

# Zaštita stijenskog pokosa ulaznog predusjeka tunela

---

**Papež, Andrija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*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:157:412859>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-25**



*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**

**Andrija Papež**

**ZAŠTITA STIJENSKOG POKOSA ULAZNOG PREDUSJEKA TUNELA**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij  
Podzemne građevine i tuneli**

**Andrija Papež  
JMBAG: 0114029718**

**ZAŠTITA STIJENSKOG POKOSA ULAZNOG PREDUSJEKA TUNELA**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2023.**

## IZJAVA

Diplomski rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentoricom i komentorom 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.



---

Andrija Papež

U Rijeci, 28.08.2023.

## ZAHVALA

*Prije svega, želim se zahvaliti svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Sanji Dugonjić Jovančević i komentoru doc. dr. sc. Josipu Peraniću na uputama, savjetima i pomoći prilikom pisanja rada.*

*Posebno hvala mojoj obitelji, a naročito mojoj majci bez koje ovo ne bi bilo moguće.*

*Također, hvala i svima onima koji su mi na bilo koji način i u bilo kojoj mjeri bili od pomoći tijekom školovanja.*

## **SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu pojasniti će se problemi nestabilnost i nastanka sloma u stijenskoj masi, koji uključuju ravninski, klinasti, kružni i slom prevrtanjem. Kako bi se nestabilnosti mogle analizirati, potrebno je poznavati vrste i načine stabilizacije, kao i metode analize stabilnosti kojima se odabiru adekvatne mjere sanacije. Predstavljene su vrste monitoringa stijenskih pokosa koje obuhvaćaju daljinska opažanja ili satelitske snimke, fotogrametrijske, geodetske i geofizičke ili fizičke tehnike. Nadalje, definirani su mogući načini stabilizacije i zaštite stijenskih pokosa. U tu svrhu, predstavljene su i objašnjene mjere zaštite kao što su prihvatni jarci, zaštitne konstrukcije, mreže, barijere, galerije, te ostale metode zaštite. Nakon teorijskog dijela, predstavljen je projektni zadatak koji obuhvaća projekt zaštite stijenskog pokosa ulaznog predusjeka tunela Riječke obilaznice u sklopu južne cijevi tunela Trsat. Projektni zadatak je rađen prema stvarnim dobivenim projektnim podacima i situaciji na terenu. U tu svrhu, izrađeni su modeli korištenjem računalnog programa Rocscience, Slide2. Izrađeno je ukupno šest računalnih modela kojima je analizirana stabilnost padine i u konačnici je predstavljeno najbolje rješenje prema kojemu su projektirani grafički prilozi.

## **KLJUČNE RIJEČI**

Zaštita pokosa, stijenska masa, tuneli, monitoring, mjere stabilizacije, podgradni sustavi

## **ABSTRACT**

In this master thesis, the problem of instability and the rock mass failure mechanisms including planar, wedge, circular, and overturning failure are presented. In order to be able to analyze instabilities, it is necessary to know the types and methods of stabilization, as well as methods of stability analysis, which are used to select adequate stabilization measures. Types of rock slope monitoring, which include remote observations or satellite images, photogrammetric, geodetic and geophysical or physical techniques are presented. Furthermore, possible types of rock slope stabilizing and protection measures are defined. For this purpose, protection measures such as receiving ditches, protective constructions, nets, barriers, galleries, and other methods are presented and explained. After the theoretical part, the project of rock slope protection as a part of entrance section of the Rijeka bypass tunnel, i.e. the southern pipe of the Trsat tunnel. The project assignment was made according to the actual obtained project data and the on site situation. For this purpose, models were created using the computer program Rocscience, Slide2. A total of six computer models were created to analyze the rock slope stability and in the end, the best solution was presented, according to which the graphic attachments were designed.

## **KEYWORDS**

Slope protection, rock mass, tunnels, monitoring, stabilization measures, protection systems

## Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| <b>1. UVOD</b> .....   | 1  |
| <b>2. STABILNOST STIJENSKIH POKOSA</b> .....                       | 3  |
| <b>2.1. Mehanizmi sloma</b> .....                                  | 6  |
| 2.1.1. <i>Ravninski slom</i> .....                                 | 8  |
| 2.1.2. <i>Klinasti slom</i> .....                                  | 12 |
| 2.1.3. <i>Kružni slom</i> .....                                    | 15 |
| 2.1.4. <i>Slom prevrtanjem</i> .....                               | 17 |
| <b>3. PROJEKTIRANJE U STIJENSKOJ MASI</b> .....                    | 20 |
| <b>3.1. Metodologija monitoringa stabilnosti pokosa</b> .....      | 22 |
| 3.1.1. <i>Daljinska opažanja ili satelitske snimke</i> .....       | 23 |
| 3.1.2. <i>Fotogrametrijske tehnike</i> .....                       | 24 |
| 3.1.3. <i>Geodetske tehnike</i> .....                              | 25 |
| 3.1.4. <i>Geotehničke ili fizičke tehnike</i> .....                | 28 |
| <b>3.2. Analize stabilnosti pokosa</b> .....                       | 32 |
| <b>3.3. Metoda opažanja</b> .....                                  | 33 |
| <b>3.4. Projekt stabilizacijskih mjera</b> .....                   | 34 |
| <b>4. STABILIZACIJA I ZAŠTITA STIJENSKOG POKOSA</b> .....          | 37 |
| <b>4.1. Stabilizacija ojačanjem stijene</b> .....                  | 38 |
| <b>4.2. Stabilizacija uklanjanjem nestabilnih zona</b> .....       | 43 |
| <b>4.3. Mjere zaštite od nestabilnosti stijenskih pokosa</b> ..... | 45 |
| 4.3.1. <i>Prihvatni jarci</i> .....                                | 46 |
| 4.3.2. <i>Zaštitne konstrukcije</i> .....                          | 47 |
| 4.3.3. <i>Zaštitne mreže</i> .....                                 | 50 |
| 4.3.4. <i>Zaštitne barijere</i> .....                              | 53 |
| 4.3.5. <i>Zaštitne galerije</i> .....                              | 56 |
| 4.3.6. <i>Ostale metode</i> .....                                  | 58 |
| <b>5. TEHNIČKI OPIS PROJEKTOG ZADATKA</b> .....                    | 61 |
| <b>6. REZULTATI I ANALIZE RJEŠENJA</b> .....                       | 62 |
| <b>6.1. Model 1 – početna geometrija pokosa</b> .....              | 62 |
| <b>6.2. Model 2 – zasjek pokosa</b> .....                          | 64 |
| <b>6.3. Model 3 – sidreno podgradni sklop 1</b> .....              | 65 |
| <b>6.4. Model 4 – sidreno podgradni sklop 2</b> .....              | 69 |
| <b>6.5. Model 5 – sidreno podgradni sklop 3</b> .....              | 72 |
| <b>6.6. Model 6 – sidreno podgradni sklop 4</b> .....              | 76 |
| <b>7. TEHNIČKI UVJETI IZVEDBE RADOVA</b> .....                     | 80 |
| <b>8. ZAKLJUČAK</b> .....  | 83 |
| <b>LITERATURA</b> .....  | 85 |



**9. NACRTNA DOKUMENTACIJA – GRAFIČKI PRILOZI .....89**

**Popis slika:**

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Slika 1. Utjecaj geoloških uvjeta na stabilnost usjeka .....</i>  | <b>3</b>  |
| <i>Slika 2. Glavni tipovi sloma blokova u kosinama .....</i>   | <b>5</b>  |
| <i>Slika 3. Ravninski slom .....</i>   | <b>6</b>  |
| <i>Slika 4. Plitki, kružni slom u ispucalnoj stijenskoj masi .....</i>   | <b>7</b>  |
| <i>Slika 5. Kružni slom u rezidualnom tlu i trošnoj stijenskoj masi .....</i>  | <b>7</b>  |
| <i>Slika 6. Plitki slom u slaboj stijenskoj masi .....</i>   | <b>8</b>  |
| <i>Slika 7. Ravninski slom .....</i>   | <b>8</b>  |
| <i>Slika 8. Geometrija ravninskog sloma .....</i>  | <b>9</b>  |
| <i>Slika 9. Geometrije ravninskog sloma: a) vlačna pukotina na gornjoj plohi ravnine, b) vlačna pukotina na licu kosine.....</i> | <b>10</b> |
| <i>Slika 10. Površine sloma i klizanja pri ravninskom slomu.....</i>   | <b>11</b> |
| <i>Slika 11. Širina korištena pri analizi stabilnosti .....</i>  | <b>11</b> |
| <i>Slika 12. Tipični klinasti slom .....</i>   | <b>12</b> |
| <i>Slika 13. Klinasti slom.....</i>  | <b>13</b> |
| <i>Slika 14. Klinasti slom; a) ravnine koje se sijeku u liniji, b) prikaz na stereografskoj projekciji.....</i>                  | <b>13</b> |
| <i>Slika 15. Linija presjeka.....</i>  | <b>14</b> |
| <i>Slika 16. Prikaz linije presjeka na stereografskoj projekciji.....</i>  | <b>14</b> |
| <i>Slika 17. Kružni slom .....</i>   | <b>15</b> |
| <i>Slika 18. Tipični rotacijski slom; kružna ploha velikog radijusa u homogenoj slaboj stijeni.....</i>                          | <b>16</b> |
| <i>Slika 19. Tipični rotacijski slom ploha koja nije kružna u slaboj stijeni na površini i čvršćoj u bazi .....</i>              | <b>16</b> |
| <i>Slika 20. Blokovsko prevrtanje.....</i>   | <b>17</b> |
| <i>Slika 21. Prevrtanje savijanjem .....</i>   | <b>18</b> |
| <i>Slika 22. Blokovsko prevrtanje savijanjem.....</i>  | <b>18</b> |
| <i>Slika 23. Stabilizacija stijenskog pokosa za transport .....</i>  | <b>21</b> |
| <i>Slika 24. Raspored mjernih stanica prilikom mjerenja .....</i>  | <b>26</b> |
| <i>Slika 25. Mjerenje kuta otklona i udaljenosti pomoću EDM uređaja .....</i>  | <b>27</b> |
| <i>Slika 26. Totalna stanica .....</i>   | <b>27</b> |
| <i>Slika 27. Inklinometar .....</i>  | <b>29</b> |
| <i>Slika 28. Princip izračuna otklona iz mjerenja nagiba .....</i>   | <b>30</b> |
| <i>Slika 29. Princip rada a) jednostrukog i b) dvostrukog ekstenzometra .....</i>  | <b>31</b> |
| <i>Slika 30. Idealizirani prikaz prelaska sa intaktne stijene na ispucalu stijensku masu sa povećanjem veličine uzorka .....</i> | <b>36</b> |
| <i>Slika 31. Kategorije stijenskih pokosa i mjere stabilizacije .....</i>  | <b>37</b> |
| <i>Slika 32. Metode stabilizacije stijenskog pokosa .....</i>  | <b>38</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Slika 33. Osnovni elementi sustava ojačanja stijenske mase .....</i>                                 | <b>39</b> |
| <i>Slika 34. Ojačanja stijenske mase: a) prednapregnuto sidro; b) potpuno usidreno pasivno sidro ..</i> | <b>40</b> |
| <i>Slika 35. Nanošenje mlaznog betona na stijenski pokos .....</i>                                      | <b>42</b> |
| <i>Slika 36. Metode otklanjanja stijene u svrhu stabilizacije stijenskog pokosa .....</i>               | <b>44</b> |
| <i>Slika 37. Shematski prikaz funkcioniranja prihvatnog jarka .....</i>                                 | <b>46</b> |
| <i>Slika 38. Ovisnost kuta nagiba i visine prihvatnih jaraka .....</i>                                  | <b>46</b> |
| <i>Slika 39. Gabion sa prihvatnim jarkom .....</i>  | <b>47</b> |
| <i>Slika 40. Shematski prikaz gabiona sa prihvatnim jarkom .....</i>                                    | <b>48</b> |
| <i>Slika 41. Barijera izrađena od pjeskovitog tla .....</i>   | <b>49</b> |
| <i>Slika 42. Barijera izrađena od geosintetika .....</i>  | <b>49</b> |
| <i>Slika 43. Zaštita pokosa dvostruko isprepletenim pocinčanim mrežama .....</i>                        | <b>51</b> |
| <i>Slika 44. Zaštita pokosa pocinčanim mrežama koje su ojačane sidrima i čeličnom užadi .....</i>       | <b>52</b> |
| <i>Slika 45. Visokonosive mreže .....</i>   | <b>52</b> |
| <i>Slika 46. Zaštitna barijera.....</i>   | <b>54</b> |
| <i>Slika 47. Mreža čeličnih prstenova .....</i>   | <b>54</b> |
| <i>Slika 48. Faze izvođenja zaštitnih barijera .....</i>  | <b>55</b> |
| <i>Slika 49. Zaštitne galerije.....</i>   | <b>56</b> |
| <i>Slika 50. Poprečni presjek zaštitne galerije s kosim krovom .....</i>                                | <b>56</b> |
| <i>Slika 51. Poprečni presjek zaštitne galerije s kosim krovom od apsorbirajućeg materijala .....</i>   | <b>57</b> |
| <i>Slika 52. Karakteristike prijenosa sile kod zaštitnih galerija sa šljunkom.....</i>                  | <b>57</b> |
| <i>Slika 53. Zone „prigušivač“ sustava.....</i>   | <b>58</b> |
| <i>Slika 54. 1. Zona „prigušivač“ sustava .....</i>   | <b>59</b> |
| <i>Slika 55. 2. Zona „prigušivač“ sustava .....</i>   | <b>59</b> |
| <i>Slika 56. 3. Zona „prigušivač“ sustava .....</i>   | <b>59</b> |
| <i>Slika 57. Nadstrešnica sa mrežom protiv odrona.....</i>  | <b>60</b> |
| <i>Slika 58. Shematski prikaz sustava nadstrešnice.....</i>   | <b>60</b> |
| <i>Slika 59. Model 1 – početna geometrija pokosa .....</i>  | <b>63</b> |
| <i>Slika 60. Model 1 – faktor sigurnosti kritične klizne plohe.....</i>                                 | <b>63</b> |
| <i>Slika 61. Model 2 – geometrija zasjeka pokosa .....</i>  | <b>64</b> |
| <i>Slika 62. Model 2 – faktor sigurnosti i plohe sa <math>FS &lt; 1,30</math>.....</i>                  | <b>65</b> |
| <i>Slika 63. Model 3 – sidreno podgradni sklop.....</i>   | <b>66</b> |
| <i>Slika 64. Model 3 – faktor sigurnosti i plohe sa <math>FS &lt; 1,30</math>.....</i>                  | <b>67</b> |
| <i>Slika 65. Model 3 – faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu.....</i>                              | <b>68</b> |
| <i>Slika 66. Model 4 – sidreno podgradni sklop.....</i>   | <b>69</b> |
| <i>Slika 67. Model 4 – faktor sigurnosti i plohe sa <math>FS &lt; 1,30</math>.....</i>                  | <b>70</b> |
| <i>Slika 68. Model 4 – faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu.....</i>                              | <b>71</b> |
| <i>Slika 69. Duljina veze injektiranih sidara .....</i>   | <b>72</b> |
| <i>Slika 70. Model 5 – sidreno podgradni sklop.....</i>   | <b>73</b> |
| <i>Slika 71. Model 5 – faktor sigurnosti i plohe sa <math>FS &lt; 1,30</math>.....</i>                  | <b>74</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Slika 72. Model 5 – faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu.....</i>             | <b>75</b> |
| <i>Slika 73. Model 6 – sidreno podgradni sklop.....</i>                                | <b>76</b> |
| <i>Slika 74. Model 6 – faktor sigurnosti i plohe sa <math>FS &lt; 1,30</math>.....</i> | <b>77</b> |
| <i>Slika 75. Model 6 – faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu.....</i>             | <b>78</b> |

