

Analize stabilnosti i mjere sanacije klizišta

Švegar, Nikolina

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:157:775858>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Nikolina Švegar

Analize stabilnosti i mjere sanacije klizišta

Završni rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Stručni prijediplomski studij
Geotehničko inženjerstvo**

**Nikolina Švegar
JMBAG: 0114029791**

Analize stabilnosti i mjere sanacije klizišta

Završni rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom 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.

Nikolina Švegar

U Rijeci, 10.09.2024.

SAŽETAK

Osiguranje stabilnosti kosina od iznimne je važnosti za sprječavanje i sanaciju lokalnih nestabilnosti, ali i mogućih pojava globalnih nestabilnosti i klizišta. Klizišta predstavljaju pokrete mase materijala tla i stijene niz kosinu. Koriste se različite metode i mjere stabilizacije kako bi se procijenila i spriječila mogućnost pojave klizišta. Rad obuhvaća pregled tipova nestabilnosti i uzroka pojave klizišta, pregled metoda sanacije klizišta, te važnosti korištenja ekološki prihvatljivih materijala i mjera pri sanaciji klizišta. U radu je prikazan i primjer analize stabilnosti klizišta korištenjem softvera Rocscience Slide 2, te promjena vrijednosti faktora sigurnosti pod različitim utjecajima koji se javljaju na kosini.

Ključne riječi: klizište, tipovi nestabilnosti, analiza stabilnosti, faktor sigurnosti, mjere sanacije, ekološki prihvatljive mjere i materijali, Rocscience, Slide 2

SUMMARY

Ensuring slope stability analysis is crucial for the prevention and remediation of local instabilities, as well as potential occurrences of global instabilities and landslides. Landslides involve the movement of soil and rock material down a slope. Various methods and techniques are used to assess and prevent the possibility of landslides. This thesis includes overview of types of instabilities and the causes of landslide remediation methods, and the importance of using environmentally friendly materials and measures in landslide remediation. Additionally, the paper presents an example of landslide stability analysis using Rocscience Slide 2 software, as well as the changes in the safety factor values under different conditions occurring on the slope.

Keywords: landslide, types of instabilities, stability analysis, safety factor, remediation measures, environmentally friendly measures and materials, Rocscience Slide 2.

POPIS SLIKA

Slika 1. Aksonometrijski prikaz presjeka tipičnog klizanja kosine (prema Varnes 1978, preuzeto [15])	2
Slika 2. Prikaz tipova nestabilnosti [16]	6
Slika 3. Shematski prikaz odronjavanja [16].....	7
Slika 4. Rotacijsko klizište [16].....	8
Slika 5. Translacijsko klizanje [16].....	9
Slika 6. Tečenje izazvano utjecajem oborina [16]	10
Slika 7. Shematski prikaz prevrtanja [16]	10
Slika 8. Shematski prikaz širenja tla [7,16].....	11
Slika 9. Prikaz slika koje djeluju unutar klizišta [17]	14
Slika 10. Dodavanje materijala [17].....	15
Slika 11. Smanjenje općeg nagiba kosine [17]	15
Slika 12. Metode dreniranja kosine, modificirano prema [17]	17
Slika 13. Neke od metoda unutrašnjeg ojačanja kosine, modificirano prema [17]	19
Slika 14. Shema mjera sanacije nestabilnosti u stijenskoj masi, modificirano prema [17] ..	20
Slika 15. Gabionski zid ozelenjen vegetacijom [22].....	23
Slika 16. Prikaz sučelja Slide 2 softvera	26
Slika 17. Prikaz prozora postavki glavnih parametara	27
Slika 18. Prikaz postavki pri odabiru korištenja jednog ili više modela.....	28
Slika 19. Prikaz sučelja za unos karakteristika materijala.....	29
Slika 20. Sile koje se uzimaju u obzir prilikom Janbu pojednostavljene metode [19]	31
Slika 21. Prikaz tri sloja materijala i njihovih karakteristika.....	36
Slika 22. Prikaz kritičnog faktora sigurnosti dobivenog u prvom scenariju.....	37
Slika 23. Prikaz faktora sigurnosti pri pojavi vode	38
Slika 24. Prikaz modela sanacije klizišta gabionskim potpornim zidom	39
Slika 25. Prikaz dobivenog faktora sigurnosti nakon ugradnje potpornog zida	40

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O KLIZIŠTIMA	2
2.1. Klasifikacija klizišta prema osobinama materijala	4
2.2. Tipovi nestabilnosti prema mehanizmu sloma	5
2.2.1. Odron	7
2.2.2. Rotacijsko klizanje	7
2.2.3. Translacijsko klizanje	8
2.2.4. Tečenje	9
2.2.5. Prevrtanje	10
2.2.6. Širenje tla	11
2.3. Čimbenici koji utječu na pojavu klizišta	11
3. MJERE SANACIJE KLIZIŠTA	13
3.1. Modifikacija geometrije kosine	14
3.2. Dreniranje	16
3.3. Potporne konstrukcije	18
3.4. Unutarnje ojačanje kosine	18
3.5. Mjere zaštite od odrona	19
4. MJERE SANACIJE KLIZIŠTA PRIHVATLJIVE OKOLIŠU	21
4.1 Tehnike bioinženjeringa	21
4.2 Geosintetici	22
4.3 Ekološki prihvatljiv beton	22
4.4 Rješenja temeljena na prirodnim mjerama sanacije	23
5. ANALIZE STABILNOSTI KOSINA	24
6. PRIMJER PROVEDBE ANALIZE STABILNOSTI KLIZIŠTA	33
7. ZAKLJUČAK	41

1. UVOD

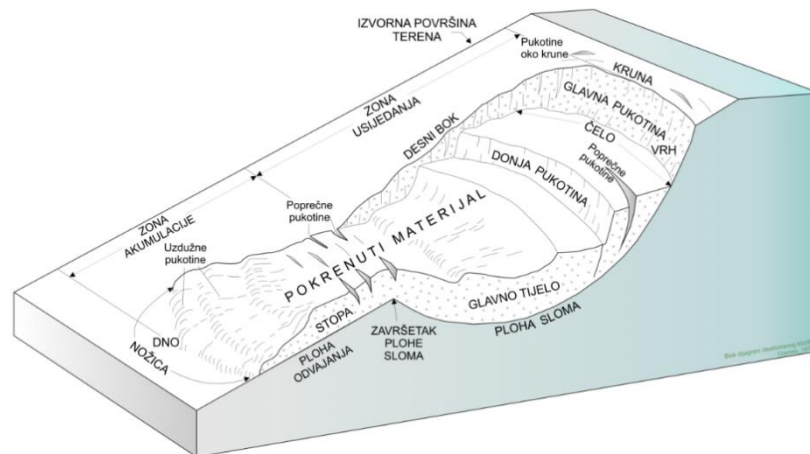
Klizišta predstavljaju značajan problem u svijetu jer mogu izazvati štete pogubne za okoliš, infrastrukturu pa i ljudske živote. Pod pojmom klizište podrazumijevamo gibanja mase tla ili stijene niz kosinu pod utjecajem gravitacije, a izazvana su nekim od geomehaničkih procesa. Obzirom da je pojava klizišta učestala predviđanje i sanacija klizišta od iznimne su važnosti. U analizi stabilnosti koriste se različite metode i tehnike. Glavna zadaća mjera stabilizacije i sanacije klizišta je osigurati trajnu stabilnost kosine, što zapravo znači prestanak pokreta klizišta ili smanjenje brzine kretanja. Metode stabilizacije klizišta zasnivaju se na dva opća načela u stabilizaciji tla, a to su smanjenje aktivnih sila koje su izazvale klizište ili povećanje otpornosti tla ili stijene. Aktivne sile mogu se smanjiti iskopom nestabilnog dijela kosine i drenažom površinske ili podzemne vode kako bi se smanjio porni tlak koji djeluje u nestabilnoj zoni. Uz pravilno izvođenje drenaže kojom se postiže povećanje čvrstoće tla ili stijene na kosini potrebno je ukloniti slabe slojeve ili druge potencijalne zone sloma te izgraditi potporne konstrukcije.

U ovom radu korišten je Rocscience softver za 2D analizu stabilnosti i izračun vrijednosti faktora sigurnosti, kako bi se provjerila stabilnost klizišta. Kako softver Slide 2 pruža nekoliko metoda sanacije u ovom radu korištena je i detaljnije opisana Janbu pojednostavljena metoda. Obzirom na velike količine građevinskih otpada u svijetu u ovom radu opisane su neke od ekološki prihvatljivih metoda sanacije klizišta kako bi se mogućnost stvaranja građevinskog otpada čim više smanjila, a osigurala održivost gradnje i zaštita okoliša.

2. OPĆENITO O KLIZIŠTIMA

Klizišta se definiraju kao tereni koji su nastali posljedicom pomicanja mase stijena, zemlje, krhotina ili tla niz kosinu. Ona nastaju kada gravitacijske i druge vrste posmičnih naprezanja unutar kosine premašuju čvrstoću na smicanje materijala koji čine kosinu. Sama masa može se kretati brzinom koja je jako mala što je poznato kao puzanje ili pak izrazito velika što očituje brzim klizanjem.

Poznavanje klizišta u građevinarstvu i mehanici tla od velike je važnosti stoga se pokušava proučavanjem odrediti djelovanje mjera koje će smiriti aktivna klizišta i predvidjeti opasnosti od klizanja. Svako klizište definirano je na gornjem rubu poprečnim pukotinama koje su u većini slučajeva otvorene, dok se na bočnim granicama između pokretne i stabilne zone kosine nalaze zatvorene pukotine smicanja. Materijal koji je u stopi pokrenute mase poprečno je raspucan i radijalno deformiran. Poremećena masa definirana je dimenzijama duljina L , širina B i dubina D , koje su određenih granica za različite tipove klizanja, što je prikazano na Slici 1. Odnosi između navedenih dimenzija mogu poslužiti pri razvrstavanju u karakteristične tipove klizanja [2].



Slika 1. Aksonometrijski prikaz presjeka tipičnog klizanja kosine (prema Varnes 1978, preuzeto [15])

Posmična naprezanja na kosini javljaju se pod utjecajem gravitacije, ali i ostalih čimbenika kao što su oborine, prekomjerni nagib podnožja kosine, podizanje razina podzemne vode, potresi, ljudske aktivnosti ili bilo koja kombinacija ovih čimbenika. Čvrstoća na smicanje ovisi o nekoliko čimbenika, a to su trenje i kohezija. Trenje stvara otpor gibanja između sastavnih čestica materijala dok kohezija predstavlja vezu između čestica. Grube čestice poput pijeska imaju veliko trenje, ali nisku kohezijsku čvrstoću, dok je za glinu koja se sastoji od sitnih, finih čestica, suprotno. Još jedan faktor koji utječe na smanjenje posmične čvrstoće materijala koji čini kosinu je sedimentna struktura odnosno prostorno raspoređivanje čestica. Ukoliko materijal ima otvorenu ili labavu sedimentnu strukturu, a bude mehanički poremećen ili poplavljen vodom on će oslabiti. Povećanje udjela vode, bilo da proizlazi iz ljudske aktivnosti ili prirodnih uzroka obično slabi pješćane materijale smanjenjem trenja između čestica, i slabi gline kroz otapanje sedimenata između čestica, hidrataciju glinenih minerala i eliminaciju kapilarne napetosti [1].

Klizišta se mogu klasificirati u različite vrste pomoću dva termina, a to su kretanja mase i vrsta materijala. Materijal u masi klizišta može biti stijena, tlo ili kombinacija stijene i tla. Ukoliko je materijal sastavljen uglavnom od čestica veličine pijeska ili manjih, tada to smatramo zemljanim materijalom, dok je stijenski sastavljen od grubljih fragmenata.

Klizanje će se završiti tek kada je oblik kosine toliko promijenjen da se zbog promjene naprezanja opet uspostavi ravnoteža ili prestane djelovanje utjecaja koji su izazvali same poremećaje [2].

2.1. Klasifikacija klizišta prema osobinama materijala

Kao što je i ranije spomenuto, postoji mnoštvo različitih klasifikacija, što je posljedica složenog procesa kretanja mase materijala tla ili stijene. S obzirom na vrstu materijala klizišta možemo podijeliti na tla koja su pretežito zrnata ili fina i na stijenske mase. Klasifikacija klizišta prema materijalima ključna je za razumijevanje mehanizama sloma isto kao i za razvoj mjera stabilizacije. Različite vrste materijala zahtijevaju posebne pristupe u ispitivanju i analizi, pa tako korištenje odgovarajućih metoda ispitivanja omogućava detaljnu karakterizaciju tla i stijene na lokaciji klizišta.

Klizišta koja se događaju u stijenskom materijalu podrazumijevaju pukotine duž čvrstih materijala, što izaziva rotacijsko pomicanje velikih blokova, translaciju duž postojeće pukotine i odron odnosno fragmentaciju stijene i njihovo kretanje niz kosinu.

