZC6034 na lokaciji Radljevac. Rješenje je simulirano računalnim programom Rockfall, v.6.1. Podaci potrebni za kvalitetno definiranje parametara stijenske mase su prikupljeni radom više različitih struka, budući da sami inženjeri geotehničari nisu dovoljni da bi se napravila objektivna analiza problema. Osnovna zadaća je bila analiza nestabilnih blokova, odnosno simulacija mogućih trajektorija, visine odskoka te energije udara bloka u stijensku masu, odnosno u zaštitnu barijeru. Kao ključni čimbenici za pojavu klizišta uzeti su u obzir nagib terena te njegova geološka građa, hidrogeološka svojstva stijene te seizmičnost područja. Osnovnu stijenu na lokaciji pokosa predstavljaju kampilske naslage, odnosno izmjena pješčenjaka, silita i vapnenaca donjotrijaske starosti, dok su hidrogeološki uvjeti uvjetovani litološkom građom, strukturnim odnosima te stupnjem trošnosti. Većina diskontinuiteta ima vlažnu ispunu, što ukazuje na procjeđivanje podzemne i oborinske vode. Temeljem rezultata dobivenih programom Rockfall kao jedno varijantno rješenje odabrane su fleksibilne barijere tvrtke Geobrugg AG, čija je mogućnost apsorpcije energije do 500 kJ, što je i više nego dovoljno da zaštiti prometnicu koja se nalazi odmah uz nožicu kosine.

Kao što je već navedeno, odroni stijenske mase predstavljaju konstantnu opasnost za imovinu te ljudske živote, stoga je potrebno ustanoviti tako ugrožena područja i razviti strategiju zaštite od odrona i upravljanja hazardima i rizicima od odrona na pokosima različitih stijenskih masa. Budući da je većinu slomova na kosini moguće predvidjeti ukoliko se na vrijeme provedu odgovarajuća istraživanja, troškovi prevencije klizišta su znatno manji od troškova sanacije, a kao izlazni podatak dobiva se kvalitetno projektirano rješenje.

9. LITERATURA

- [1] Pollak D., Gulam V., Bostjančić I., Podolszki L., Filipović M., Frengen T., *Klizišta u Hrvatskoj – koje su regije ugrožene?*, Vijesti Hrvatskoga geološkog društva, 55(1), Zagreb, 2018.
- [2] Varnes D.J., *Slope Movement Types and Processes*, pp. 11-33 in *Landslides: Analysis and Control*, (ur. Schuster, R.L., Krizek R.J.), Special Report 176, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1978.
- [3] Bačić M., *Stabilnost odrona*, predavanje iz kolegija Geotehničko inženjerstvo, preddiplomski studij, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_11.predavanje_Stabilnost_odrona.pdf, pristup 9.5.2019.
- [4] Volkwein A. et al., *Rockfall characterisation and structural protection – a review*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2617-2651, 2011.
- [5] Wyllie D.C., *Rock Fall Engineering*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca raton, London and New York, 2015.
- [6] Đomlija P., *Istraživanja klizišta 1. dio*, predavanje iz kolegija Stabilnost kosina, diplomski studij, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku
- [7] Đomlija P., *Stijenska masa*, predavanje iz kolegija Inženjerska mehanika stijena, diplomski studij, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku
- [8] Dugonjić Jovančević S., *Inženjerska mehanika stijena*, skripta, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, https://helpdesk.uniri.hr/system/resources/docs/000/007/247/original/Skripta_In%C5%BEEjnerska_mehanika_stijena.pdf?1450268943, pristup 12.5.2019.

- [9] Wyllie D.C., Mah C.W, *Rock Slope Engineering: civil and mining*, 4th edition, The Institute of Mining and Metallurgy and E.Hoek and J.W.Bray, Spon Press, Taylor & Francis Group, London and New York, 2004.
- [10] Jurić Kaćunić D., Arapov I, Kovačević S.M, *Novi pristup određivanju krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu*, *Građevinar*, 63(2), 177-185, Zagreb, 2011.
- [11] Palmstrom A., *Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)*, *Tunnels and Underground Space Technology*, 20, 362-377, 2005.
- [12] Navratil D., *Optimizacija eksploatacije tehničko-građevnog kamena i općenito inženjerskih zahvata u stijenskim masama korištenjem novih metoda*, Hrvatski geološki institut, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju, Zagreb, https://www.hgi-cgs.hr/images/gosp_komora/DFN_SHAPEMETRIX_Navratil_KOMORA.pdf, pristup 17.9.2019.
- [13] *Chapter 7: Weathering, Erosion and Soil*, <https://slideplayer.com/slide/4136640/>, pristup 19.9.2019.
- [14] *Weathering and mass movement*, <https://www.slideshare.net/ccwhitbygeography/2-weathering-and-mass-movement-138221388>, pristup 19.9.2019.
- [15] The times of Israel, <https://www.timesofisrael.com/archaeologist-says-entire-western-wall-a-danger-zone/>, pristup 19.9.2019.
- [16] Rayudu D.N.P., *Computer Simulation of Rockfalls – Application to Rockfalls at Fox Glacier, West Coast, New Zeland*, Lincoln University, 1997.
- [17] Peng B., *Rockfall Trajectory Analysis – Parameter Determination and Application*, University of Canterbury, 2000.
- [18] Stevens W.D., *RocFall: a Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls*, University of Toronto, 1998.