**Popis tablica:**

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tablica 1. Procjena prioriteta i nužne mjere .....</i>  | <b>22</b> |
| <i>Tablica 2. Svojstva sidreno podgradnog sklopa .....</i> | <b>67</b> |
| <i>Tablica 3. Svojstva sidreno podgradnog sklopa .....</i> | <b>70</b> |
| <i>Tablica 4. Svojstva sidreno podgradnog sklopa .....</i> | <b>73</b> |
| <i>Tablica 5. Svojstva sidreno podgradnog sklopa .....</i> | <b>76</b> |
| <i>Tablica 6. Izvedene mjere stabilizacije .....</i>       | <b>82</b> |

## 1. UVOD

Zaštita stijenskih pokosa u građevinarstvu, ali i u svakodnevnom životu je od iznimne važnosti. Bilo da se radi o pokosu uz prometnicu, željezničku prugu, industrijsko postrojenje ili stambeni objekt, nužno je osigurati stabilnost i poduzeti mjere zaštite kako bi se izbjegla bilo kakva tragedija. Posljedice odrona ili bilo kakvih nedozvoljenih pomaka u stijenskom pokosu mogu biti katastrofalne, kako materijalno, tako i bitnije, za ljudske živote. Kako bi se to izbjeglo, nužno je vršiti zaštitu i poduzeti odgovarajuće nužne mjere zaštite stijenskih pokosa. Svaki pokos je specifičan, i time ne postoji univerzalno rješenje po principu „jedan za sve“. Zaštita stijenskih pokosa važan je dio problematike kojom se bave geotehničari unutar geotehničkog inženjerstva, stijenskog inženjerstva i inženjerske geologije. Može se razmatrati zaštita prirodnih kosina dok još nisu postale opasne za okoliš, zaštita kosina prilikom iskopa, zaštita objekata u nožici od nepovoljnih utjecaja kosine iznad njih, sanacija potencijalnih klizišta, sanacija aktivnih klizišta i načini izbjegavanja nepovoljnih utjecaja potencijalnih klizišta ili odrona i slično, na građevine koje ista mogu ugroziti [1].

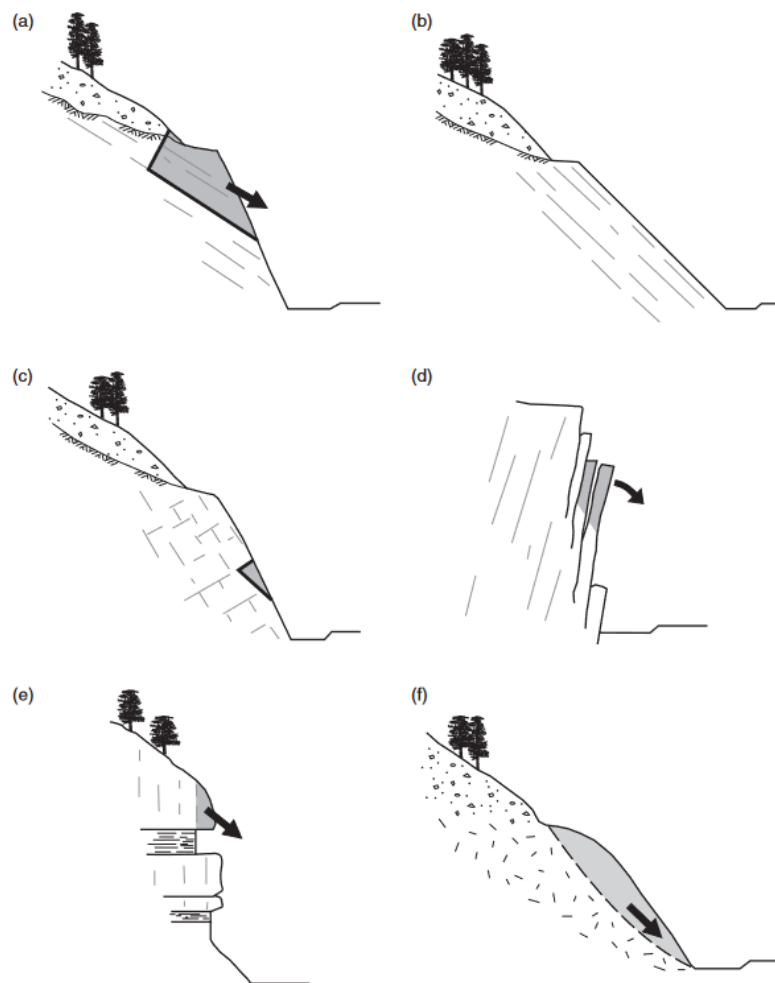
Razne inženjerske aktivnosti zahtijevaju zasijecanje stijenske mase. U građevinarstvu, projekti uključuju transportne sustave kao što su autoceste i željeznice, brane za proizvodnju električne energije i vodoopskrbe, te industrijski i urbani razvoj [2]. Da bi se pristupilo rješavanju problematike stabilnosti i zaštite stijenskih pokosa, najprije je bitno sagledati kompletnu, širu sliku lokacije i uvjeta. Sukladno uvjetima na lokaciji i sagledanoj široj slici, može se pristupiti mjerama sanacije i zaštite, odnosno pronalaženju najboljeg rješenja za danu lokaciju. Problematika gdje se javlja zaštita pokosa može biti razna, a tu spadaju; zaštita pokosa uz prometnice, zaštita pokosa građevnih jama ili postojećih objekata, zaštita pokosa (sanacija) aktivnih klizišta, zaštita pokosa podzemnih građevina.

U prvom dijelu rada objašnjena je stabilnost stijenskih pokosa kroz mehanizme sloma koji mogu biti ravninski, klinasti, kružni i slom prevrtanjem. Zatim se pojašnjava metodologija monitoringa i navode se tehnike kojima se vrši opažanje pokosa, a to su daljinska opažanja ili satelitske snimke, fotogrametrijske tehnike, geodetske tehnike i geotehničke ili fizičke tehnike. Nakon toga, detaljno je objašnjena stabilizacija i zaštita stijenskog pokosa kroz mjere zaštite u koje se ubrajaju prihvatni jarci, zaštitne konstrukcije, zaštitne mreže, barijere i galerije, te ostale metode.

U drugom dijelu rada prikazan je projekt zaštite stijenskog pokosa predusjeka tunela. Prikazane su provedene analize stabilnosti kroz šest modela izrađenih u računalnom programu „Rockscience, Slide2“ i tehnička rješenja s priložima. Nacrtna dokumentacija prikazana je kroz četiri grafička priloga koji uključuju; Prilog 1. sa prikazanom situacijom, Prilog 2. prikazuje karakterističan poprečni presjek, Prilog 3. prikazuje pogled na stijenski pokos, te naposljetku, Prilog 4. prikazuje detalj aktivnog sidra.