Za razliku od stijena tla su nekonsolidirani materijali koji mogu biti različiti, od glinenih do pjeskovitih. Klizišta u tlima su često uzrokovana promjenom vlage, pornog tlaka ili mehaničkim utjecajima, stoga ih možemo podijeliti na nekoliko vrsta.

Glina je sitnozrnasti materijal koji mijenja svoj volumen ovisno o promijeni sadržaja vlage. Isto tako glina može pokazivati koheziju, ali je podložna smanjenju čvrstoće u zasićenim uvjetima. Klizišta u glinenim tlima su često spora te se aktiviraju povećanjem vlage zbog kiša ili podzemnih voda.

Za razliku od gline pijesak ima malu koheziju i visoku razinu propusnosti. Klizišta se u pjeskovitim tlima obično događaju brzo, najčešće izazvana potresom ili naglim povećanjem pornog tlaka koji smanjuje efektivnu napetost u tlu. Pijesak kada je suh ima visoku nosivost koja se povećanjem vlažnosti smanjuje te utječe na njegovu stabilnost.

Šljunak je grubo granulirani materijal sa visokim kapacitetom drenaže, dok je mulj sitnozrnasti materijal koji ima karakteristike slične kao pijesak i glina. U šljunčanim tlima klizišta su rijetka pojava zbog visoke propusnosti, ali se mogu dogoditi ukoliko je prisutna

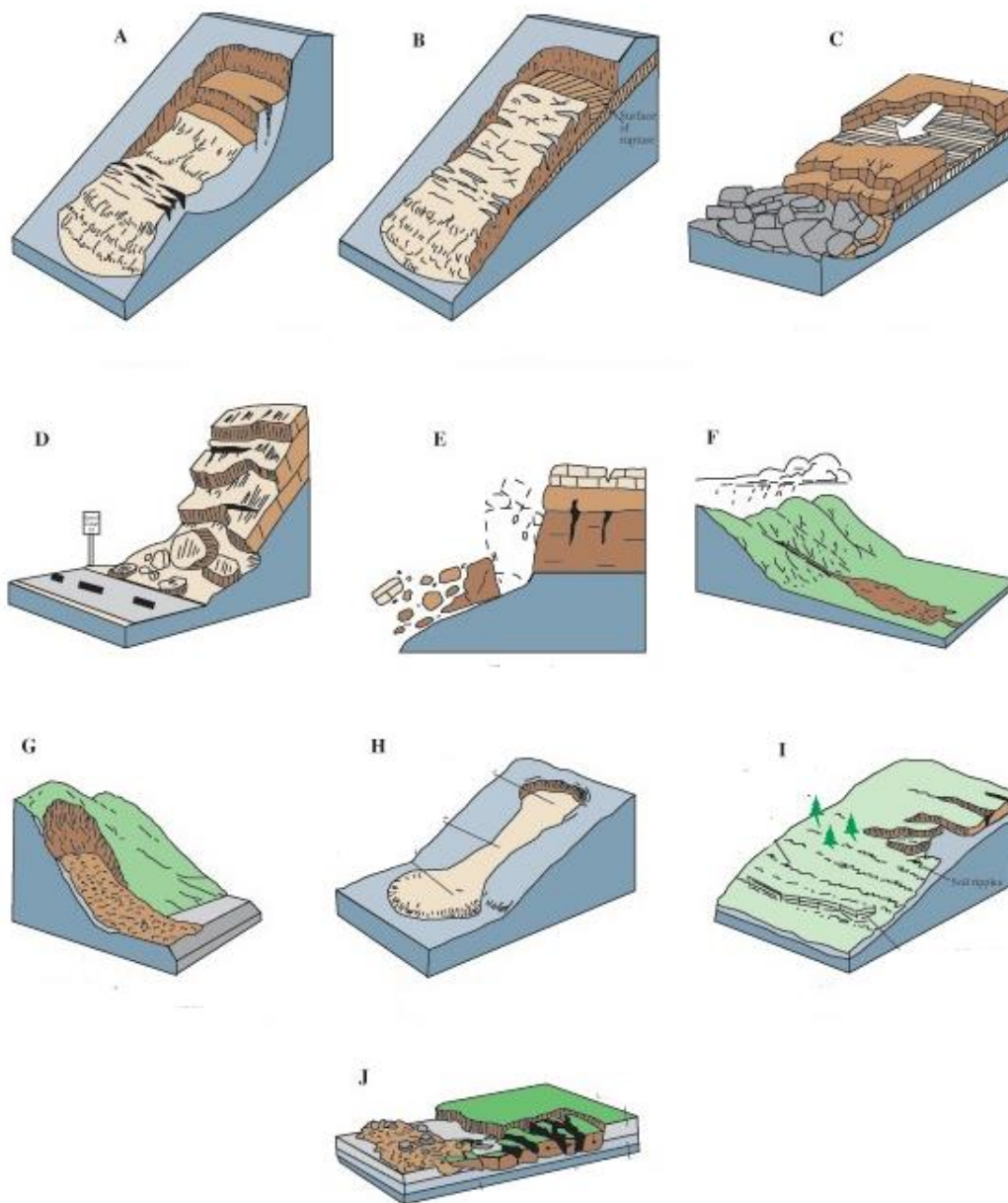
fina frakcija koja može zadržavati vodu. Mulj ima sposobnost zadržavanja vode i nisku čvrstoću u zasićenim uvjetima pa tako izaziva tečenje i klizanje.

Mješoviti materijali podrazumijevaju kombinaciju stijena i tla odnosno uključuju slojeve različitih materijala koji integriraju na različite načine, pa klizišta u takvim tlima mogu imati karakteristike i stijene i tla [4].

2.2. Tipovi nestabilnosti prema mehanizmu sloma

U nastavku su prikazani osnovni tipovi nestabilnosti koji su prikazani na Slici 2., a klasificirani su prema mehanizmu sloma:

- A) Rotacijsko klizanje
- B) Translacijsko klizanje
- C) Blokovsko klizanje
- D) Odron
- E) Prevrtnje
- F) Tok materijala niz kosinu
- G) Lavina
- H) Zemljani tok
- I) Puzanje
- J) Lateralno klizanje

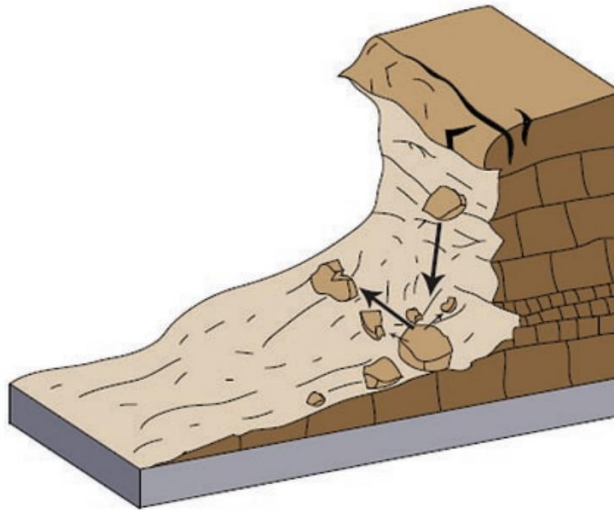


Slika 2. Prikaz tipova nestabilnosti prema mehanizmu sloma [16]

Šest osnovnih mehanizama sloma opisano je detaljnije u nastavku.

2.2.1. Odron

Odron nastaje odvajanjem mase na vrlo strmim kosinama na površinama za koje uglavnom nema smicanja, već pokrenuta masa pada slobodnim padom, kotrljanjem ili prevrtanjem odvojenog materijala sa kosine i odvajanjem pojedinih blokova što je prikazano na Slici 3. Odroni su najčešće izazvani potkopavanjem stope, prirodnom erozijom ili kao posljedica povećane visine kosine umjetnim zahvatima, što se očituje prednaprežanjem materijala u stopi. Na čelu se javljaju vlačne pukotine u koje često prodire oborinska voda te izaziva hidrostatski predtlak. Za odrone je karakteristična velika brzina, mogu se događati unutar nekoliko sekundi do minuta, te također prelaze velike udaljenosti ovisno o količini pokrenutog materijala [2].

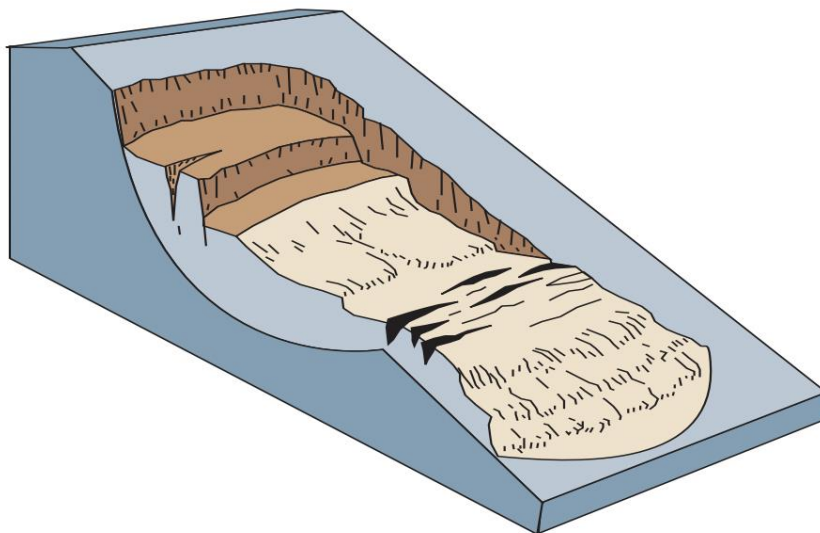


Slika 3. Shematski prikaz odronjavanja [16]

2.2.2. Rotacijsko klizanje

Rotacijsko klizanje javlja se većinom u homogenim glinovitim materijalima, iako postoji mogućnost nastanka i u nekim stjenovitim kosinama ukoliko je stijena jako raspucala i djelomično rastrošna. Glinoviti i sitnozrnasti materijali u kojima vlada kohezija omogućavaju stvaranje zakrivljenih kliznih ploha. Na gornjem kraju klizišta javlja se slijeganje i stvaraju

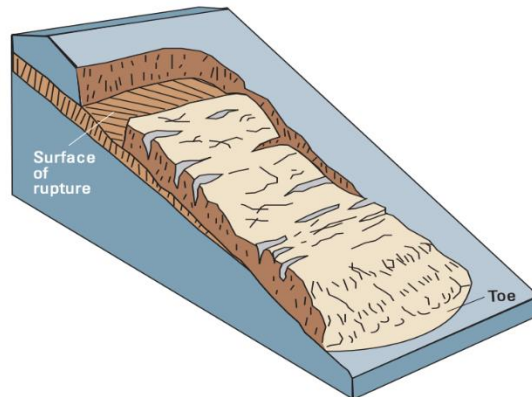
pukotine, a u stopi se izdiže i prignječuje materijal što je prikazano na Slici 4. Prignječivanjem se javljaju velike deformacije i razrahljuje se materijal. Odnos duljine (L) i visine (D) kreće se u rasponu od 1/6 do 1/3. Rotacijski se tip klizanja može javiti i na nekim stijenskim kosinama zbog izražene raspucanosti i rastrošenosti [2].



Slika 4. Rotacijsko klizište [16]

2.2.3. Translacijsko klizanje

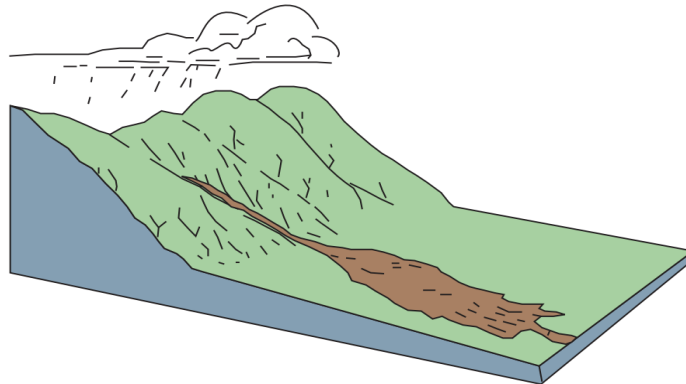
Translacijsko klizanje javlja se prilikom pojave diskontinuiteta za osobine materijala koji su u manjoj dubini približno paralelni s površinom kosine. Materijal se širi ravninski niz kosinu, bez prevelikih izobličenja kao što se može vidjeti na Slici 5. Kod stjenovitih masa odvajaju se pojedinačni blokovi po plohama diskontinuiteta. Takve plohe mogu biti slojne ili pukotinske, a materijal koji ih ispunjava je manje čvrstoće. Za razliku od stijenskih, u koherentnim tlima javljaju se samo plošna klizanja ako su diskontinuiteti propusnog materijala, stoga se translacijska klizanja većinom javljaju u raspucanoj prekonsolidiranoj glini [2].