- [19] *Rock Slide Detector Fence at Cape Horn*, The GreatRails North American Railroad Photo Archive, <http://photos.greatrails.net/s/?p=30356>, pristup 16.10.2019.
- [20] *Mreže za zaštitu pokosa*, Geo Material, Rijeka, <http://www.geo-material.com/mreze-za-zastitu-pokosa/>, pristup 16.10.2019.
- [21] *Zaštita pokosa – zaštitne mreže*, Geotech, Rijeka, <https://www.geotech.hr/zastitne-mreze/>, pristup: 16.10.2019.
- [22] *Rockfall – Steelgrid High Strength Mesh*, India, <https://www.maccaferri.com/in/products/rockfall-steelgrid-high-strength-mesh/>, pristup: 16.10.2019.
- [23] *Zaštita pokosa*, Volt magazine, <https://www.prometna-signalizacija.com/oprema-cest/zastita-pokosa/>, pristup: 16.10.2019.
- [24] *Zaštita pokosa – zaštita stijenskog pokosa na dijelu državne ceste između Hreljina i Križišća*, Geotech, Rijeka, <https://www.geotech.hr/zastita-stijenskog-pokosa/>, pristup: 16.10.2019.
- [25] Volkwein A., Gerber W., *Stronger and lighter – evolution of flexible rockfall protection systems*, Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection, Switzerland, 2008
- [26] RXE barriers, GeobruGG AG, Geohazard Solutions, <https://www.geobruGG.com/en/Rockfall-protection-barriers-RXE-7955,7859.html>, pristup: 14.10.2019.
- [27] GBE barriers, GeobruGG AG, Geohazard Solutions, <https://www.geobruGG.com/en/Rockfall-protection-barriers-GBE-7953,7859.html>, pristup 16.10.2019.

- [28] Arbanas Ž., *Projektiranje u stijenskim masama – tečaj stručnog usavršavanja*, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2008.
- [29] *Zaštita pokosa – barijere za zaštitu od odrona*, Geotech, Rijeka, <https://www.geotech.hr/barijere-za-zastitu-od-odrona/>, pristup: 16.10.2019.
- [30] *Zaštita pokosa – Zaštita od odrona u Omišu – Utjecajno područje tunela Brzet*, Geotech, Rijeka, <https://www.geotech.hr/zastita-od-odrona-u-omisu/>, pristup: 16.10.2019.
- [31] *Attenuator*, Geobrugg AG, Geohazard Solutions, <https://www.geobrugg.com/en/Rockfall-ATTENUATOR-104911,7859.html>, pristup: 17.10.2019.
- [32] *Rockfall-X*, Geobrugg AG, Geohazard Solutions, <https://www.geobrugg.com/en/ROCKFALL-X-7772,7859.html>, pristup: 17.10.2019.
- [33] Volkwein A., Wendeler C., Budimir V., *Građevne tehnologije – galerija za zaštitu od odrona kamenja*, Građevinar, 63(4), 399-400, Zagreb, 2011.
- [34] Udovič D., Arbanas Ž., Mihalić Arbanas S., Grošić M., *Suvremene metode utvrđivanja opasnosti i zaštite od odrona na infrastrukturnim građevinama*, 7. sabor hrvatskih graditelja, Cavtat, 2016.
- [35] Arbanas Ž., Udovič D., Sečanj M., Đomlija P., Mihalić Arbanas S., *Recentna iskustva u procjeni hazarda i rizika od odrona u stijenskoj masi*, 7. Konferencija Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, Zbornik radova, 2018.
- [36] Arbanas Ž., *Stijenski pokos na dijelu ŽC6034, lokacija Radljevac, Izvedbeni projekt sanacije*, el.br. 361-03/18-01/14; 2107-57-02-00-18-4/IP, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2018.