## 2. STABILNOST STIJENSKIH POKOSA

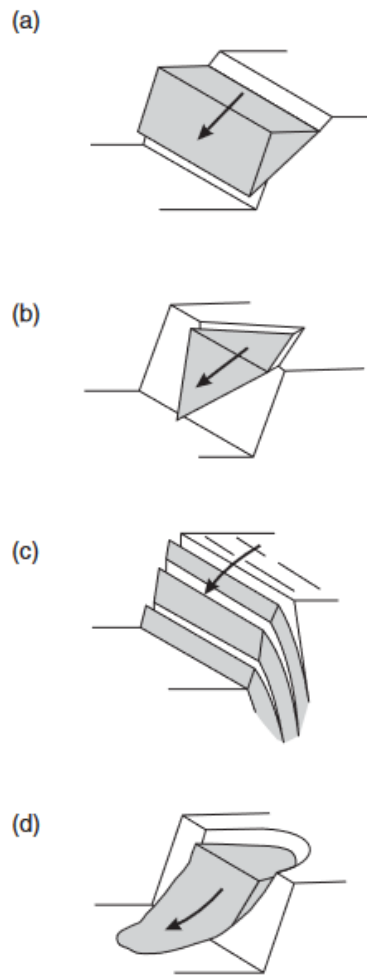
Traženi uvjeti stabilnosti stijenskih pokosa varirat će ovisno o vrsti projekta i posljedicama sloma. Na primjer, za usjke iznad autoceste s velikim prometom biti će važno da ukupni nagib bude stabilan i da nema odrona stijene koji dopiru do prometnih traka. To će često zahtijevati pažljivo miniranje tijekom izgradnje, i ugradnju zahtijevanih stabilizacijskih mjera. Budući da je vijek trajanja stabilizacijskih mjera različit, ovisno o klimi i brzini razgradnje odnosno trošenja stijene, periodično održavanje je nužno za dugotrajnu sigurnost. Kod projektiranja usječenih padina obično postoji malo fleksibilnosti za podešavanje orijentacije nagiba kako bi odgovarao geološkim uvjetima na koje se nailazi tijekom iskopa. Na primjer, u dizajnu autocesta, prvenstveno se upravlja trasom čimbenicima kao što su dostupna prednost prolaska, nagibi te vertikalna i horizontalna zakrivljenost. Stoga, projekt sanacije se mora prilagoditi jedinstvenim geološkim uvjetima na koje se nailazi uz autocestu. Slika 1. prikazuje raspon geoloških uvjeta i njihov utjecaj na stabilnost [2].



Slika 1. Utjecaj geoloških uvjeta na stabilnost usjeka [2]

Kosine (a) i (b) pokazuju tipične uvjete za sedimentne stijene, poput pješčenjaka i vapnenca koji sadrže kontinuirane slojeve, zbog kojih može doći do klizanja ako je nagib strmiji od kuta trenja površine diskontinuiteta. Na slici (a) blok može kliznuti duž diskontinuiteta nepovoljne orijentacije, dok su na slici (b) diskontinuiteti paralelni u usporedbi sa licem kosine, te je ona stabilna. Na slici (c) ukupno lice kosine je također stabilno jer glavni set diskontinuiteta ima povoljnu orijentaciju. Međutim, postoji određeni rizik nestabilnosti površinskih blokova stijena formiranih od skupa konjugiranih diskontinuiteta koji izlaze iz lica, osobito ako je došlo do oštećenja od miniranja tijekom gradnje. Na slici (d) glavni set diskontinuiteta također pada u lice kosine, ali pod strmim kutom tako da formira niz tankih ploča (blokova) koji se mogu prevrnuti, ukoliko se težište bloka nalazi izvan baze bloka. Slika (e) prikazuje tipično vodoravno korito pješčenjaka-škriljaca u kojoj škriljac erodira znatno brže od pješčenjaka te formira niz prepusta koji mogu iznenada popustiti duž vertikalnih vlačnih spojeva. Slika (f) prikazuje kosinu usječenu u slabu stijenu koja sadrži guste, ali nepostojane diskontinuitete koji ne tvore kontinuiranu kliznu površinu. Slom u ovakvoj slaboj stijenskoj masi može se formirati duž plitke kružne klizne plohe. Ploha sloma/klizanja pritom se može razviti djelomično duž diskontinuiteta i djelomično kroz intaktnu stijensku masu [2].

Različite vrste slomova u kosinama povezane su s različitim geološkim strukturama i važno je prepoznati potencijalne probleme stabilnosti. Slika 2. prikazuje glavne tipove slomova blokova u kosinama s geološkim strukturama koje mogu izazvati svaki od takvih slomova. Redom su prikazani; a) ravninski slom u stijeni koja sadrži postojane diskontinuitete duž lica kosine, te se pružaju paralelno s licem; (b) klinasti slom duž dvaju diskontinuiteta koji se presijecaju; (c) slom prevrtanjem u čvrstoj stijenskoj masi koja sadrži diskontinuitete koji pod strmim kutom padaju u lice kosine; i (d) kružni slom u vrlo slaboj stijenskoj masi ili raspucalnoj stijenskoj masi s nasumično orijentiranim diskontinuitetima.

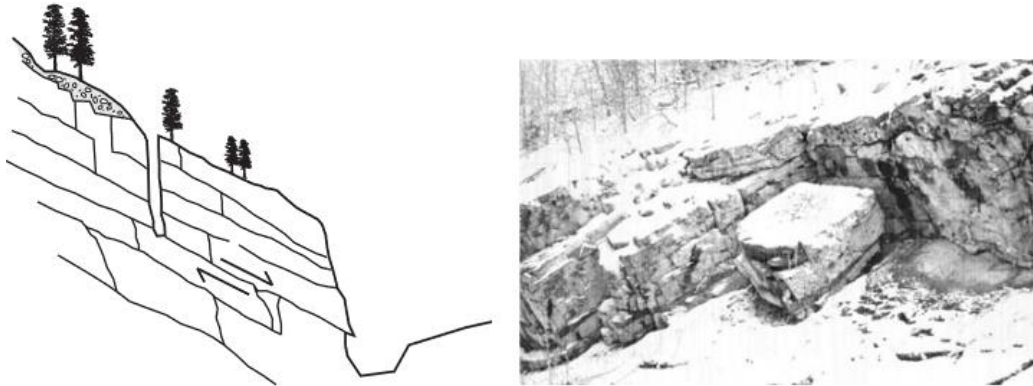


Slika 2. Glavni tipovi sloma blokova u kosinama [2]



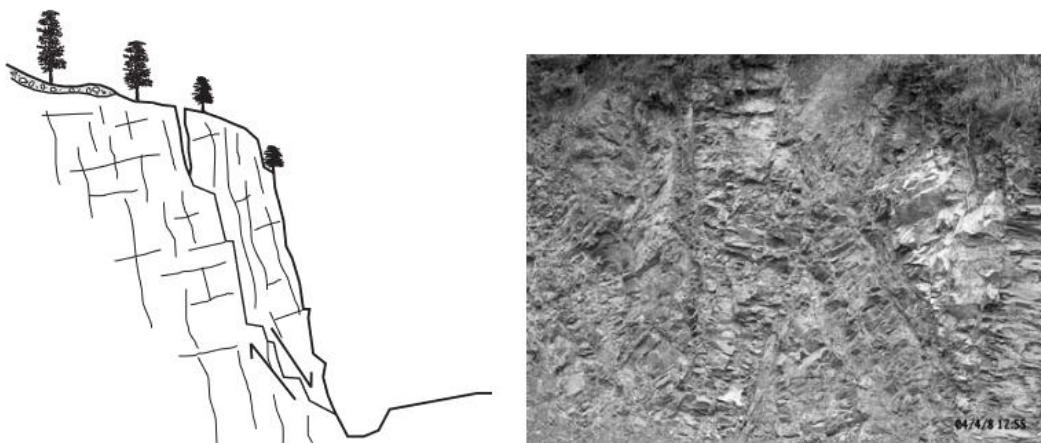
## 2.1. Mehanizmi sloma

Slika 3. prikazuje čvrsti, masivni vapnenac koji sadrži skup neprekinutih diskontinuiteta nepovoljne orijentacije. Budući da je vertikalni usjek lica strmiji od nagiba diskontinuiteta, diskontinuiteti su „otvoreni“, te se klizanje javlja uz pojavu polu-vertikalne pukotine, odnosno paralelnih setova diskontinuiteta. Pod takvim okolnostima, posmična čvrstoća koja se definira u analizi stabilnosti je čvrstoća diskontinuiteta [2].



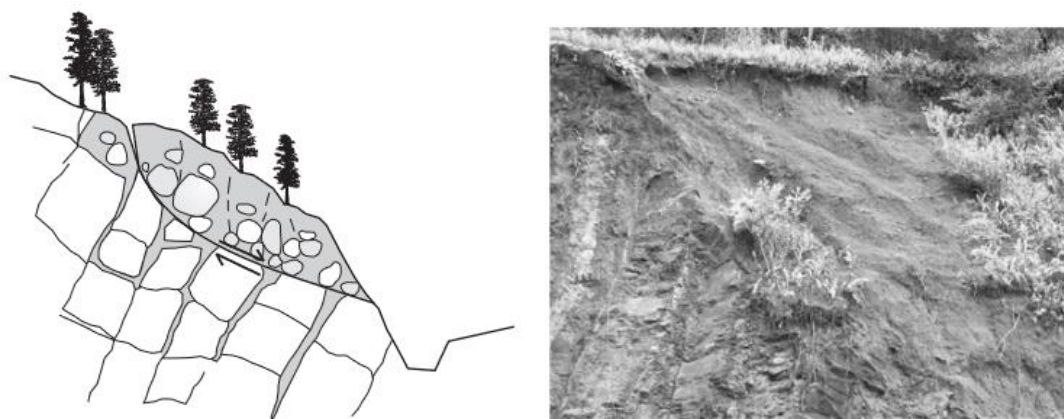
Slika 3. Ravinski slom [2]

Slika 4. prikazuje blagi usjek kosine u neznatno istrošenom, srednje-slabom bazaltu koji sadrži usko razmaknute diskontinuitete niske postojanosti, koji se pružaju duž različitih orijentacija. Budući da su plohe diskontinuirane, odnosno postoje brojni diskontinuiteti, ne može se odrediti samo jedan diskontinuitet koji kontrolira stabilnost kosine, već to čini skup diskontinuiteta. Međutim, da bi se klizna ploha mogla razviti u ovoj padini bi uslijedila „stepenasta“ klizna ploha, koja bi dijelom prolazila diskontinuitetima, a dijelom kroz intaktnu stijenu. Posmična čvrstoća ove složene klizne površine ne može biti određena analitički, tako da je razvijen skup empirijskih jednadžbi iz kojih se kohezija i kut trenja mogu izračunati s obzirom na stupanj trošnosti i čvrstoću stijene [2].



Slika 4. Plitki, kružni slom u ispucaloj stijenskoj masi [2]

Slika 5. prikazuje usjek u istrošenoj stijenskoj masi u kojoj stupanj trošenja varira od rezidualnog tla u gornjem (desnom) dijelu kosine sve do neznatno istrošene stijenske mase na većim dubinama. Za ove uvjete klizna površina ležat će pretežno u slabijim materijalima u gornjem dijelu kosine, te je kod analiza stabilnosti nužno koristiti različite parametre čvrstoće za gornji i za donji dio klizne plohe. Budući da stupanj trošnosti stijenske mase prostorno značajno varira, čvrstoća stijenske mase će također biti promjenjiva i teška za izmjeriti [2].



Slika 5. Kružni slom u rezidualnom tlu i trošnoj stijenskoj masi [2]

Četvrti geološki uvjet koji se pojavljuje je vrlo slaba intaktna stijena koja ne sadrži diskontinuitete. Slika 6. prikazuje usječeno lice u tufu (pršincu), stijeni formiranoj konsolidacijom vulkanskog pepela. Geološki čekić mogao bi se zabiti u lice sa nekoliko udaraca, što ukazuje na nisku čvrstoću ovakve stijenske mase. Međutim, budući da ovakva stijena ne sadrži diskontinuitete, ima značajnu koheziju uz umjereni kut trenja. Samim time,

usjek bi bilo moguće izvesti stabilno s okomitim licem visine od nekoliko desetaka metara u ovakvom materijalu, pod uvjetom da su pritisci vode i erozija kontrolirani [2].



Slika 6. Plitki slom u slaboj stijenskoj masi bez diskontinuiteta [2]

#### 2.1.1. Ravninski slom

Ravninski slom relativno je rijedak prizor u kosinama jer se samo ponekad stvore potrebni geometrijski uvjeti uslijed kojih dolazi do takvog sloma u kosini. Međutim, ne treba zanemariti dvodimenzionalni slučaj jer postoje mnoge bitne činjenice koje se mogu izvući iz jednog tako jednostavnog mehanizma sloma. Ravninski slom je posebno koristan pri demonstraciji osjetljivosti kosine i promjena u posmičnoj čvrstoći i uvjetima podzemne vode – promjenama koje su manje očite kada se radi o kompleksnim mehanizmima trodimenzionalnog sloma u kosini [2]. Slika 7. prikazuje tipični ravninski slom u stijenskom pokosu gdje je blok stijene kliznuo niz jednu ravninu po licu pokosa.