Slika 5. Translacijsko klizanje [16]

2.2.4. Tečenje

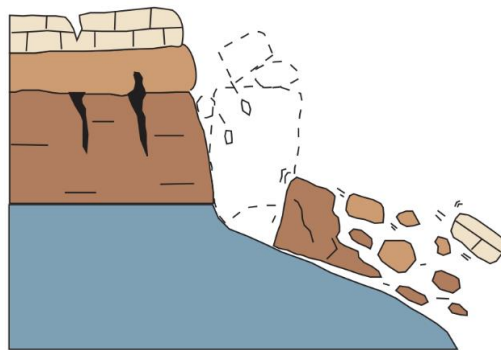
Tečenje je kretanje mase niz kosinu gdje se brzina i pomak u masi mogu poistovjetiti sa onima u viskoznoj tekućini. Najčešće su izazvani intenzivnim površinskim tokom vode, jakim padalinama ili naglim otapanjem snijega. Ono podrazumijeva tečenje tla različitim brzinama, granulometrijskog sastava uz sadržaj vode, što je prikazano na Slici 6. Neformalno se nazivaju i “blatnim klizištima” zbog velike količine sitnih materijala koji može biti prisutan u protoku. Može započeti kao klizanje, odron ili prevrtanje na strmim kosinama, a zatim se javlja nagli gubitak kohezije u pokrenutom materijalu. Pojava tečenja može se javiti u potpuno suhom nekoherentnom materijalu, ali i u prezasićenom vlažnom tlu. Klizanje je relativno plitko ali je domet dug, ponekad se može protezati i kilometrima na strmom terenu. Sedimenti i blato završavaju u podnožju kosina, te stvaraju lepezaste, trokutaste naslage koje također mogu biti nestabilne [2,3,16].



Slika 6. Tečenje izazvano utjecajem oborina [16]

2.2.5. Prevrtnanje

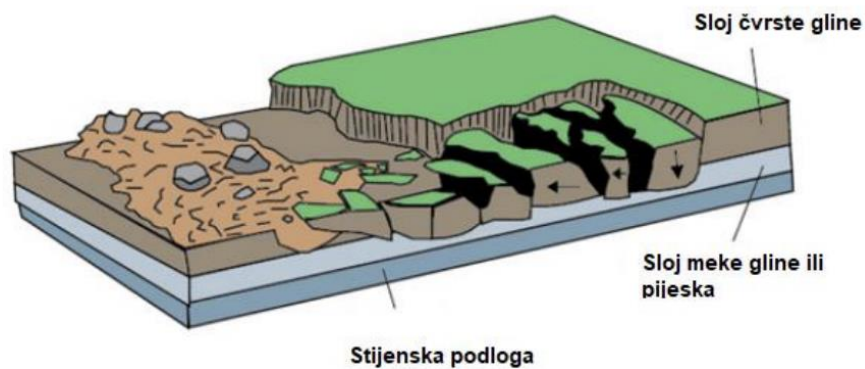
Kao što se može naslutiti iz samog imena prevrtanje je vrsta odrona gdje se stijene, zemlja ili tlo odvajaju odnosno prevrću niz kosinu oko točke ili osi ispod centra gravitacije pomaknute mase što je prikazano na Slici 7. Prevrtnanje može biti izazvano klizanjem ili odronjavanjem, a uzrok je prisutnost leda ili vode u pukotinama mase, te vibracije ili erozija. Javlja se u stijenskim, grubim ili u zemljastim sitnozrnastim materijalima. Česta su pojava u vulkanskim područjima, te uz obala rijeka i potoka gdje su obale strme [16]. Uvjet za prevrtanje je postojanje diskontinuiteta u stijenskoj masi čija orijentacija pogoduje prisutnosti vlačnih pukotina koje se šire prema svom vrhu i mehanizmu rotacije blokova stijenske mase oko baze.



Slika 7. Shematski prikaz prevrtanja [16]

2.2.6. Širenje tla

Širenje tla javlja se obično u vrlo blagim kosinama ili gotovo ravnim terenima, pogotovo gdje se jači sloj tla ili stijene kreće iznad mekšeg, slabijeg sloja što je prikazano na Slici 8. Takvi uvjeti često izazivaju urušavanje u slabiji, podložni sloj. Kod širenja u stijeni čvrsti temeljni sloj se širi te puca, udaljava se od stabilnog tla i kreće preko mekšeg sloja bez da se nužno oblikuje prepoznatljiva površina loma. Gornji stabilan sloj prati i plastične deformacije koje se javljaju. Ukoliko je slabiji sloj deblji nadjačani puknuti blokovi mogu se urušiti u njega, rotirati, raspadati se ili čak teći. Ova vrsta klizišta javlja se najčešće u tlima koja su podložna tečenju, te gdje postoje seizmičke aktivnosti [16].



Slika 8. Shematski prikaz širenja tla [7,16]

2.3. Čimbenici koji utječu na pojavu klizišta

Kada se govori o istraživanju klizišta jedan od bitnih elemenata istraživanja je definiranje čimbenika koji utječu na pojavu klizišta i samih uzroka (inicijatora) klizanja. Inicijatori klizanja djeluju na već postojeće uvjete koji uzrokuju klizanje, te kosinu dovode u granično nestabilno stanje.

Glavni čimbenici koji doprinose pojavi klizišta mogu se podijeliti u nekoliko osnovnih kategorija [5]:

- Geološki čimbenici
 - Vrste stijena i tla - klizišta se češće javljaju u vrstama tla koja su manje stabilna kao npr. glina, škriljevac ili labavi sediment.
 - Strukturalne karakteristike tla: Prisutnost različitih geoloških materijala i strukturnih diskontinuiteta poput pukotina može doprinijeti nestabilnosti kosine.
- Topografski čimbenici
 - Nagibi i visine kosine: Strmiije i više kosine imaju veću mogućnost rizika klizanja zbog gravitacijskih sila koje djeluju na veću masu tla ili stijena.
 - Oblik kosine: Konveksne kosine su općenito stabilnije za razliku od konkavnih koje mogu zadržavati vodu i tako povećati rizik od klizanja.
- Klimatski čimbenici:
 - Padaline i temperature: Obilne padaline kao i ekstremne temperaturne promjene koje podrazumijevaju smrzavanje i odmrzavanje mogu oslabiti tlo te potaknuti klizanje.
- Hidraulički čimbenici:
 - Površinsko otjecanje i podzemne vode: Povećanje razine podzemne vode izaziva i veći porni tlak, a kao posljedica toga javlja se smanjenje efektivne napetosti u tlu. Nepravilno rukovanje površinskim vodama može uzrokovati eroziju i povećati mogućnost destabilizacije kosine.
- Seizmički čimbenici:
 - Potresi odnosno seizmička aktivnost uzrokuje vibracije koje smanjuju trenje i koheziju unutar tla ili stijene, što također izaziva klizanje.
- Antropogeni čimbenici:
 - Deforestacija i građevinski radovi: Aktivnosti kao što su iskopi, krčenje šuma ili gradnja infrastrukture narušavaju stabilnost kosine, te uzrokuju promjene u prirodnoj ravnoteži tla.

Najčešći pokretači među ovim čimbenicima su potresi i oborine.

3. MJERE SANACIJE KLIZIŠTA

Cilj mjera sanacije i stabilizacije klizišta je osigurati trajnu stabilnost kosina u trenutnim i razumno predvidivim uvjetima. Odabir odgovarajuće sanacijske mjere ovisi o tipu klizišta, značajkama, uzrocima pokretanja i dimenzijama klizišta. Svako klizište može se sanirati različitim pristupima ili njihovim kombinacijama. Najučinkovitija sanacijska mjera temelji se na dobrom poznavanju uvjeta u kosini, što se postiže raznim geotehničkim istraživanjima i iskustvu inženjera odgovornog za projekt sanacije.

Pod terminom trajna stabilnost podrazumijeva se prestanak pomicanja klizišta ili smanjenje puzanja na minimalnu razinu nakon provođenja sanacijskih mjera. Trajna stabilnost mora se održati u budućim uvjetima u kosini, što podrazumijeva promjenu razine podzemne vode uzrokovane ekstremnim padalinama ili topljenjem snijega.

Mjere sanacije temelje se na dva osnovna principa, smanjenje aktivnih sila koje uzrokuju klizište i povećanje čvrstoće tla ili stijenske mase. Aktivne sile mogu se smanjiti uklanjanjem odgovarajućeg dijela nestabilne kosine i drenažom podzemnih i površinskih voda kako bi se smanjio porni tlak koji djeluje u nestabilnoj zoni. Dreniranjem podzemnih i površinskih voda uklanjanju se razmekšane naslage tla ili drugi potencijali sloma, dok se konstrukcijama ili potpornim zidovima i provođenjem in situ ojačanja tla i stijenske mase postiže posmična čvrstoća u kosini. Terzaghi je istaknuo da ukoliko je kosina pokrenuta mjere zaustavljanja pomaka moraju biti prilagođene procesu uzroka klizanja. Klizišta se razlikuju po tipu i veličini, a ovise o lokalnim geološkim i drugim uvjetima, stoga uspjeh svake sanacijske mjere ovisi o točnom prepoznavanju uvjeta tla i podzemne vode na terenu i njihovoj primjeni u projektu sanacije. Mjere sanacije podijeljene su u 4 osnovne praktične grupe nabrojane u nastavku [6,17].

3.1. Modifikacija geometrije kosine

Uklanjanje materijala iz nestabilnog dijela kosine, s mogućnosti zamjene lakšim materijalom, što je prikazano na Slici 9. i opisano je sljedećim djelovanjima:

F_A – aktivne sile

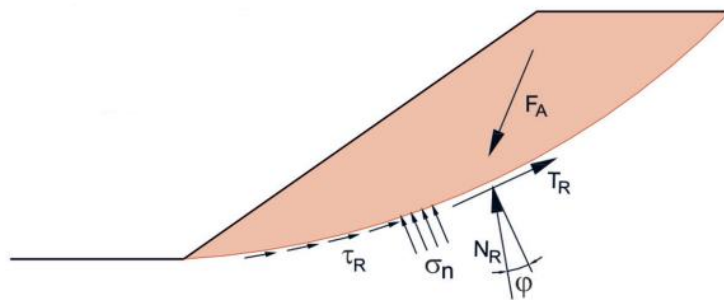
T_R – posmična sila otpora

N_R – normalna sila otpora

φ – kut unutarnjeg trenja materijala

σ_n – normalno naprezanje otpora

τ_n – posmično naprezanje otpora [17]



Slika 9. Prikaz slika koje djeluju unutar klizišta [17]

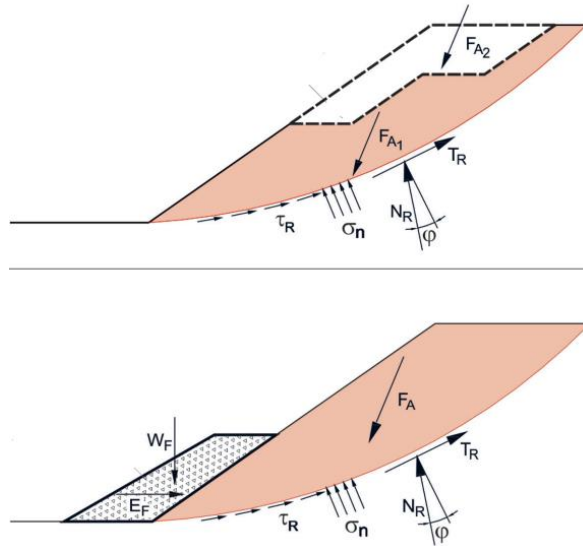
Dodavanje materijala u stabilni dio kosine kako bi se povećala stabilnost, prikazano je na Slici 10. i definirano je sljedećim djelovanjima [17]:

F_{A1} - smanjena aktivna sila nakon uklanjanja materijala

F_{A2} - nova aktivna sila nakon dodavanja materijala

W_F - Težina protuutega

E_F - Dodatna aktivna sila protuutega

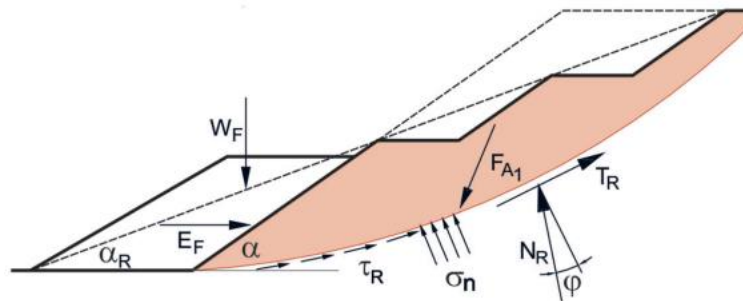


Slika 10. Dodavanje materijala [17]

Smanjenje općeg nagiba kosine preoblikovanjem terena, prikazano je na Slici 11. i dano sljedećim vrijednostima i djelovanjima na kosini [17]:

α - Osnovni opći nagib kosine

α_R - Smanjeni opći nagib kosine



Slika 11. Smanjenje općeg nagiba kosine [17]