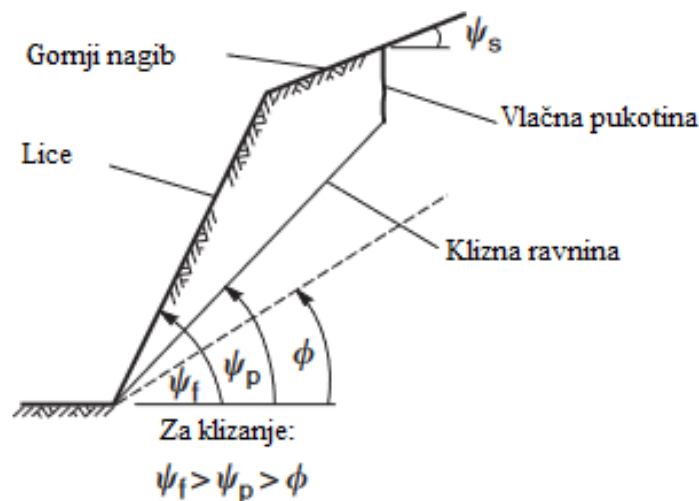


Slika 7. Ravninski slom [2]

Kako bi se ovakav mehanizam sloma mogao dogoditi, moraju biti zadovoljeni sljedeći geometrijski uvjeti:

- (a) ravnina na kojoj dolazi do klizanja mora biti paralelna ili gotovo paralelna (unutar približno  $\pm 20^\circ$ ) prema licu kosine.
- b) klizna ravnina mora biti u smjeru lica kosine, što znači da pad ravnine mora biti manji od nagiba lica, odnosno  $\psi_p < \psi_f$ .
- (c) nagib klizne ravnine mora biti veći nego kut trenja ove ravnine, odnosno,  $\psi_p > \phi$ .
- (d) gornji kraj klizne površine ili presijeca gornju ravninu ili završava u vlačnoj pukotini.
- (e) popuštajuće površine koje pružaju nezamjetan otpor klizanju, moraju biti prisutne u stijenskoj masi kako bi definirale bočne granice kliznog tijela. Alternativno, slom se može dogoditi na kliznoj plohi koja prolazi kroz konveksni dio kosine [2].

Slika 8. prikazuje poprečni presjek ravnina sa prethodno definiranim parametrima koji formiraju ravninski slom.

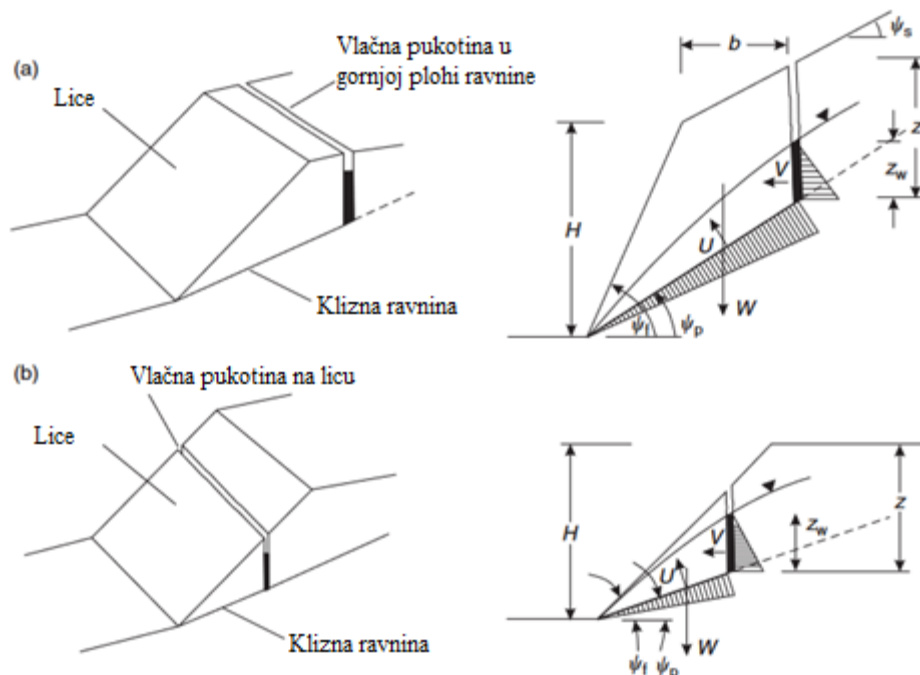


Slika 8. Geometrija ravninskog sloma [2]

Uvjeti geometrije i podzemnih voda u kosinama obuhvaćene u takvoj analizi definirane su na Slici 9. koja pokazuje dvije geometrije kako slijedi:

- (a) kosine koje imaju vlačnu pukotinu u gornjem površinskom dijelu; i
- (b) kosine s vlačnom pukotinom na licu [2].

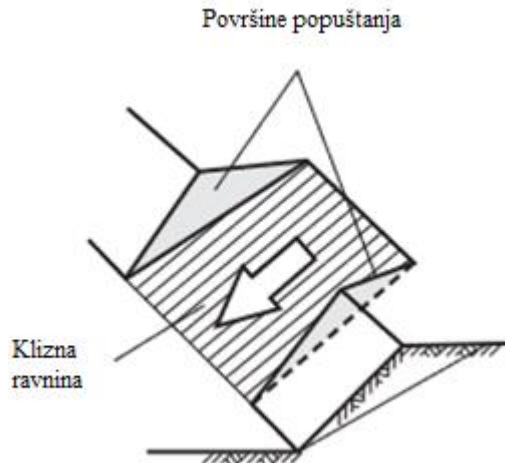
Vlačna pukotina može biti prisutna na čelu klizišta ili unutar kliznog tijela (slika 10.).



Slika 9. Geometrije ravninskog sloma: a) vlačna pukotina na gornjoj plohi ravnine, b) vlačna pukotina na licu kosine [2]

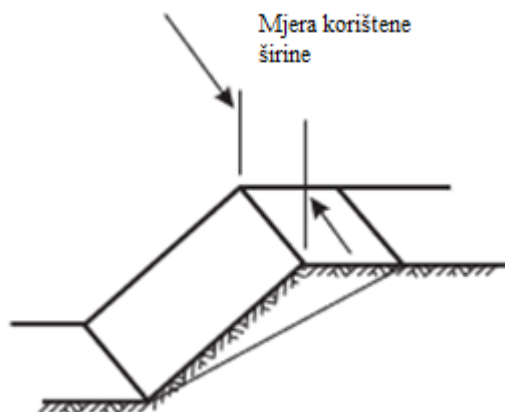
Prilikom analize mehanizma sloma ravnine uvode se sljedeće pretpostavke:

- nastaju i klizna površina i vlačna pukotina paralelno s kosinom.
- vlačna pukotina je okomita i ispunjena je vodom do dubine  $z_w$ .
- voda ulazi u kliznu površinu duž baze vlačne pukotine i teče duž klizne površine, uslijed atmosferskog pritiska gdje klizna ploha prolazi licem kosine. Raspodjela tlaka uzrokovana prisutnošću vode u vlačnoj pukotini i uzduž klizne površine također je prikazana na slici 10.
- sile  $W$  (težina klizanja bloka),  $U$  (sila uzgona zbog pritiska vode na kliznoj površini) i  $V$  (sila zbog tlaka vode u vlačnoj pukotini) prolaze kroz centar klizne plohe. Drugim riječima, pretpostavlja se da ne postoje momenti koji bi težili izazvati rotaciju bloka, pa se stoga slom nazire samo klizanjem. Iako ova pretpostavka možda nije striktno istinita za stvarne slučajeve, pogreška koja se javlja ignoriranjem momenata je dovoljno mala kako bi se zanemarila. Međutim, u strmim kosinama sa strmim diskontinuitetima, mogućnost sloma prevrtanjem bi se trebala imati u vidu.
- posmična čvrstoća  $\tau$  klizne površine definirana je kohezijom  $c$  i kutom trenja  $\phi$  koji su povezani jednadžbom  $\tau = c + \sigma \tan \phi$ . U slučaju hrapave površine ili stijenske mase koja ima krivuljastu ovojnici čvrstoće na smicanje, prividnu koheziju i prividni kut trenja definirani su tangentom koja uzima u obzir normalno naprezanje koje djeluje na kliznoj površini.
- pretpostavlja se da su prisutne površine popuštanja, tako da nema otpora klizanju na bočnim stranama klizne plohe (Slika 10.) [2].



Slika 10. Površine sloma i klizanja pri ravninskom slomu [2]

(g) u analizi dvodimenzionalnih problema, uobičajeno je razmotriti širinu tijela uzetog pri pravim kutovima naspram lica kosine. To znači da na okomitom presjeku kroz kosinu, površina klizne plohe može biti predstavljena kao duljina površine, a volumen kliznih blokova predstavljen je kao poprečni presjek površine bloka (Slika 11.) [2].



Slika 11. Širina korištena pri analizi stabilnosti [2]

Faktor sigurnosti sloma kosine računa se rješavanjem svih sila koje djeluju na kosinu u komponentama paralelnim i okomitim na kliznu površinu. Vektorski zbroj posmičnih sila,  $\Sigma S$  koje djeluju niz ravninu naziva se sila pomaka. Umnožak ukupnih normalnih sila,  $\Sigma N$  i tangensa kuta trenja  $\varphi$ , plus kohezivna sila naziva se sila otpora [2].

Faktor sigurnosti FS kliznog bloka je omjer sila otpora i sila pomaka, a izračunava se na sljedeći način (jednadžba 1);

$$FS = \frac{\text{Sile pomaka}}{\text{Sile otpora}} = \frac{cA + \Sigma N \cdot \tan \varphi}{\Sigma S} \quad (1)$$

gdje je:

$c$  – kohezija

$A$  – površina klizne plohe

$\sum N$  – ukupne normalne sile

$\sum S$  – ukupne posmične sile

$\tan \varphi$  – kut trenja

### 2.1.2. Klinasti slom

Tipični klinasti slomovi prikazani su na slikama 12. i 13. i prikazuju uvjete koji se obično pretpostavljaju za analizu klinova. Slika 12. prikazuje pokos gdje je klin formiran kroz dva kontinuirana, ravninska diskontinuiteta i presječnom linijom kroz te dvije ravnine u nožici pokosa.