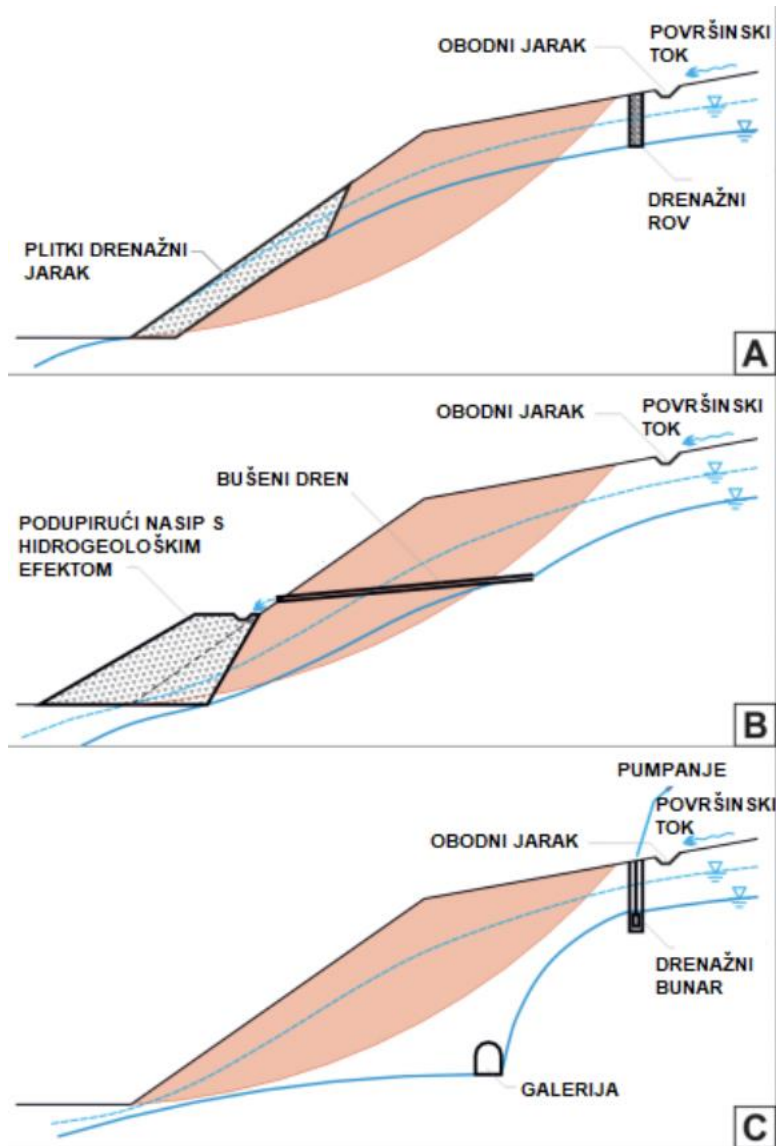
3.2. Dreniranje

Primarna svrha dreniranja je smanjenje porednih tlakova i eliminiranje unutarnje i površinske erozije. Dreniranje se provodi kao dio sanacije gotovo svih kosina u kojima se javilo klizanje, koristeći se jednom ili kombinacijom metoda koje su prikazane na Slici 12. [2,6,17]:

(A)- Površinsko dreniranje kojim se voda koja otječe klizištem odvodi putem kanala ili drenažnih jaraka.

(B) Izgradnja dubokih ili plitkih drenažnih jaraka ispunjenih krupnozrnastim materijalom ili geotekstilom, te konstrukcija podupirućih nasipa od krupnozrnastoga materijala s hidrogeološkim efektom.

(C) Kombinacija površinske drenaže putem obodnog jarka i unutarnje drenaže kroz drenažni bunar i galeriju.



Slika 12. Metode dreniranja kosine, modificirano prema [17]

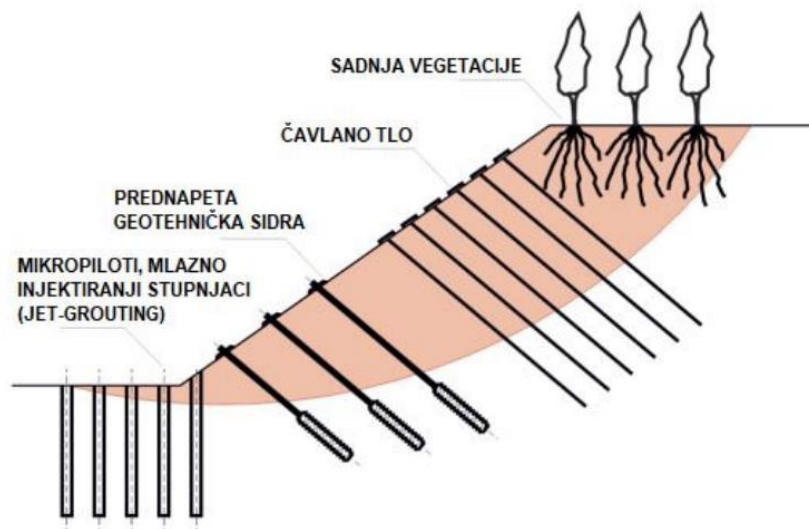
3.3. Potporne konstrukcije

Potporne konstrukcije izvode se kako bi kombinirajući vlastitu težinu sa reaktivnim otporom materijala u zasipu povećale sile otpora unutar kosine. Neki od primjera potpornih konstrukcija koje se koriste u svrhu sanacije klizišta uključuju gravitacijske, montažne i gabionske potporne zidove, pasivne pilote, bunare i armiranobetonske potporne zidove izvedene in-situ. Za razliku od gravitacijskih, armiranobetonski zidovi pružaju otpor prevrtanju uz manje materijala, dok montažni i gabionski zidovi omogućuju brzu instalaciju i trenutno opterećenje. Svi zidovi se podupiru propusnim nasipnim materijalom i geotekstilom kako nebi došlo do miješanja materijala te kako bi se održala propusnost. Za betonske zidove potrebno je primijeniti drenažne cijevi kako bi se smanjila podzemna voda iza zida pa tako i opterećenje. Potporni zidovi izvode se duž nožice klizišta, s temeljem ispod razine klizne plohe što ih čini prihvatljivima za manja klizišta. Prethodno navedene metode koriste se ponajviše za sanacije klizišta u tlu, dok se za rješavanje nestabilnosti u stijenskoj masi koriste neke od tehnika spomenutih u poglavljima 3.4. i 3.5. i prikazanih na Slici 14. Mjere stabilizacije stijenske mase uključuju stabilizaciju kosina kroz uporabu stijenskih sidara, mreža za zaštitu od odrona, zaštitnih armiranobetonskih blokova (jastuka), mlaznog betona radi sprječavanja erozije i sustava za prihvaćanje odronjenih blokova (barijera) [2,6,17].

3.4. Unutarnje ojačanje kosine

Metode unutarnjeg ojačanja kosine uključuju unošenje raznih materijala u kosinu kako bi se povećala otpornost na klizanje. Ove metode se često koriste kombinirano s drugim tehnikama sanacije poput promjene geometrije kosine, dreniranja i izgradnje potpornih konstrukcija. Razlikujemo nekolicinu metoda unutarnjih ojačanja kosine od kojih su neke: štapna sidra, mikropiloti, čavljano tlo, geotehnička sidra, injektiranje, zamrzavanje i sadnja vegetacije, te su neki od njih prikazani na Slici 13. Najbolji rezultati u sanaciji klizišta postižu

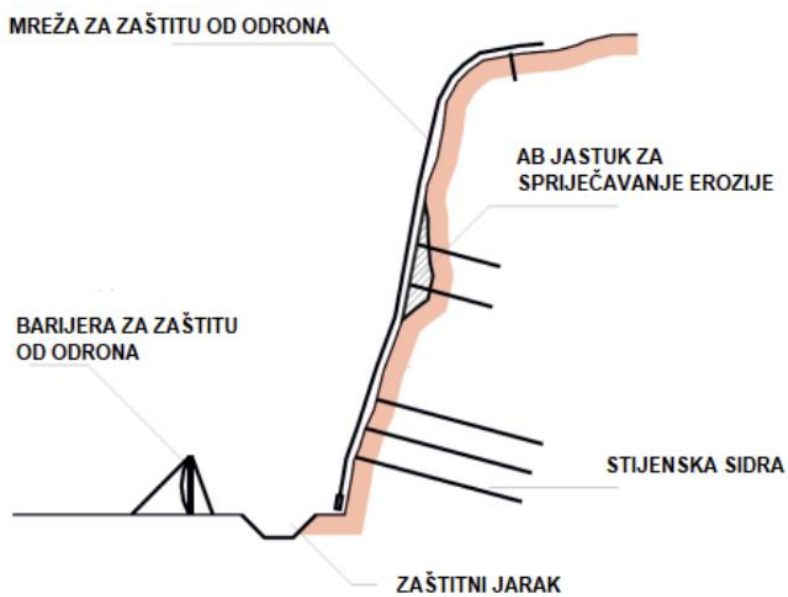
se kombinacijom različitih sanacijskih mjera koje osiguravaju maksimalnu stabilizaciju kosine uz primjenu najjednostavnijih i što je manje moguće zahtjevnih metoda sanacija [2,6,17].



Slika 13. Neke od metoda unutrašnjeg ojačanja kosine, modificirano prema[17]

3.5. Mjere zaštite od odrona

Različite vrste potpornih struktura koriste se za stabilizaciju ili smanjenje učinka klizišta na stijenskim kosinama. Najčešće se primjenjuju dva pristupa projektiranju : sprječavanje odrona uklanjanjem potencijalno nestabilne stjenovite mase, instalacijom sustava potpore za stjenovitu masu i zaustavljanjem mase koja se odronjava sustavima za ublažavanje ili zaustavljanje odrona. Mreže za zadržavanje na stjenovitim kosinama, kao i zaštitni blokovi od kamena ili betona sprječavaju moguće odrona, dok sustavi za zaustavljanje odrona (ograda, zidovi, jarci za hvatanje odrona) zaustavljaju masu koja se odronjava. Na Slici 14. prikazani su armirnobetonski jastuci za sprječavanje erozije, mreža za zaštitu odrona, stijenska sidra, zaštitni jarci te barijere za zaštitu odrona[2,17].



Slika 14. Shema mjera sanacije nestabilnosti u stijenskoj masi, modificirano prema [17]

4. MJERE SANACIJE KLIZIŠTA PRIHVATLJIVE OKOLIŠU

Smanjenje rizika problem je kojim se stručnjaci mogu baviti prije ili nakon što se dogodila katastrofa, kako bi se pripremili za borbu protiv nastale štete, pomogli u obnovi i spriječili nastanak nove. Korištenje prirodnih rješenja jedna je od metoda sprječavanja nastanka klizišta. Kroz očuvanje, poboljšanje i održivo korištenje ekosustava i njihovih usluga pojavila se ideja prirodnih rješenja kao obećavajuća metoda za poboljšanje sociokološke otpornosti, smanjenje učinka klimatskih promjena, zaštitu ekosustava, biološke raznolikosti i unaprjeđenje životnih uvjeta [8]. U nastavku su prikazane mjere stabilizacije koje uključuju korištenje prirodnih obnovljivih resursa i mjera koje su prihvatljivije u zaštiti okoliša.

4.1 Tehnike bioinženjeringa

Vegetacijske geomreže su metoda koja uključuje ugradnju prirodnih ili sintetičkih tkanina u tlo između kojih se postavljaju svježije odrezane grane, obično vrbe. Ova metoda temelji se na izmjeni dva sloja, jedan sloj čini zemljani materijal koji je omotan tkaninom, kako bi se kompaktno položio dok se drugi sastoji od grana koje počnu rasti i razvijati korijenov sustav čime stabiliziraju tlo. Na geomrežu se postavlja kamen radi stabilizacije dok se ne razvije korijen biljke. Ova metoda može se koristiti na vrlo strmim kosinama [9].

Jedna od novijih metoda sanacija klizišta koja je karakteristična za tropske regije, većinom oko zemljine ekvatorijalne linije gdje su karakteristične visoke temperature, visoka vlažnost i obilne padaline, je primjena arbuskularnih mikoriznih gljiva. One formiraju simbiotske odnose s korijenima biljaka, što rezultira poboljšanom strukturom tla. Ova vrsta gljiva doprinosi povećanju stabilnosti tla, i poticanju rasta vegetacije osobito u degradiranim tlima gdje je dostupnost hranjivih tvari smanjena. Mikorizne gljive su složene od tankih, nitnastih struktura poznatih kao hife što omogućava smanjenje erozije tla i povećava otpornost na klizanje [10].

4.2 Geosintetici

Geosintetici su visoko preferirani u projektima koji uključuju ojačanja kako bi se poboljšala konsolidacija u mekim tlima. Geosintetički ojačani zidovi postali su prihvaćeni diljem svijeta, jer se smatraju izvrsnim stabilizatorima tla na kosinama i nasipima. Višestruka istraživanja pokazala su mogućnost proizvodnje održivih geosintetičkih sustava koji uključuju djelomičnu zamjenu ne-biorazgradivog otpada, odnosno već je provedena primjena recikliranog građevinskog otpada u strukturama ojačanim geosinteticima. Istraživana je također mogućnost korištenja otpadnih guma s geosinteticima kao drenažnog sustava. Isto tako, u uporabu se sve više pokušava uvesti vlakna poput kokosa za izradu netkanih geotekstila koji pomažu u sanaciji klizišta. Ti materijali su ekološki prihvatljivi jer dolaze iz obnovljivih izvora te su biorazgradivi [11].