Slika 12. Tipični klinasti slom [2]

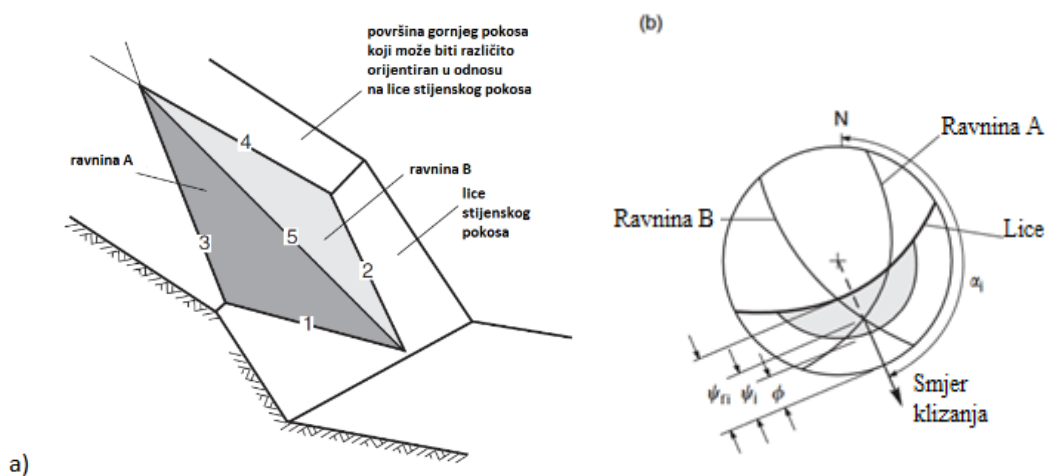
Kod takvog sloma, trend linije presjeka i smjer pada lica je približno jednak. Naime, pad linije presjeka je oko  $50\text{--}55^\circ$ , dok je kut trenja nagiba u rasponu od  $35\text{--}40^\circ$ . To jest, linija presjeka pada strmije od kuta trenja. Ovi uvjeti zadovoljavaju kinematičke uvjete klinastog sloma. Slika 12. također ilustrira kako mala promjena u uvjetima na gradilištu rezultira stabilnim nagibom. Na primjer, ako je linija presjeka bila malo iza lica, ili samo jedan od

spojeva bio diskontinuiran, tada se slom ne bi niti dogodio. Klin prikazan na Slici 13. formiran je posteljicom s lijeve strane i konjugiranim spojem s desne strane. Kao na slici 12., linija presječnica se proteže do lica kosine i događa se slom. Međutim, u ovom klinu, klizanje se dogodilo gotovo u potpunosti na plohi sa spojem koji se ponaša kao ploha sloma. Zbog toga, posmična čvrstoća diskontinuiteta ima mali utjecaj na stabilnost [2].



Slika 13. Klinasti slom [1]

Geometrija klina pri analizi osnovnih mehanizama klizanja definirana je na slikama 14. i 15. Na temelju tih geometrija, generalno postoji uvjet da se pri stvaranju klinastog sloma dvije ravnine uvijek sijeku u liniji (Slika 14.(a)). Na stereografskoj projekciji, linija sjecišta je predstavljena točkom u kojoj se dva velika kruga ravnina sijeku, a orijentacija linije definirana je njegovim trendom ( $\alpha_i$ ) i njegovim padom ( $\psi_i$ ) (Slika 14.(b)) [2].

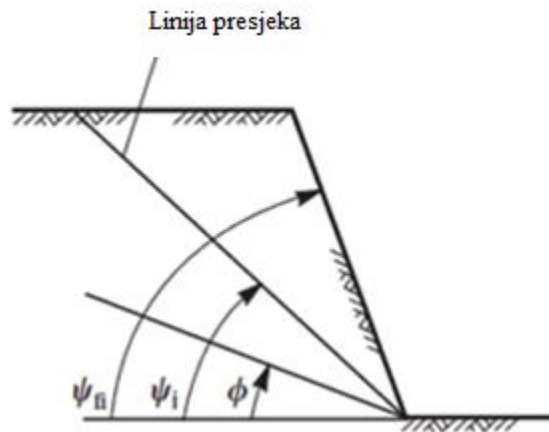


Slika 14. Klinasti slom; a) ravnine koje se sijeku u liniji, b) prikaz na stereografskoj projekciji [2]



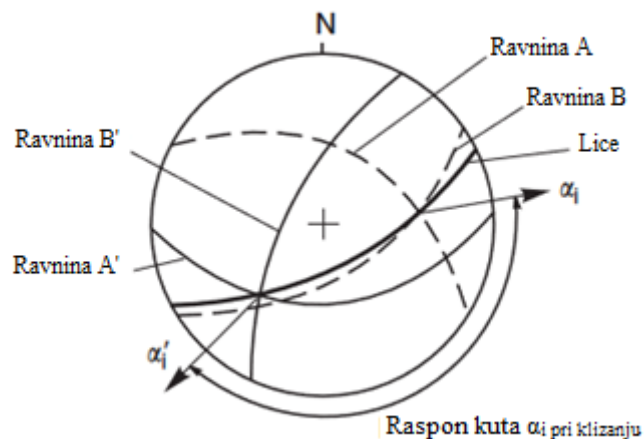
Općenito, do klizanja može doći ako točka presjeka između dvaju velikih krugova kliznih ravnina leži unutar osjenčanog područja prikazanog na Slici 14 (b). Odnosno, stereo mreža će pokazati da li je klinasti slom kinematički izvediv. Međutim, stvarni faktor sigurnosti klina ne može biti određen sa stereo mreže, jer ovisi o detaljima geometrije klina, posmičnim čvrstoćama ravnina i pritiscima vode.

2) Nagib linije presjeka mora biti ravniji od nagiba lica i strmiji od prosječnog kuta trenja dvije klizne ravnine, to jest  $\psi_{fi} > \psi_i > \Phi$  (Slika 15.). Nagib lica kosine  $\psi_{fi}$  je mjereno u pogledima pravog kuta naspram linije presjeka. Valja imati da umu da bi  $\psi_{fi}$  bio jednak kao  $\psi_f$  pravi nagib kosine, samo ako je nagib linije presjeka jednak kao nagib orijentacije lica kosine.



Slika 15. Linija presjeka [2]

3) Linija presjeka mora biti nagnuta u smjeru izvan lica kosine kako bi se klizanje moglo dogoditi; mogući raspon u trendu linije presjeka je između  $\alpha_i$  i  $\alpha'_i$  (Slika 16.) [2].



Slika 16. Prikaz linije presjeka na stereografskoj projekciji [2]

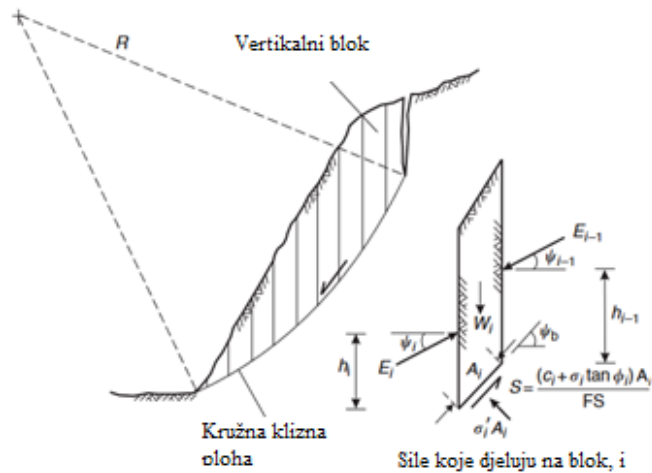
### 2.1.3. Kružni slom

U prethodnim poglavljima pretpostavljalo se da je slom u kosinama kontroliran geološkim značajkama kao što su ravnine i spojevi koji dijele stijensku masu u diskontinuitete. Međutim, pod takvim uvjetima, jedan ili više diskontinuiteta obično definira blisko raspucalu ili trošnu stijensku masu, te kako izraženi strukturni uzorak više ne postoji, klizna ploha je slobodna u pronalaženju linije najmanjeg otpora kroz kosinu. Promatranja slomova u takvim materijalima predlažu da takva klizna ploha generalno poprima oblik kruga, te je na toj činjenici temeljena većina teorija stabilnosti [2]. Slika 17. prikazuje tipični kružni slom u trošnoj stijenskoj masi iznad autoceste.



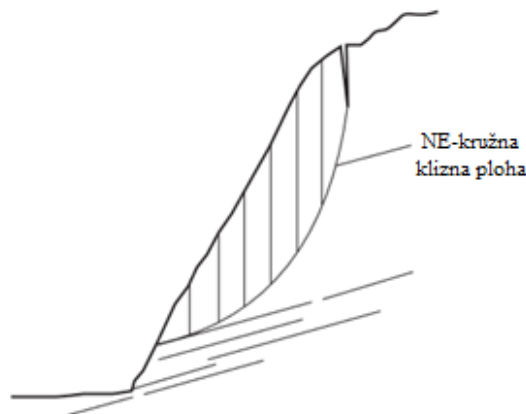
Slika 17. Kružni slom [2]

Uvjeti pod kojima se kružni slom događa je kada su individualne čestice u tlu ili stijenskoj masi jako sitne u usporedbi s veličinom kosine. Stoga, komadi razlomljene stijenske mase u ispuni težiti će ponašanju kao „tlo“ i uzrokovati kružni slom kada je dimenzija kosine značajno veća nego dimenzija stijenskih fragmenata. Slično tome, tlo koje se sastoji od pijeska, praha i manjih čestica će izložiti kružne klizne površine, čak i u kosinama visokim nekoliko metara. Veoma trošne stijenske mase, usko razmaknute, te nasumično orijentirani diskontinuiteti će također težiti takvom slomu. Uobičajeno je projektirati kosine u takvim materijalima uz pretpostavku da će se razviti kružni slom. Stvarni oblik kružne klizne plohe pod utjecajem je geološkim uvjetima u kosini. Na primjer, u homogenoj slaboj ili trošnoj stijenskoj masi ili ispuni, slom će se vjerojatno formirati kao plitka površina velikog radijusa koja se pruža od vlačne pukotine blisko iza vrha sve do nožice kosine (Slika 18.) [2].



Slika 18. Tipični rotacijski slom; kružna ploha velikog radijusa u homogenoj slaboj stijeni [2]

U suprotnosti kod slomova u tlu visoke kohezije, materijali s malim kutom unutarnjeg trenja kao što je glina, gdje površina može biti dublja sa malim radijusom koji može izlaziti izvan nožice kosine. Slika 19. prikazuje primjer uvjeta u kojoj je oblik klizne plohe modificiran geologijom kosine.



Slika 19. Tipični rotacijski slom plohe koja nije kružna u slaboj stijeni na površini i čvršćoj u bazi [2]

Vidljivo je kako je kružni slom u gornjoj, trošnoj stijenskoj masi skraćen plitkom pukotinom čvrste stijene blizu baze. Analize stabilnosti oba tipa površina mogu se izvesti korištenjem metoda kružnog sloma, iako je u drugom slučaju nužno koristiti procedure koje dopuštaju definiranje oblika površine. Za svaku kombinaciju parametara nagiba postoji klizna površina za koju je faktor sigurnosti minimalan - to se obično naziva - „kritična površina“ ili „kritična klizna ploha“. Postupak za pronalaženje kritične površine je izvođenje velikog broja analiza u kojima središte koordinira i polumjer kruga variraju do površine s najnižim faktorom

sigurnosti. To je veoma bitan dio analize stabilnosti kosina s rotacijskim tipom nestabilnosti/sloma [2].

#### 2.1.4. Slom prevrtanjem

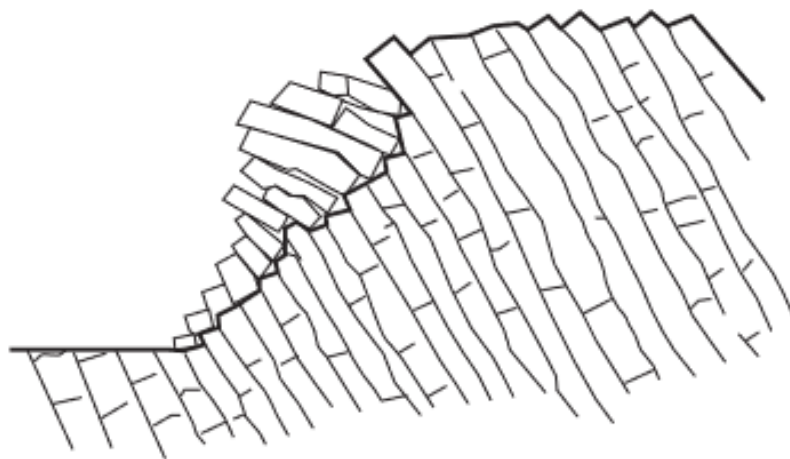
Slom prevrtanjem uključuje mehanizam rotacije elementa stijenske mase (stupa ili bloka) oko

fiksne baze. Slično kao kod ravninskog i klinastog sloma za nastanak sloma prevrtanjem potrebno je postojanje geoloških struktura koje uvjetuju ovakav tip sloma [3].