4.3 Ekološki prihvatljiv beton

Ekološki prihvatljivi ili "zeleni" beton predstavlja inovativni pristup u rješavanju učestalih problema klizišta, te njegova primjena postaje sve učestalija. Za razliku od klasičnog betona kojem je portland cement glavni sastojak, što značajno doprinosi proizvodnji CO₂, zeleni beton koristi alternativna veziva poput letećeg pepela koji se smatra manje štetnim za okoliš. Isto tako, umjesto klasičnih agregata-kamena i šljunka mogu se koristiti alternative kao što su betonski otpad, staklo ili gume što pomaže smanjenju stvaranja otpada. Rješavanje problema odbačenog plastičnog otpada jedan je od najvećih izazova u ekologiji, stoga korištenje plastike kao agregata znatno doprinosi očuvanju prirode. Ranije spomenuta kokosova vlakna mogu se koristiti kao pojačivači zelenog betona, jer doprinose otpornosti na pucanje i savijanje. Zeleni beton značajno smanjuje udio stakleničkih plinova, a i sama proizvodnja troši manje prirodnih resursa i energije što doprinosi očuvanju okoliša [12].

4.4 Rješenja temeljena na prirodnim mjerama sanacije

Prirodne mjere sanacija klizišta uključuju metode koje koriste biološke i ekološke pristupe za stabilizaciju tla. Forestacija ili pošumljavanje proces je sadnje drveća na područjima sklonim klizanju tla, jer korijenski sustavi drveća i grmlja doprinose samoj stabilizaciji tla, odnosno povećavaju koheziju i smanjuju mogućnost erozije. Korijeni drveća smanjuju mogućnost pomicanja tla, dok vegetacija smanjuje površinsko otjecanje vode i samim time eroziju. Forestacija ne doprinosi samo smanjenju mogućnosti nastanka klizišta već se i sadnjom lokalnih biljnih vrsta doprinosi očuvanju bioraznolikosti.

Još jedna od ekološki prihvatljivih metoda su postavljanja žičanih mreža, i gabionskih košara, mreže se postavljaju na površinama kosina kako bi zadržale tlo, dok se gabionske košare pune kamenjem i koriste za stabilizaciju podnožja kosina, a vremenom mogu obrasti vegetacijom kako je prikazano na Slici 15. Za punjenje gabionskih košara mogu se koristiti lokalnim kamenjem što smanjuje upotrebu transporta. Ove strukture pružaju trenutnu stabilizaciju te sprječavaju daljnje klizanje, a mogu se koristiti u kombinaciji s vegetacijom kako bi se postigla dodatna stabilnost. Provedba ovih metoda osigurava sanaciju klizišta, ali i povećava mogućnost očuvanja okoliša i bioraznolikost [2].



Slika 15. Gabionski zid ozelenjen vegetacijom [13]

5. ANALIZE STABILNOSTI KOSINA

Jedna od osnovnih ciljeva analize stabilnosti je određivanje faktora sigurnosti koji nam govori dali je pokos u određenom trenutku stabilan ili nije, odnosno koliko je stabilan. Pokos se može smatrati stabilnim ukoliko je faktor sigurnosti veći od jedan. Parametri koji utječu na njegovu vrijednost su visina i nagib pokosa, kohezija, vlastita težina, kut unutarnjeg trenja. Također se mogu pojaviti i dodatni utjecaji (pokretači klizanja) kao što su potresi, voda, eksplozije i dodatna opterećenja [18]. Faktor sigurnosti izražavamo na nekoliko načina [18]:

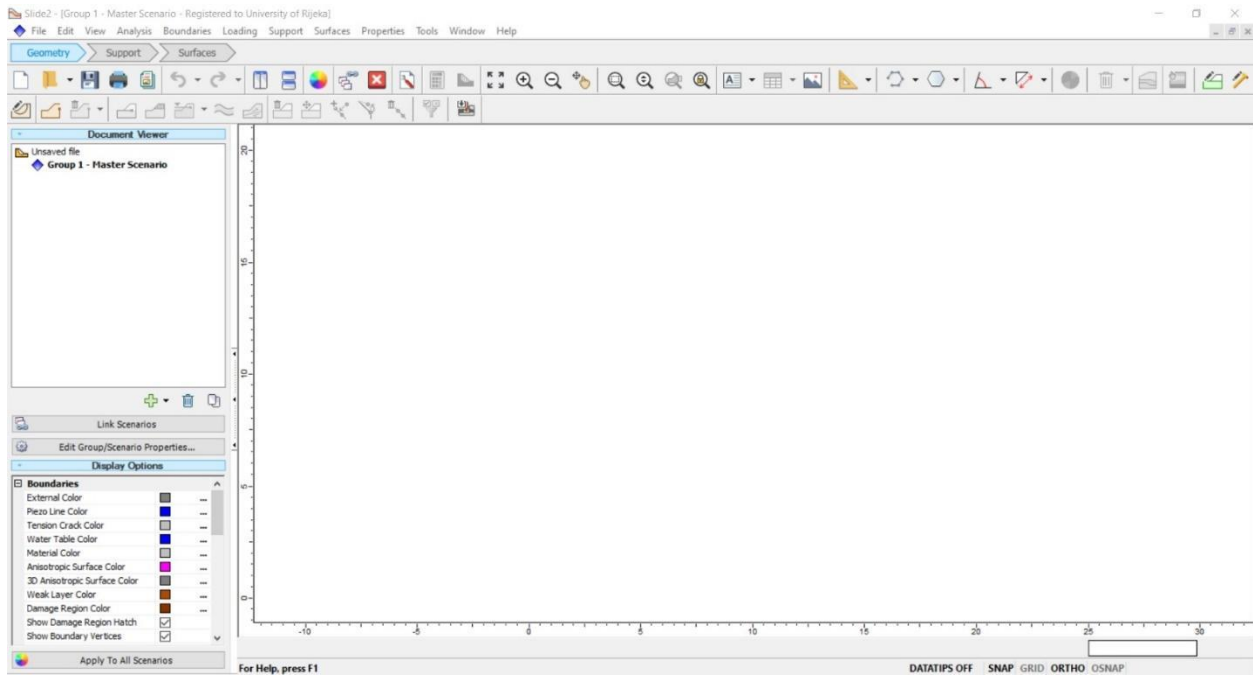
- Odnosom aktivnih sila i sila otpora
- Odnosom naprezanja na plohi sloma i čvrstoće materijala
- Odnosom parametara čvrstoće u kosini i onih potrebnih za održanje stabilnosti kosine
- Odnosom momenata aktivnih sila i momenata otpora

Tijekom godina razvilo se nekoliko metoda granične ravnoteže za analizu stabilnosti kosina. Prvu metodu uveo je Fellenius poznatiju kao Obična ili Švedska metoda za kružnu plohu klizanja ali zanemaruje normalne i tangencijalne sile između lamela. Njegovu je metodu unaprijedio Bishop koji uvodi novi odnos za normalnu silu na bazi, što je dovelo do nelinearne jednadžbe za faktor sigurnosti. Ova metoda uzima u obzir normalne sile između lamela, ali zanemaruje tangencijalne. Istovremeno Janbu razvija pojednostavljenu metodu za analizu ne-kružnih ploha popuštanja, dijeleći potencijalnu kliznu masu na vertikalne lamele, te to postaje prva metoda koja zadovoljava ravnotežu aktivnih sila i momenata. Kasnije su Morgenstern-Price, Spencer i Sarma doprinijeli s različitim pretpostavkama za međulamelarne sile. Kao posljedica proširenja metoda Spencer i Morgenstern-Price, Chugh je razvio metodu granične ravnoteže zadovoljavajući uvjete ravnoteže momenata i aktivnih sila. Sve metode granične ravnoteže temelje se na određenim pretpostavkama za normalne i tangencijalne sile među lamelama, a osnovna razlika između metoda je u načinu na koji se te

sile određuju ili pretpostavljaju. Također, prilikom izračuna faktora sigurnosti potrebno je obratiti pažnju na oblik klizne plohe i uvjete ravnoteže [19].

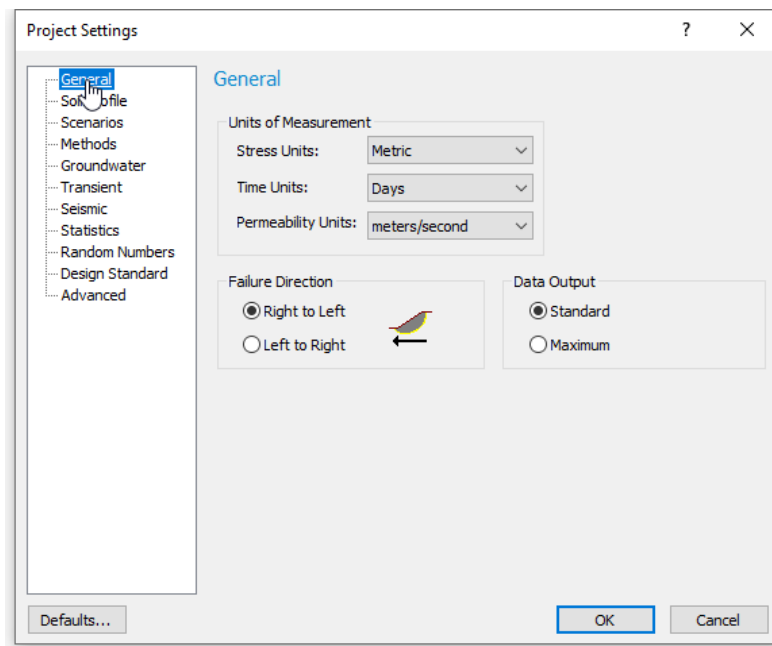
Analize stabilnosti kosina danas se često provode korištenjem različitih računalnih geotehničkih softvera. Neke od najčešće korištenih softvera su SLOPE/W softver (GeoStudio), SLIDE softver (Rocscience) i PLAXIS softver (Bentley).

U ovom radu detaljnije će biti opisan Slide2 softver koji je primijenjen u analizi stabilnosti klizišta u nastavku rada. Ovaj softver razvijen je od strane Rocscience iz Toronta u Kanadi. Radi se o 2D softveru koji je temeljen na metodama koje koriste princip ravnoteže sila kako bi procijenile faktor sigurnosti i stabilnost kosine, kako za kružne tako i ne-kružne površine sloma. Softver nudi nekoliko dodatnih značajki poput analize podzemnih voda [19]. Prilikom ulaska u sučelje Slide2 softver otvara se novi prazan dokument kako je prikazano na Slici 16. Slide2 ima općenito tri osnovna modula ili elementa: modul „Define“, modul „Compute“ i modul „Interpret“. U prvom modulu (sučelje koje se otvara pri pokretanju softvera) definiraju se sve bitne postavke i značajke modela, geometrija kosine, opterećenja, materijali, prisutnost podzemne vode, djelovanja, mjere sanacije, klizna ploha itd., dok drugi i treći modul služe za proračun i u konačnici prikaz rezultata proračuna.



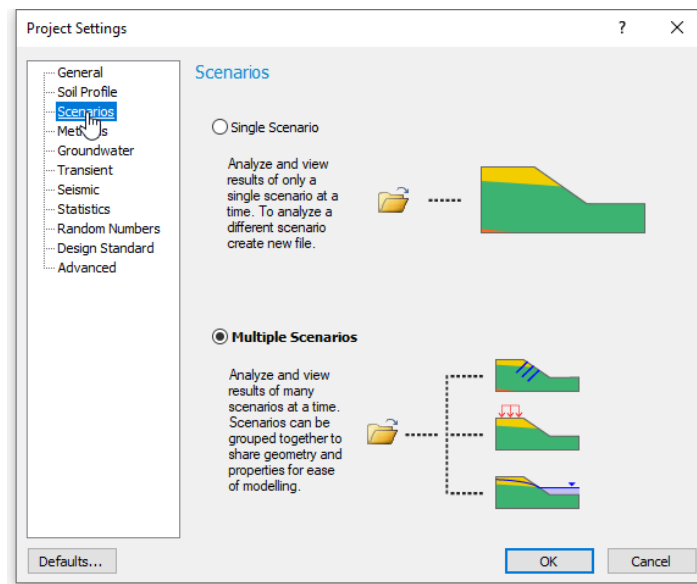
Slika 16. Prikaz sučelja Slide 2 softvera

Na vrhu zaslona nalazi se traka koja omogućava pristup svim značajkama, modulima i alatima programa. Odmah ispod trake izbornika nalaze se kartice koje prikazuju ikone za prečace ili brzi pristup. Neposredno ispod kartica je alatna traka, dok se preglednik dokumenta kao i opcije nalaze na bočnoj lijevoj strani. Ispod prozora za pregled modela, u donjem desnom kutu sučelja imamo naredbeni okvir, ispod kojeg slijede opcije DATATIPS, GRID i SNAP. Glavni parametri koji kontroliraju važne stavke definiraju se u Postavkama projekta, što je prikazano na Slici 17.



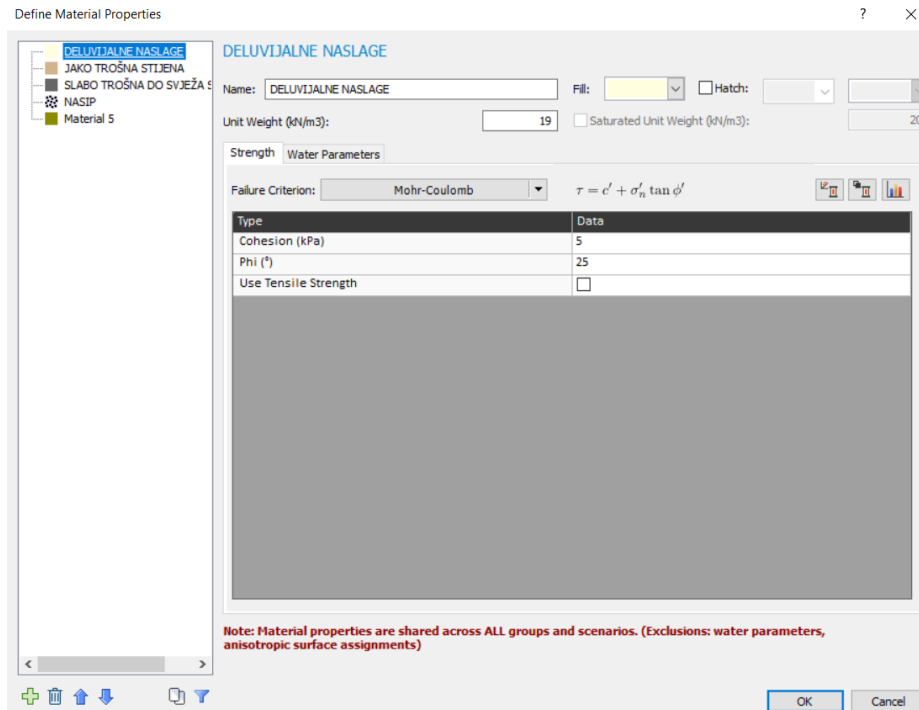
Slika 17. Prikaz prozora postavki glavnih parametara

Parametri koji se definiraju u postavkama projekta diktiraju hoće li model koristiti samo jedan scenarij ili više podmodela, a to su mjerne jedinice, smjer klizanja i ulazni podaci što podrazumijeva podatke o svojstvima tla poput čvrstoće, propusnosti i zbijenosti tla. Također odabiremo metodu proračuna, tip analize podzemnih voda i izbor determinističke ili statističke analize itd. Pod karticom "Scenarios" zadržavamo postavke "Multiple scenarios" koja omogućava analizu nekoliko podmodela koji koriste različite opcije i parametre, kao što su granice kosine, uvjeti podzemnih voda, kut nagiba kosine i metode pretraživanja, što se može vidjeti na Slici 18.



Slika 18. Prikaz postavki pri odabiru korištenja jednog ili više modela

Pod karticama "Methods" možemo odabrati metodu analize klizišta koju želimo koristiti. Prije samog kreiranja modela potrebno mu je dodati naziv, a zatim moramo definirati vanjsku granicu pomoću unosa koordinata. Nakon što je stvorena vanjska granica softver automatski postavlja granice kosine, a prikazuju se s dva trokutasta markera na lijevoj i desnoj strani gornje površine vanjske granice. Sljedeći korak je definirati svojstva materijala kosine, pritiskom dvostrukog klika bilo gdje na materijalu u regiji kosine, koji otvara popis s lijeve strane gdje se unose vrijednosti parametara kao što je prikazano na Slici 19.



Slika 19. Prikaz sučelja za unos karakteristika materijala

Prema zadanim postavkama softver pretpostavlja površine klizanja kao kružne te primjenjuje automatsku metodu pretrage kako bi pronašao kritičnu kliznu površinu. Pritiskom na ikonu "Compute" softver izvršava izračun te možemo pregledati rezultate. Kako bi došli do rezultata potrebno je pritisnuti na ikonu Interpret u alatnoj traci, te će se rezultati otvoriti u novom prozoru. Rezultati uključuju najmanje faktore sigurnosti i kritične površine klizanja izračunate prema odabranoj metodi za analizu klizišta. Ovaj softver omogućava da se uključi vizualni prikaz rezultata modela izravno u generirani izvještaj što poboljšava jasnoću prikaza rezultata [21].

U sklopu analize stabilnosti kosine u ovom završnom radu za proračun će se koristiti softver Slide 2 primjenom Janbuove metode. Janbuova metoda može se razvrstati na pojednostavljenu, generaliziranu i izravnu metodu, a glavne razlike biti će opisane u nastavku.

Janbuova pojednostavljena metoda temelji se na složenoj kliznoj plohi, odnosno nekružnoj, dok se faktor sigurnosti određuje ravnotežom horizontalnih sila. Metoda uzima u obzir normalne sile između lamela, ali zanemaruje posmične sile baš kao i kod Bishopove pojednostavljene metode. Faktor sigurnosti određuje se pomoću jednadžbe :

$$F_s = \frac{\sum(c'l + (N - ul)\tan\phi')\sin\alpha}{\sum W \tan\alpha + \Delta E} \quad (1)$$

gdje je:

$$\sum \Delta E = E_2 - E_1 \quad (2)$$

Gdje je:

F_s – faktor sigurnosti

c' - efektivna kohezija tla

u – tlak porne vode

l - duljina baze presjeka

N - normalna sila na bazi presjeka

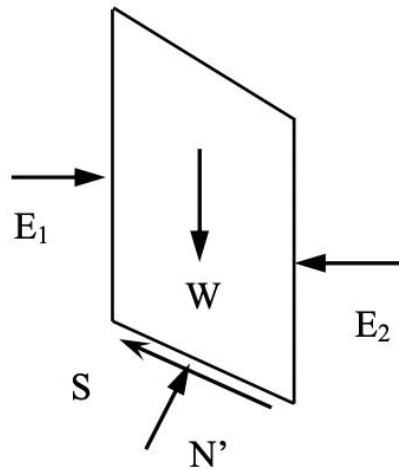
α - nagib klizne plohe u sredini presjeka

ΔE - neto normalne sile između lamela

ϕ' - efektivni kut trenja

W – težina presjeka tla ili stijene

Ova metoda zadovoljava obje ravnoteže sila, dok ravnotežu momenata ne zadovoljava, te uzima u obzir normalne sile između lamela i često se koristi za složene posmične površine. Sile koje se uzimaju u obzir prikazane su na Slici 20.



Slika 20. Sile koje se uzimaju u obzir prilikom Janbu pojednostavljene metode [19]

Janbu uvodi korekcijski faktor kako bi uzeo u obzir učinke posmičnih sila između lamela, te je s time dobio veći faktor kao:

$$F_f = f_0 * F_0 \quad (3)$$

Gdje su:

F_f – korigirani faktor sigurnosti

f_0 – korekcijski faktor

F_0 – izvorni faktor sigurnosti

Korekcijski faktor ovisi o omjeru debljine i duljine klizne plohe. Faktor sigurnosti se ovim korekcijskim faktorom može povećati za 5-12%, pri čemu je donji raspon za tla s trenjem bez kohezije, a viši raspon za glinena tla.

Janbuova generalizirana metoda uzima u obzir obje međuslojne sile i pretpostavlja liniju potiska kako bi odredila odnos za međuslojne sile. Ovo je prva metoda koja zadovoljava ravnotežu sila i momenata. Ravnoteža momenata za ukupnu masu koja klizi eksplicitno je zadovoljena uzimajući u obzir beskonačno malu širinu sloja i momente oko srednje točke baze sloja. Beskonačno mala

širina sloja uvedena je kako bi se izbjegla zabuna oko točke primjene normalne sile baze. Odnos međuslojnih sila jednak je kao što je Janbu ustanovio u pojednostavljenoj metodi, osim smjera posmičnih sila koje se ovdje pretpostavljaju suprotno smjeru kazaljke sata za klizanje koje se događa s lijeva na desno. Ova metoda uzima u obzir obje međuslojne sile, pretpostavlja liniju potiska za međuslojne sile, zadovoljava ravnotežu sila i momenata te rješava složenu geometriju i površine loma.

Janbuova direktna metoda temelji se na bez dimenzijskim parametrima i nizu dijagrama stabilnosti. Ovi dijagrami pružaju mogućnost detaljne provedbe analize stabilnosti kosine, uključujući različite uvjete opterećenja kao što su podzemne vode, opterećenja i pukotine zbog naprezanja. Metoda se može koristiti za analize ukupnih i efektivnih naprezanja. U ovoj metodi potrebno je prvo identificirati središte rotacije za kritični krug u odnosu na nožicu kosine. Središte je točka ravnoteže momenata, funkcija kuta kosine β i bez dimenzijskog faktora $\lambda_c\phi$. Spomenuti faktor može se direktno očitati sa Janbuovih dijagrama stabilnosti. Ova metoda je znatno jednostavnija, a faktor sigurnosti se može izračunati u kratkom vremenu za geometriju kružnog klizanja [19].

6. PRIMJER PROVEDBE ANALIZE STABILNOSTI KLIZIŠTA

Analiza stabilnosti klizišta provedena je u nastavku ovog poglavlja na osnovi podataka preuzetih za lokaciju jednog klizišta koje je godinama ranije sanirano u Istri, u blizini grada Buzeta [20]. Prilikom sanacije i projektiranja potpornog zida koja se temeljila na konceptu odvajanja klizišta od prometnice, naglasak je bio isključivo na stabilnosti potpornog zida kao ključnog dijela osiguranja stabilnosti prometnice, dakle unutar projekta nije provedena analiza stabilnosti kosine na kojoj se nalazi predmetna prometnica. Uvjeti na kosini, preuzeti su iz projekta kako bi se u završnom radu utvrdio faktor stabilnosti prije i nakon sanacije. Iz projekta je evidentirano da je u nožici klizišta prisutno periodično, negativno djelovanje potoka koji izvire u podnožju litice, što je također uzeto u obzir u jednom od scenarija provedene analize. Osim pojave potoka, ostali uzroci nastanka pojave klizišta povezani su s geotehničkim značajkama lokacije koje uključuju geološku gradu terena, morfološke značajke, hidrogeološke odnose i geomehaničke parametre [20].

Na lokaciji klizišta provedeni su geotehnički radovi kako bi se dobile detaljne informacije o geotehničkim odnosima na dijelu ceste zahvaćene klizištem. Rezultati istražnih radova pružili su uvid u uslojenost i geofizičke karakteristike tla, kvalitetu slojeva tla, debljinu pokrivača te mogućnosti postojanja zona diskontinuiteta. Uočeni su slojevi koji se sastoje od površinskog pojasa koji je izgrađen od materijala nasipa gline i kršja, debljine od 0,5 do 2 metra. Ispod njega nalazi se sloj gornjeg pojasa trošenja kojeg karakterizira dobro zbijena glina, i trošno razlomljeni pješčenjak debljine 4 do 8 metara. U dubljim slojevima zabilježena je osnovna stijena. Pokrivač je izgrađen od glina srednje (CI) do visoke (CH) plastičnosti polučvrstog do plastičnog konzistentnog stanja, a može sadržavati i odlomke pješčenjaka i siltita. Rezidualna tla nastaju kao posljedica raspadanja flišne stijenske mase osobito siltita, a u pravilu su to prašinate gline niske (CL) do visoke (CH) plastičnosti. Iz navedenog se može zaključiti da je cesta izgrađena na nasipu male debljine koji se nalazi na prašinasto glinovitom materijalu kojeg karakterizira visoka plastičnost i kruta do polučvrsta konzistencija sivo maslinasto smeđe boje s proslojcima pješčenjaka [20].

Na istraženoj lokaciji temeljem inženjersko geološkog kartiranja i istražnog bušenja, definirane su površinske naslage koje čine pokrivač i osnovna matična stijena koja se smatra podlogom. Nasip je formiran za potrebe izgradnje prometnice, a njegova ukupna debljina iznosi otprilike od 0,5 do 2,5 metara. Nasip je heterogenog sastava, od mješavine sitnozrnastog i krupnozrnastog tla, točnije pijeska sa prahom i šljunkom te gline sa šljunkom. Koluvijalno deluvijalne naslage sastoje se od koluvija aktivnog klizišta i deluvija. Koluvij se sastoji od materijala tla iz nasipa što uključuje sipar i prašinate gline niske do visoke plastičnosti, polučvrste do čvrste konzistencije. Deluvij se sastoji od glina niske do visoke plastičnosti, također polučvrste do čvrste konzistencije. Osnovnu stijenu karakteriziraju flišolike naslage šejlova i silita. Šejlovi i slabo trošan do svježi silitit čine slabo trošnu do svježju matičnu stijenu lapora koji se smatra tvrdim tlom, odnosno mekom stijenom.