Goodman i Bray (1976) [4] opisali su niz različitih tipova slomova prevrtanjem na koje se može naići, te je svaki predstavljen i opisan u nastavku. Važnost pri razlikovanju različitih tipova slomova prevrtanjem je to da postoje dvije distinktno metode analize stabilnosti za slomove prevrtanjem, a to su – blokovsko prevrtanje i prevrtanje savijanjem, te je nužno koristiti odgovarajuću analizu pri rješavanju problema.

#### **Blokovsko prevrtanje**

Kao što je prikazano na Slici 20., prevrtanje blokova događa se kada se u čvrstoj stijenskoj masi formiraju zasebne kolone setova diskontinuiteta koje se pružaju strmo u lice kosine, dok drugi set široko razmaknutih okomitih spojeva definira visinu kolone.



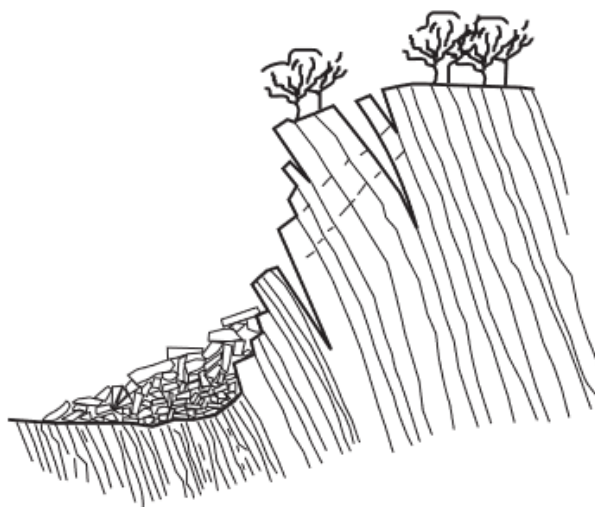
Slika 20. Blokovo prevrtanje [4]

Kratke kolone koje formiraju nožicu kosine gurnute su naprijed uslijed opterećenja većih kolona blokova koji se prevrću. Takvo klizanje nožice kosine dopušta formiranje daljnjeg urušavanja tj. prevrtanja uzdužno od kosine. Baza sloma obično se sastoji od stepenaste

površine koja se uzdiže od jednog spoja do drugog. Tipični geološki uvjeti u kojima se ovaj slom može dogoditi su slojeviti pješčenjak i stupičasti bazalt u kojima su okomiti spojevi dosta razvijeni [2].

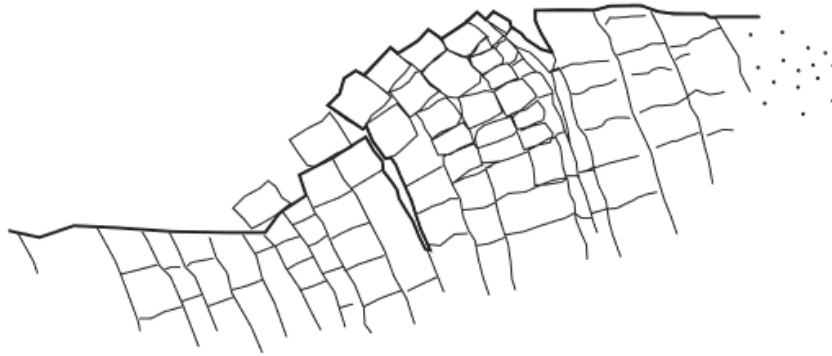
### **Prevrtanje savijanjem**

Proces prevrtanja savijanjem prikazan je na Slici 21. koja prikazuje kontinuirane stupove stijena, odvojene dobro uslojenim, strmim diskontinuitetima koji se, kako se naginju naprijed, slamaju savijanjem.



Slika 21. Prevrtanje savijanjem [4]

Tipični geološki uvjeti situacije u kojima se može pojaviti ovakva vrsta sloma su tankoslojni škriljac i škriljevac u kojem okomiti spoj nije dobro razvijen, odnosno uslojen. Klizanje, iskopavanje ili erozija u nožici kosine omogućuje početak procesa prevrtanja i vraća se natrag u stijensku masu stvaranjem dubokih vlačnih pukotina koje postaju uže s dubinom. Donji dio kosine prekriven je izlomljenim blokovima, te je ponekad teško raspoznati slom prevrtanjem gledajući s dna kosine. U ovu kategoriju, odnosno tip sloma može se uvrstiti i prevrtanje blokova – blokovsko prevrtanje. Kao što je prikazano na Slici 22., blokovsko prevrtanje karakterizira pseudo-kontinuirano savijanje duž dugih blokovitih stupova koji su podijeljeni brojnim poprečnim spojevima [2].



Slika 22. Blokovo prevrtanje savijanjem [4]

Umjesto savitljivog prevrtanja kontinuiranih stupova koji rezultira savitljivim slomom, slom u ovakvom slučaju rezultira zbog akumuliranih pomaka poprečnih spojeva. Zbog velikog broja malih pokreta u ovoj vrsti prevrtanja postoji manje vlačnih pukotina nego kod savitljivog sloma, i manje kontakta rubova i lica nego što je to slučaj kod blokovskog prevrtanja [2].

### 3. PROJEKTIRANJE U STIJENSKOJ MASI

Praćenje, tj. opažanje pokosa često je važan dio u osiguravanju istih. Koriste se površinske i podpovršinske metode praćenja. Mnogi se pokosi pomiču u raznim smjerovima i nagibima tijekom svog vijeka. Takvi pomaci pokosa ukazuju da je pokos u kvazistabilnom stanju, što može potrajati mnogo godina, ili čak stoljećima bez da se slom ikada dogodi. Međutim, u drugim slučajevima, čak i mali inicijalni pomak može biti posljedica za ubrzanje pomaka uslijed kojega se događa slom pokosa. Zbog nepredvidivosti ponašanja nagiba pokosa, programi i tehnike opažanja za praćenje kretanja mogu biti od iznimne vrijednosti u upravljanju i kontroliranju opasnosti na pokosima, te mogu pružiti informacije koje su korisne za projektiranje mjera osiguranja stabilnosti.

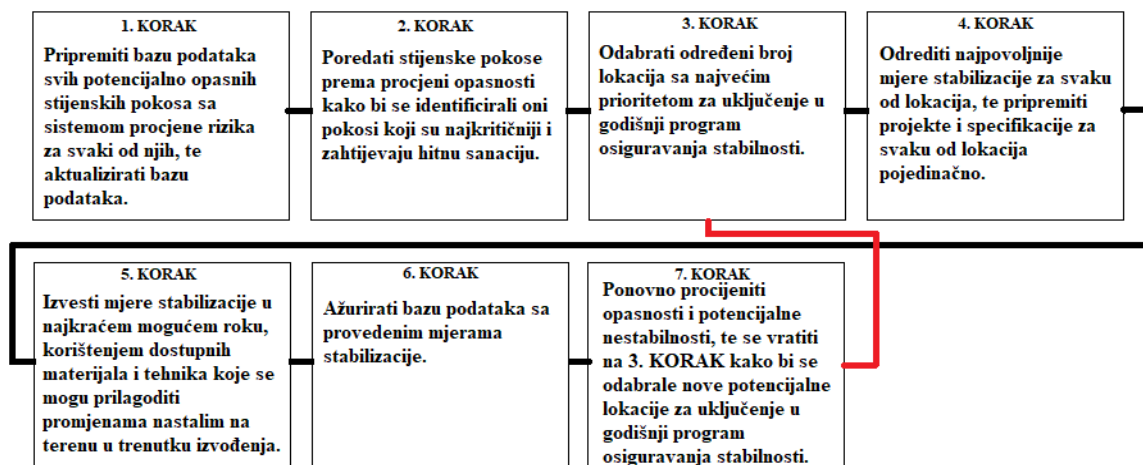
Ljudske aktivnosti koje mogu biti štetne za stabilnost pokosa uključuju iskope ili nasipavanje, kojima se mijenja geometrija pokosa ili mijenjanje uvjeta podzemnih i površinskih dotoka vode. Kada se stijenski pokos prvi put iskopa ili otkrije, postoji razdoblje početnog odgovora odnosno reakcije kao rezultat elastičnosti, opuštanja i/ili širenja (dilatacije) stijenske mase zbog promjena stanja naprezanja uslijed iskopa [5].

Prilikom provedbe programa za stabilizaciju velikog broja pokosa, najbolje korištenje raspoloživih sredstava često se povezuje s postavljanjem sustavnog programa koji sadrži identifikaciju i ocjenu potencijalnog hazarda klizanja, tj. inventar nestabilnih područja s pripadajućom razinom opasnosti. Tada se mogu zakazati radovi na stabilizaciji u određenim vremenskim razdobljima, pri čemu najopasnija mjesta imaju najveći prioritet.

Slika 23. pokazuje primjer kako jedan takav program može biti strukturiran. Cilj programa prikazanog na Slici 23. je proaktivnost u identificiranju i stabiliziranju stijenskih pokosa prije nego se slom dogodi. To zahtijeva pažljivo ispitivanje svake lokacije kako bi se identificirale potencijalne opasnosti, te procijenila korist, odnosno utjecaji stabilizacije [2].

Kako je vidljivo iz Slike 23., prvi korak je priprema inventara nestabilnih pokosa i pripadajuće razine hazarda klizanja. Zatim se svaki pokos rangira prema prioritetu opasnosti kako bi se odredile najvažnije lokacije za stabilizaciju. Nakon toga, odabiru se lokacije sa najvećim prioritetom kako bi se obuhvatile za program godišnje sanacije. Kada su lokacije odabrane, potrebno je odabrati najbolju metodu stabilizacije za svaku od lokacija. Nakon odabira metoda, radovi na projektima stabilizacije svake od lokacija mogu početi. Naravno,

uvijek valja imati u vidu promjene uvjeta koje se događaju na terenu kako projekt napreduje, te se nužno prilagoditi svim nastalim promjenama i sukladno tome, kao slijedeći korak, ažurirati prije prikupljene podatke. Zadnji korak je preispitati opasnosti, te se vratiti natrag na treći korak za program godišnjih (periodičnih) stabilizacija.



Slika 23. Stabilizacija stijenskog pokosa za transport (modificirano iz [2])

Analiza potencijalne lokacije koja se treba sanirati može se pojednostavljeno objasniti kroz slijedeće korake:

- 1) poredati pokose prema stupnju hazarda, te identificirati najopasnija mjesta.
- 2) povezati učestalost nestabilnosti stijena s faktorima kao što su vremenski uvjeti, vrsta stijene i lokacija.
- 3) procijeniti ozbiljnost pojave nestabilnosti stijena iz analize proteklog vremena od zatvaranja prometnice uslijed odrona.
- 4) procijeniti učinkovitost stabilizacijskih mjera iz godišnjeg broja pojava nestabilnosti.

Pokazalo se kako je odabir prioriteta pri stabilizaciji nužan, jer se kroz vrijeme stabilnost stijenskih pokosa narušava, odnosno smanjuje, stoga je potrebno utvrditi lokacije koje su najkritičnije te ih prioritarno sanirati, a zatim nastaviti sa ostalima. Također, osim liste prioriteta važne su i periodične provjere, tj. monitoring tijekom vremena.

Tablica 1. prikazuje primjer kriterija koji se mogu koristiti prilikom procjene stanja i utvrđivanja prioriteta [2].