Parametri čvrstoće karakteristična četiri sloja materijala u geotehničkom profilu, usvojeni su na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja obližnjih lokacija klizišta i korišteni u proračunskom modelu. Nasip ispod prometnice nema veliki utjecaj na rezultate proračuna, pa je zanemaren.

Nasip:

- zapreminska težina : $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- kut trenja : $\phi = 45^\circ$
- kohezija : $c = 0 \text{ kN/m}^2$

Deluvij:

- zapreminska težina : $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- kut trenja : $\phi = 25^\circ$
- kohezija : $c = 5 \text{ kN/m}^2$

Jako trošna stijena:

- zapreminska težina : $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$
- kut trenja : $\phi = 25$
- kohezija : $c = 8 \text{ kN/m}^2$

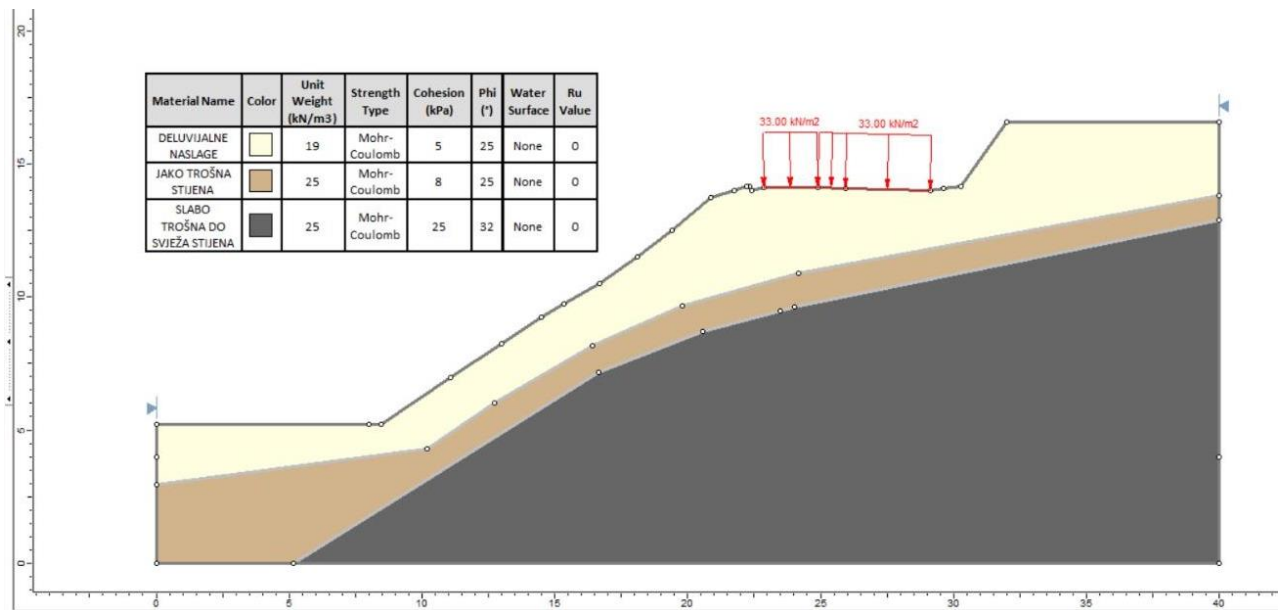
Slabo trošna stijena:

-zapreminska težina : $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

-kut trenja : $\phi = 32$

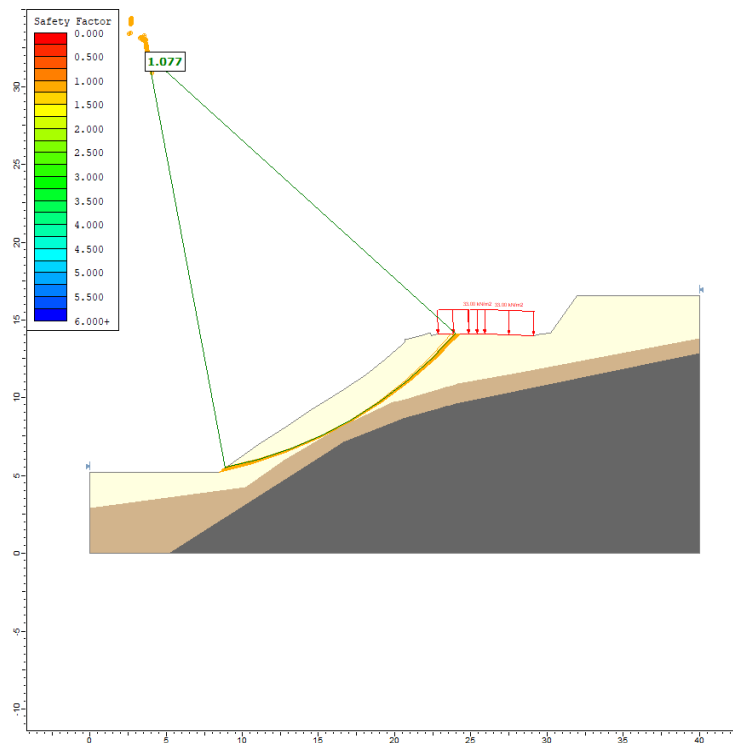
-kohezija : $c = 25 \text{ kN/m}^2$ [20]

Cilj provedenih proračuna bio je analizom stabilnosti u softveru Slide 2 pokazati promjenu vrijednosti faktora sigurnosti u tri različita scenarija: model klizišta prije sanacije u stanju bez dotoka podzemne vode, model klizišta prije sanacije uz prisutnost podzemne vode te model klizišta koji je saniran potpornim zidom. Računalni program Slide 2 nudi mogućnost simulacije utjecaja podzemne vode i prometnog opterećenja na pokos. Korištenjem programa moguće je ugraditi stijenska sidra, potporne zidove i provesti druge metode sanacije što omogućava pronalazak najoptimalnijeg rješenja za stabilnost kosine. Za proračun faktora sigurnosti u ovom završnom radu unutar softvera Rocscience Slide 2 odabrana je Janbu metoda proračuna faktora sigurnosti. Kako je ranije spomenuto, pokos se smatra stabilnim ako je faktor sigurnosti veći od 1. Na promjenu vrijednosti faktora sigurnosti utječu razni čimbenici, u ovom slučaju to su značajke pojedinih slojeva materijala (kut unutarnjeg trenja, kohezija, zapreminska težina tla), ali ključno pojava (prisustvo) podzemne vode i uvođenje mjera stabilizacije (izgradnjom potpornog zida). Na Slici 21. prikazan je model s parametrima sva tri sloja materijala i njihovim značajkama potrebnim za izračun, koji su spomenuti ranije u tekstu.



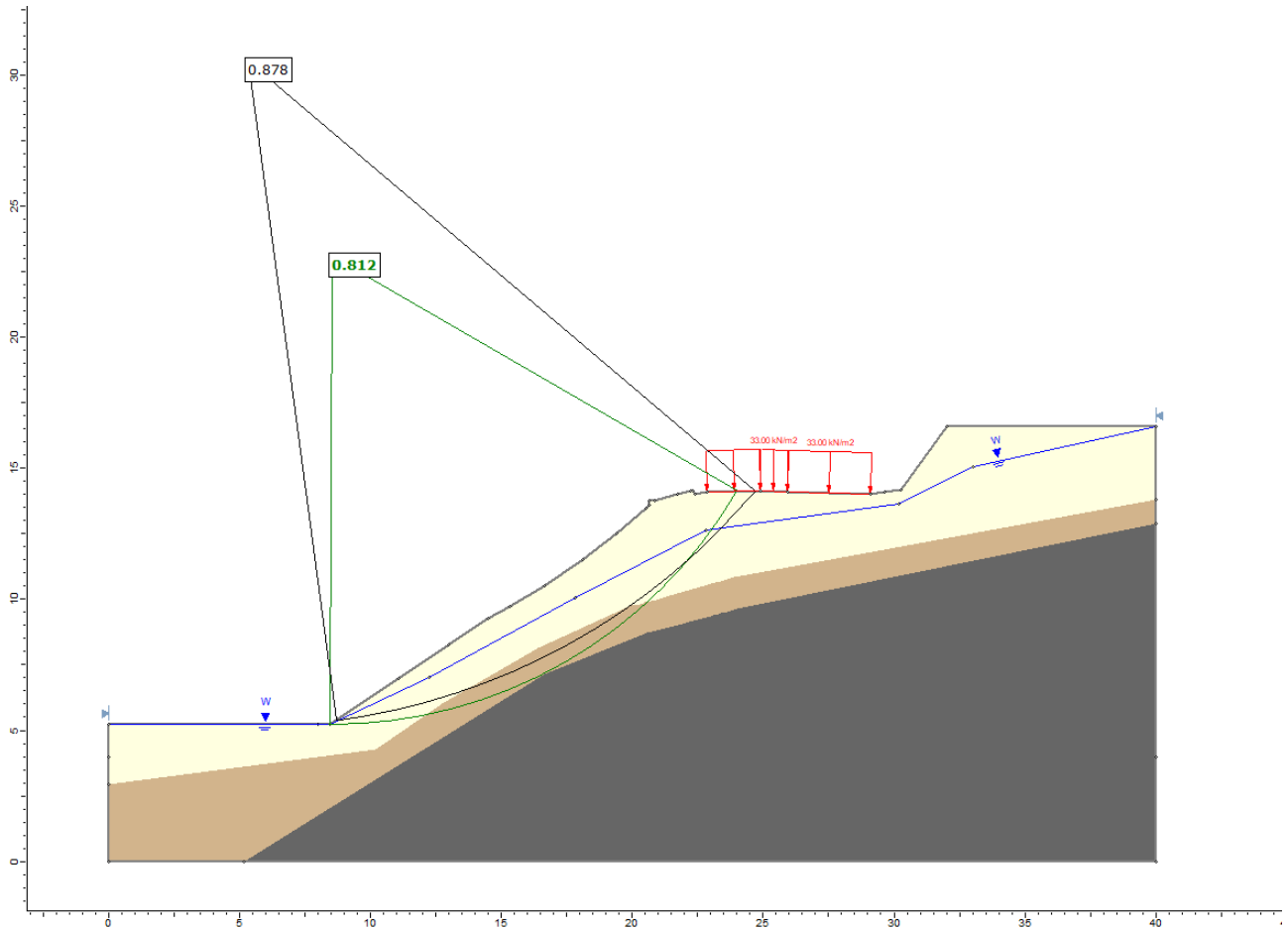
Slika 21. Prikaz tri sloja materijala i njihovih karakteristika

S obzirom da se iznad sloja deluvija nalazi prometnica, u obzir će se uzeti i opterećenje vozila od 33 kPa. Nakon provedene analize prvog scenarija, odnosno modela samog klizišta prije sanacije i u sušnom periodu, dobiven je kritični faktor sigurnosti od 1,077 što je vidljivo na Slici 22.



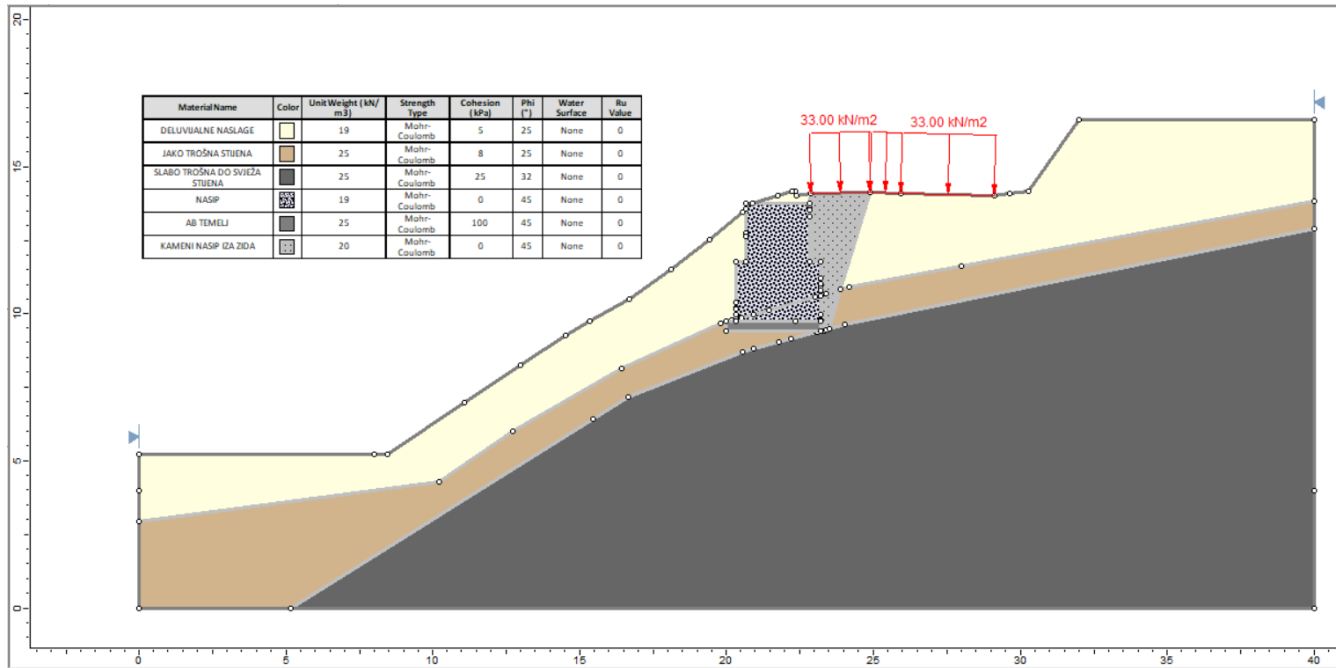
Slika 22. Prikaz kritičnog faktora sigurnosti dobivenog u prvom scenariju

Sljedeći scenarij je analiza stabilnosti kada se u nožici nasipa pojavljuje potok, gdje je potrebno pretpostaviti liniju podzemne vode za proračun. S obzirom da pojava vode utječe na kliznu plohu jedino ako dostigne razinu kritične klizne plohe, odnosno ukoliko je ispod razine kritične klizne plohe nema utjecaja na promjenu faktora sigurnosti, u proračunu je prikazana varijanta u kojoj se podzemna voda diže iznad razine klizne plohe. Nakon što se u softveru doda sloj vode, može se ponoviti proračun i u rezultatima vidjeti njen utjecaj na smanjenje faktora sigurnosti sa 1,077 na 0,878 iz čega se vidi da kosina postaje nestabilna, što je i prikazano na Slici 23.