Tablica 1. Procjena prioriteta i nužne mjere (modificirano iz [2])

| Stupanj<br>zahtjevnosti | Nužne mjere  |                                 |  |                                  |                        |
|-------------------------|--|---------------------------------|--|----------------------------------|------------------------|
|                         | Ograničeno<br>vrijeme;<br>obraditi unutar<br>1 mjeseca | Obraditi u<br>tekućoj<br>godini | Inspekcija<br>nakon<br>provedenog<br>zahvata | Obraditi<br>unutar<br>1-2 godine | Mjere nisu<br>potrebne |
| Hitno                   | ×  |                                 | ×  |                                  |                        |
| Prioritet               |  | ×                               | ×  | ×                                |                        |
| Promatranje             |  |                                 |  |                                  | ×                      |
| U redu                  |  |                                 |  |                                  | ×                      |

Iz Tablice 1. slijede procjene prioriteta kao:

- a) hitne – očiti nedavni pomaci ili odroni, dovoljno veliki blokovi da predstavljaju opasnost, vremenski čimbenici su ključni za stabilnost. Slom je moguć unutar nekoliko mjeseci.
- b) prioritetne – vjerojatni pomaci od zadnjeg pregleda stijenske mase, dovoljno veliki blokovi da predstavljaju opasnost. Slom otprilike moguć unutar dvije godine.
- c) promatrajuće – mogući nedavni pomaci, ali nema vidljive nestabilnosti. Provjeriti specifične uvjete stabilnosti tijekom iduće inspekcije.
- d) u redu – nema vidljivih pomaka

Dok se za nužne mjere koriste slijedeći izrazi:

- a) ograničena mjera, poduzeti mjere unutar jednog mjeseca
- b) poduzeti mjere unutar tekuće godine
- c) naknadi pregled
- d) poduzeti mjere unutar jedne do dvije godine
- e) nije potrebno poduzeti mjere

### 3.1. Metodologija monitoringa stabilnosti pokosa

Monitoring stijenskih pokosa može se provoditi kao preventivna mjera tj. dio sustavnog praćenja u svrhu uspostave mjera stabilizacije, ali može predstavljati i kontrolu nakon implementacije mjera stabilizacije kroz aktivno projektiranje ili metodu opažanja.

U postavljanju programa praćenja kretanja korisno je imati razumijevanje tipa kretanja koje se događa. Takva informacija može se koristiti za odabir odgovarajućih instrumenata za ispitivanje lokacije i pomoći pri tumačenju rezultata. Na primjer, ako se u kosini razvija slom

prevrtanjem, u pukotinu bi se postavili senzori koji bi pružili direktnu vrijednost horizontalnog pomaka.

Dok, ako bi se postavio inklinometar, moguće je kako ne bi obuhvatio potrebnu dubinu u kojoj se događa pomak, što bi rezultiralo pogrešnim očitanjima. Nadalje, vrsta kretanja je povezana s mehanizmom sloma te se ta informacija može koristiti kako bi se osigurala odgovarajuća analiza stabilnosti [2].

Monitoring deformacija objekata i terena tijekom pojave klizanja moguće je ostvariti koristeći

različite sustave i tehnike koje se prema Savvaidisu [6] mogu podijeliti na:

1. daljinska opažanja ili satelitske tehnike,
2. fotogrametrijske tehnike,
3. geodetske tehnike,
4. geotehničke ili fizičke tehnike.

Izbor instrumenata i metoda mjerenja i kreiranja sustava monitoringa ovisi o različitim tipovima deformacija koje utječu na odabir metode analize stabilnosti te posljedično na projekt monitoringa deformacija.

### *3.1.1. Daljinska opažanja ili satelitske snimke*

Tehnike daljinskog opažanja mogu se ubrojiti tehnike opažanja uz pomoć satelitima, tehnike opažanja LiDAR tehnologijom, ali i fotogrametrijske tehnike koje su izdvojene kao posebna kategorija. Satelitske optičke snimke visoke prostorne rezolucije koriste se za izradu karti klizišta i za kartiranje različitih faktora nestabilnosti (morfologija terena, značajke strukture i litologije, pokrivača te promjene ovih faktora u vremenu). Satelitski podaci uobičajeno nadopunjuju fotografije snimljene iz zraka i mogu se koristiti ukoliko takve fotografije nisu dostupne. Osim toga, primjene satelitskih snimki pri zoniranju hazarda u regionalnim ili nacionalnim razmjerima predstavlja ekonomičniji odabir. Daljinsko opažanje satelitima omogućuje ponavljanje opservacija [7].

Danas postoje razvijene tehnike monitoringa bazirane na radarskim mjerenjima sa satelita ili zemaljskih stanica (eng. *Synthetic Aperture Radar ili SAR*) bez potrebe definiranja referentnih točaka na terenu. Ovim metodama se mjeri ukupna količina energije koja se vrati

do radara nakon interakcije s površinom Zemlje. Radarska interferometrija (eng. *Interferometric SAR ili InSAR*) pruža mogućnost praćenja i bilježenja relativnih pomaka na pokosima usporedbom setova snimki snimljenih različitih datuma (ponavljanje opservacija). Ova tehnologija koristi dvije antene postavljene vertikalno i horizontalno na satelit pri čemu jedna antena odašilje signal te obje antene primaju povratni signal iz čega se formiraju dvije slike [7].

### 3.1.2. Fotogrametrijske tehnike

Fotogrametrijske tehnike efikasne su pri monitoringu aktivnih klizišta i analiziranju brzine prirasta deformacije. Ove tehnike omogućuju određivanje površinskih pomaka tijekom dužeg

vremenskog perioda usporedbom odgovarajućih setova fotografija. Fotogrametrija je znanost i tehnologija dobivanja podataka o karakteristikama terena i objektima na Zemlji na osnovi fotografija snimljenih iz zraka ili s tla. Glavne prednosti korištenja fotogrametrije su ušteda vremenskih resursa, kontinuiranost trodimenzionalnih koordinata, praćenje neograničenog broja točaka te visoka preciznost. Snimke se mogu dobiti različitim kamerama i fotoaparatom montiranim na satelite, avione, helikoptere, ali i sa zemlje (fiksirani senzori). Interpretiranje zračnih fotografija pokazalo se kao efikasna tehnika za identificiranje i određivanje granica klizišta. Iz zračnih fotografija moguće je utvrđivati relacije između površinskih drenažnih tokova, topografije, položaja objekata i dr. Formacije stijena i tla moguće je vrednovati iz zračnih fotografija. Softverskom obradom stereo parova snimljenih fotografija moguće je generirati oblake točaka te je usporedbom zračnih fotografija i oblaka točaka snimljenih na razne datume moguće pratiti progresivni razvoj klizišta [6].

Terestrička fotogrametrija i fotografije snimljene na terenu također se koriste za monitoring klizišta u lokalnim razmjerima. Lokacije koje su prestrme ili premale kako bi se kvalitetno opažale iz zraka pogodnije je opažati na terenu. Terestrička fotogrametrija efikasna je u primjeni na opasnim i nedostupnim lokacijama. U preciznoj fotogrametriji koriste se specijalne kamere poput kamere kombiniranih s teodolitima (fototeodoliti) ili stereokamera. Preciznost fotogrametrijskog pozicioniranja sa specijalnim kamerama ovisi uglavnom o preciznosti određivanja koordinata na fotografijama i mjerilu fotografija. Korištenjem kamere s  $f = 100$  mm na udaljenosti  $S = 100$  m, preciznosti koordinata  $10 \mu\text{m}$ , koordinate

točaka objekta mogu se odrediti s preciznošću od 10 mm. Kao i kod zračnih fotografija, moguće je vršiti fotogrametrijska mjerenja kako bi se dobili kvantitativni podaci ili vršiti interpretacije u svrhu dobivanja geotehničkih informacija. Tehnika ima prednost pred konvencionalnim metodama opažanja ukoliko je lokacija nedostupna, nema dovoljno vremena ili se promjene na lokaciji moraju monitorirati duže vrijeme. Kod terestričke fotogrametrije fotografiranje se može vršiti tijekom dužeg vremenskog perioda uz manje troškove u odnosu na zračne tehnike gdje se vremenska pokrivenost teže postiže zbog ekonomskog faktora [6].

### 3.1.3. Geodetske tehnike

Terestričke geodetske metode koriste razne mjerne instrumente i metode mjerenja za određivanje apsolutnih pomaka. Geodetski senzori prije svakog mjerenja mogu se postavljati na kontrolne točke ili mogu biti trajno postavljeni na kontrolne točke i vršiti mjerenja kontrolnih točaka uz navođenje računalom. Konvencionalne terestričke geodetske metode koriste se za monitoring deformacija objekata i klizišta.

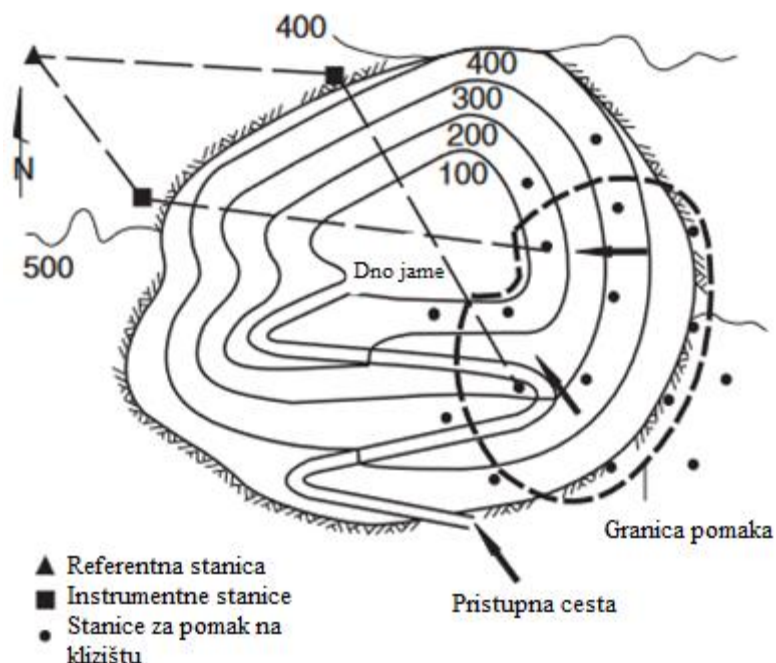
U primjeni su dva osnovna načina opažanja pomaka:

1. horizontalna ili vertikalna kontrolna mreža generira se na razmatranom području s kontrolnim točkama lociranim u regiji koja se deformira,
2. totalna stanica (slika 24.) koristi se kako bi se izmjerili kutovi i udaljenosti do kontrolnih točaka (prizmi ili reflektora) lociranih na pokosu.

U oba slučaja, cilj je izračun koordinata promatranih točaka i/ili visina za svako mjerenje. Usporedbom koordinata i/ili visina iz dva uzastopna mjerenja moguće je odrediti horizontalne i/ili vertikalne vektore pomaka svake kontrolne točke [6].

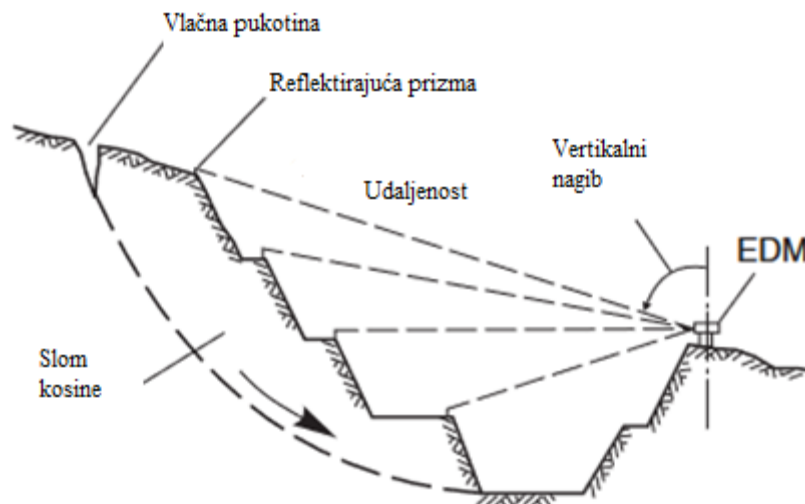
Na velikim klizištima gdje je pristup pokosu opasan i/ili postoji potreba za učestalim preciznim mjerenjima sa brzom obradom podataka, mjerenje korištenjem EDM-a (elektronički mjerač udaljenosti) je najpraktičnija oprema za monitoring na takvoj lokaciji [8]. Obično postoje tri komponente mjernog sustava (Slika 24.). Prvo, potrebna je jedna ili više referentnih točaka na stabilnom tlu. Drugo, niz mjernih instrumenata postavljenih na donekle stabilnom tlu na lokacijama sa kojih je pokos vidljiv. Ako je potrebno izmjeriti koordinate pozicija na kojima su postavljeni mjerni instrumenti, tada instrumenti trebaju biti postavljeni tako da otprilike aproksimiraju oblik trokuta.