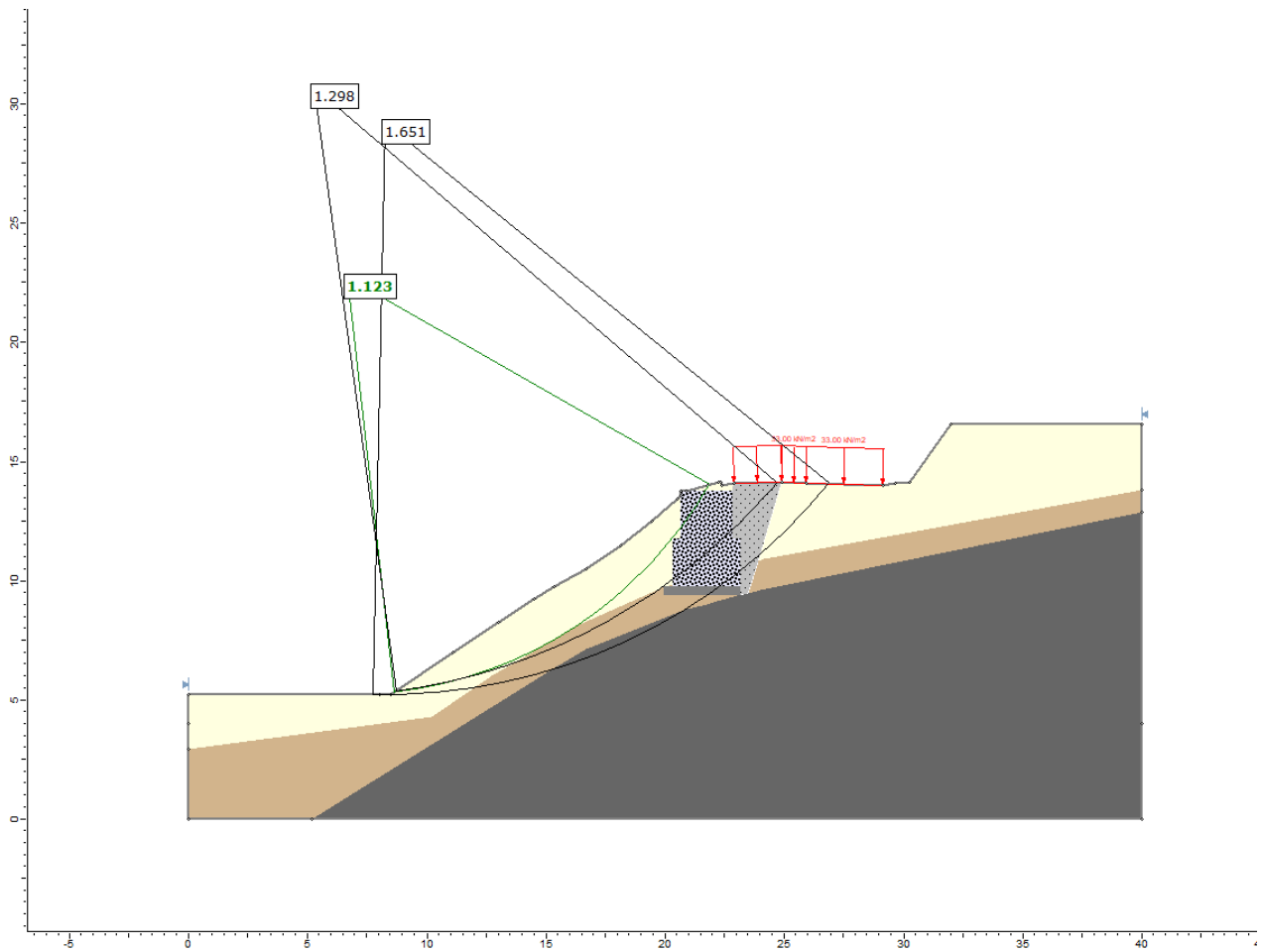
Slika 23. Prikaz faktora sigurnosti pri pojavi vode

Obzirom da se klizišta kojima su faktori sigurnosti manji ili jednaki 1 smatraju nestabilnima, za dano klizište izveden je potporni gabionski zid od kamenog nabačaja kako bi se postigla stabilnost kosine, i povećao faktor sigurnosti. Na Slici 24. prikazane su karakteristike materijala potrebnih za sanaciju, koji predstavljaju treći analizirani scenarij i model proračuna.



Slika 24. Prikaz modela sanacije klizišta gabionskim potpornim zidom

Nakon što se u softveru Slide 2 proveo proračun s gabionskim zidom dobiven je faktor sigurnosti u vrijednosti od 1,651 što je prikazano na Slici 25. te je time zadovoljen faktor sigurnosti i stabilnost kosine.



Slika 25. Prikaz dobivenog faktora sigurnosti nakon ugradnje potpornog zida

7. ZAKLJUČAK

Klizišta se definiraju kao pomaci dijelova tla, krhotina ili stijenske mase niz kosinu, kao posljedica utjecaja antropogenih, prirodnih ili kombinacijom ova dva uzročnika. Prirodni utjecaji odnose se na opterećenja na kosini, dugotrajne ili intenzivne padine, erozijsko djelovanje vode te vibracije od potresa. Značajan dio uzročnika klizišta koji nije izazvan prirodno su sječa šuma, potkopavanje kosine, pretjerano navodnjavanje te izgradnje infrastrukture i urbanizacija. Klizišta predstavljaju geotehnički problem koji može biti popraćen brojnim posljedicama koje utječu na ljudske aktivnosti, infrastrukturu i okoliš, a može prouzročiti značajne gubitke. Kada se govori o posljedicama na okoliš uništavaju se brojna prirodna staništa, a samim time dovodi i do smanjenja bioraznolikosti. Klizanje tla pronosi sedimente tla koji se mogu naći u vodama, što utječe na kvalitetu vode i životinjski svijet koji se u njoj nalazi. Veliki problem klizišta ostavljaju i na građevinske objekte poput oštećenja na prometnicama, mostovima, zgradama i drugim infrastrukturnim objektima, što za sobom donosi visoke troškove sanacije i obnove. Najveći problem koji klizišta mogu ostaviti za sobom, što je ujedno i jedan od najvažnijih razloga predviđanja i sanacije klizišta su opasnosti za ljudske živote osobito u gusto naseljenim područjima.

Voda igra glavnu ulogu na stabilnost i razvoj klizišta. Kada voda prodire u tlo može povećati porni tlak, a samim time smanjiti koheziju i trenje među česticama tla. Voda može isprati čestice koje doprinose kohezijskim svojstvima, a kada se kohezija smanji smanjuje se i otpornost tla na pomak. Voda također ima i razornu moć, svojim površinskim tokovima dovodi do erozije te može ukloniti sloj stabilizacijskog materijala, dok infiltracija vode u tlo može dovesti do erozije unutar tla što izaziva visoki rizik od klizanja. Voda je podložna vremenskim promjenama odnosno smrzavanju i odmrzavanju što mijenja strukturu tla, a tlo koje je zasićeno vodom može promijeniti mehanička svojstva odnosno gustoću i kompaktnost te stvoriti opasnost od klizanja.

Ovim završnim radom prikazano je da je korištenjem softvera Rocscience Slide 2 moguće provesti proračune stabilnosti za kosine odnosno klizišta. Demonstriran je značajan utjecaj

vode kao bitnog faktora za nestabilnost kosine i utjecaj mjera sanacije na poboljšanje uvjeta na kosini i na njenu stabilizaciju. Proračunom je prikazano kako se faktor sigurnosti mijenja uslijed različitih utjecaja. Može se zaključiti kako pojava vode ukoliko se javlja u nožici ne mijenja vrijednost faktora sigurnosti, dok ukoliko se javlja na razini kritične klizne plohe smanjuje vrijednost faktora sigurnosti i utječe na stabilnost kosine. S obzirom da su dobiveni faktori sigurnosti bili na granici stabilnosti, odnosno oko vrijednosti broja 1 bilo je potrebno pronaći adekvatno rješenje kako bi se povećala stabilnost kosine. Odabrano rješenje obuhvaća izvedbu gabionskog potpornog zida od kamenog nabačaja. Provedenim proračunom nakon ugradnje gabionskog zida dobiven je faktor sigurnosti od 1,651 te se kosina smatra stabilnom.

LITERATURA

[1] Xingmin, M., Landslide, Britannica,

<https://www.britannica.com/science/landslide>

pristup 07.03.2024

[2] Nonveiller, E., Mehanika tla i temeljenje gradevina, 1979., Zagreb

[3] Arbanas, Ž., Tipovi i procesi nastanka nestabilnosti u kosinama, skripta, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2015.

[4] Robertson, P.K., Cabal, K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, 2014.

[5] Popescu, M.E. , Landslide causal factors and landslide remedial options. Illinois Institute of Technology, Chicago, USA, 2002.

[6] Arbanas, Ž., Sanacija klizišta, skripta, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2015.

[7] Trbović, N., Trodimenzionalna analiza klizišta Špičunak, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2022.

[8] Rika Kurnia Dewi and Pipit Wijayanti 2023 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. Nature-Based solutions for landslide risk reduction (str.17)

pristup 22.05.2024.

[9] Primjena Ménardovog presiometra za procjenu $G-\gamma$ krivulje, Čolja D. i Kavur B., 2017. (str 79)

pristup 22.05.2024.

[10] Global Journal of Environmental Science and Management, Root growth and arbuscular mycorrhizal fungi on woody plants for vegetative stabilization of tropical slopes, I.G. Tejakusuma , E.H .Sittadewi, T. Handayani, T. Hernaningsih, W. Wisyanto, A. Rifai. 2023. (str. 20)

pristup 23.05.2024.

[11] AGRU America | Geosynthetics, Pipes, and Concrete Protection

<https://agruamerica.com/conserving-vital-resources-and-the-environment-with-geosynthetics/>

pristup 23.05.2024.

[12] University College of Estate Management: UCEM

<https://www.ucem.ac.uk/whats-happening/articles/concrete-alternatives/>

pristup 23.05.2024.

[13] Shandong Xingying Environmental Energy Technology Co. LTD - katalog

<https://www.hexwiremesh.com/hexwiremesh/green-gabion-basket.html>

pristup 04.09.2024.

[14] Katalog žičanih materijala, Integra Idea Group (str. 12)

<http://www.integraideagroup.rs/pdf/celicni%20zicani%20materijali.pdf>

pristup 23.05.2024.

[15] Đomlija P. (2019): Klizišta (nastavni materijal iz kolegija Primijenjena geologija), Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet

[16] Highland, L., Bobrowsky, P.T. (2008), The landslide handbook - A guide to understanding landslides, U.S. Geological Survey, Reston, 2008.

- [17] Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž., Landslides: A Guide to Researching Landslide Phenomena and Processes, IGI Global, USA, 2015., pp. 474–510
- [18] Pariseau, W. G., 2007: Solution Manual to Design Analysis in Rock Mechanics, Taylor & Francis, Leiden.
- [19] Prasad Aryal K., Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods, 2006.
- [20] Arbanas Ž., Glavni građevinski projekt potpornog zida na državnoj cesti D201, dionica Buzet-GP Požane, Rijeka, prosinac 2015.
- [21] Quick Start Tutorial Rocscience,
<https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/quick-start-tutorial> pristup 07.07.2024.