Treće, niz mjernih instrumenata postavljenih tik izvan obuhvata klizišta, koji se zatim lociraju u odnosu na mjerne stanice. Poželjno je da smjer mjerenja bude u vjerojatnom smjeru kretanja pomaka, tako da su očitavanja udaljenosti približna stvarnom pokretu pokosa.



Slika 24. Raspored mjernih stanica prilikom mjerenja [2]

Raspored mjerenja prikazan na slici 24. može se koristiti za mjerenje bilo koje željene frekvencije ili razine točnosti. Na primjer, za pokose kod kojih postoji spori pomak, očitavanja se mogu vršiti svakih nekoliko tjedana ili mjeseci, dok se za pokos sa brzim pomakom kao npr. kod aktivnog miniranja, može se postaviti automatizirani sistem koji bilježi serije očitavanja u zadanim intervalima, te ih nakon toga ispisuje. Također, brze provjere stabilnosti mogu se napraviti mjerenjem udaljenosti nakon kojih slijedi triangulacija izmjerenih vrijednosti kako bi se odredile koordinate svake od mjernih stanica u manje čestom intervalu. Slika 25. prikazuje mjerenje vertikalnog kuta otklona, dok mjerenje udaljenosti pokosa omogućuje mjerenje vertikalnog pomaka koji se koristi pri određivanju mehanizma sloma [2].



Slika 25. Mjerenje kuta otklona i udaljenosti pomoću EDM uređaja [9]

Drugi način opažanja pomaka koji je noviji i u današnjici se češće koristi je opažanje pomaka totalnom stanicom. Klasičan izgled totalne stanice prikazan je na Slici 26.



Slika 26. Totalna stanica [39]

Sustavi totalnih stanica mogu se programirati za automatsko traženje seta prizmi u nizu, u određenim vremenskim intervalima, mogu mjeriti udaljenosti, horizontalne i vertikalne nagibe i mogu emitirati podatke do uredskog računala telemetrijskom vezom. Glavna prednost korištenja totalnih stanica je ta da pružaju informacije o trodimenzionalnim koordinatama točaka mjerenja. Jedna od mana je potreba za neometanom linijom vidljivosti

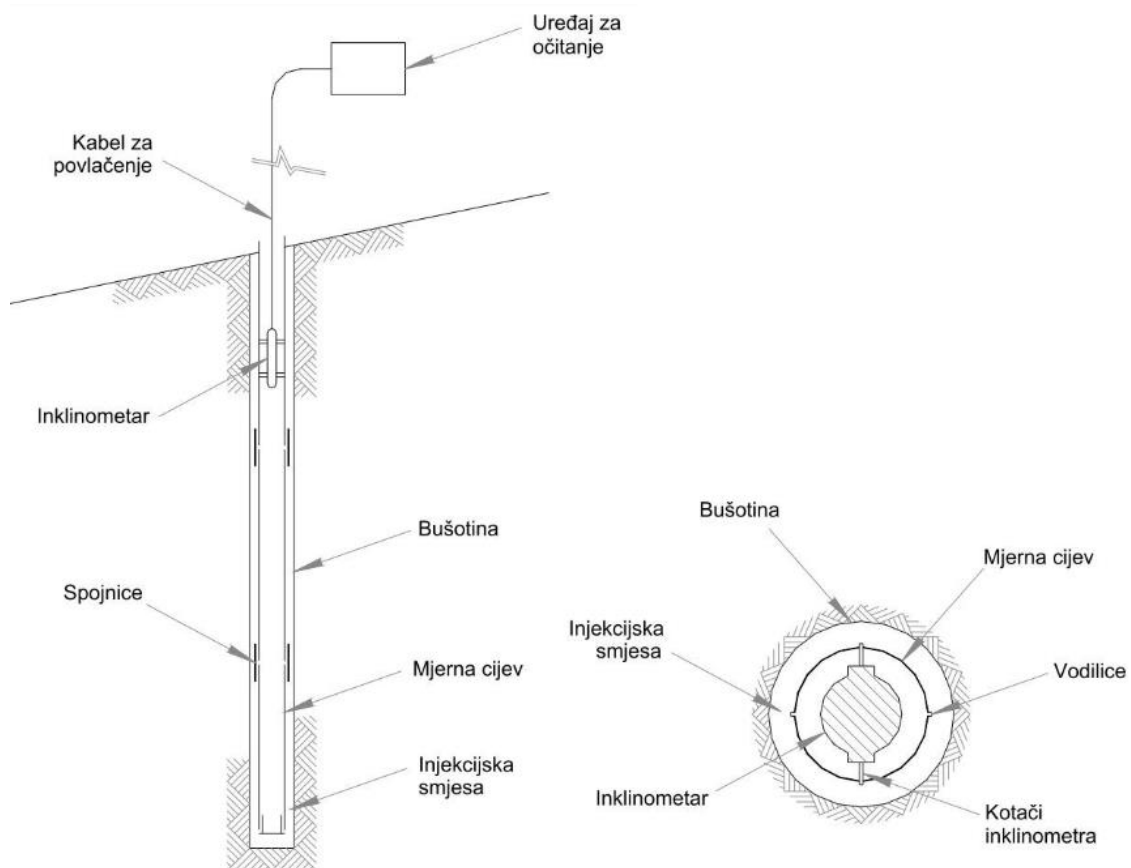
između instrumenta i prizme. Druga mana je da greške vertikalne refrakcije mogu reducirati preciznost informacije o visini, koju je moguće odrediti iz mjerenja totalne stanice. Potrebno je naglasiti da su elektronički instrumenti totalne stanice znatno zamijenili starije instrumente i tehnologije, kao što su teodoliti i EDM instrumenti, u mnogo primjena opažanja [6].

#### *3.1.4. Geotehničke ili fizičke tehnike*

Geotehničke tehnike koriste instrumente koji rade kontinuirano i instaliraju se na ili unutar promatrane geotehničke cjeline. Ovim tehnikama mogu se kontinuirano mjeriti promjene u geometriji i/ili fizičkim karakteristikama elementa koji se deformira (dobivanje relativnih deformacija). Također, mogu se integrirati s telemetrijskim sustavom za prijenos izmjerenih podataka u kontrolni centar u realnom vremenu. Glavni geotehnički senzori koji se koriste za monitoring deformacija uključuju: ekstenzometre, inklinometre, pjezometre, mjerne ćelije, geofone, klinometre (tiltmetre) i dr. Geotehnički senzori ili prikupljaju izmjerene podatke koji se naknadno preuzimaju, ili se izmjereni podaci automatski prenose do umreženog računala.

Povezivanje na računalo pruža prednosti kao što je pohrana podataka na udaljenoj lokaciji i mogućnost promjene brzine podataka mjerenja. Nedostaci povezivanja na računalo uključuju potrebu za prijenosnim medijem potrebnim za prenošenje podataka sa senzora na računalo (kabel/radio/GSM) i gubitak podataka ukoliko prijenosni medij ne radi. Geotehnički senzori pružaju mjerenja koja su često nužna prilikom monitoringa deformacija. Dodatna kategorija senzora, koja upotpunjuje portfolio senzora za monitoring deformacija, koja pruža njihova vlastita analizirana mjerenja ili mjerenja za kalibriranje dodatnih senzora, su meteorološki senzori [3].

Inklinometri su instrumenti idealno prilagođeni za dugotrajno, precizno praćenje položaja bušotina cijelom dužinom. To je uređaj koji mjeri deformacije okomite na os cijevi kroz koju prolazi mjerna sonda. Uređaj sadrži senzor koji mjeri otklon njegove osi od vertikale. Inklinometarska cijev se ugrađuje u bušotinu, a prostor između cijevi i stijene se injektira cementno-bentonitnom injekcijskom smjesom [3]. Komponente inklinometra su plastično kućište s četiri uzdužna utora izrezana u unutarnjoj strani i sonda koja se spušta niz kućište povezana električnim kabelom sa oznakom dubine (Slika 27.).



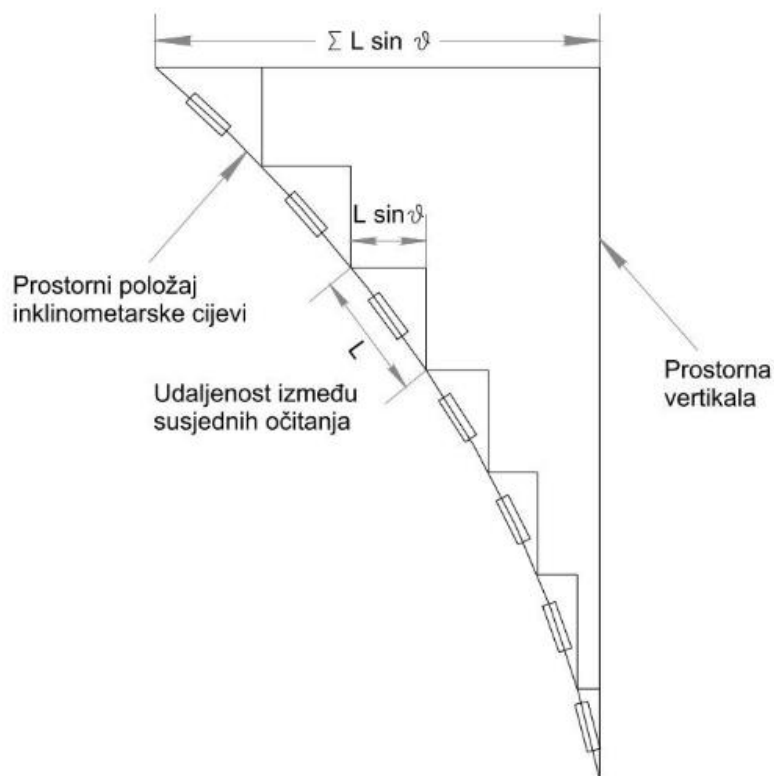
Slika 27. Inklinometar [10;11]

Izradom niza očitavanja tijekom vremena, također je moguće praćenje brzine kretanja pomaka.

Sonda sadrži dva akcelerometra, poravnata tako da mjere nagib sonde u dva međusobno okomita pravca. Sonda je također opremljena parom kotača koji prolaze kroz utore u kućištu i održavaju rotacijsku stabilnost sonde. Prvi zahtjev za točnim praćenjem je produljiti bušotinu ispod dubine pomaka tako se da očitavanja od kraja bušotine prenose na stabilnu bazu. Mjere predostrožnosti također su potrebne tijekom ugradnje kućišta kako bi se održalo vertikalno poravnanje utora i spriječilo izvrtanje. Očitavanja se vrše spuštanjem sonde do kraja bušotine i zatim podizanjem u koracima jednakim duljini međuosovinskog razmaka ( $L$ ) sonde. Na svakom povećanju dubine mjeri se nagib  $\psi$ .

Slika 28. prikazuje postupak za izračunavanje pomaka za svaki prirast i ukupni pomak na vrhu bušotine ( $L \sin \psi$ ). Provjera rezultata se obično radi rotiranjem sonde za 180 stupnjeva, te se onda bilježe tako očitani rezultati [2].





Slika 28. Princip izračuna otklona iz mjerenja nagiba [10;11]

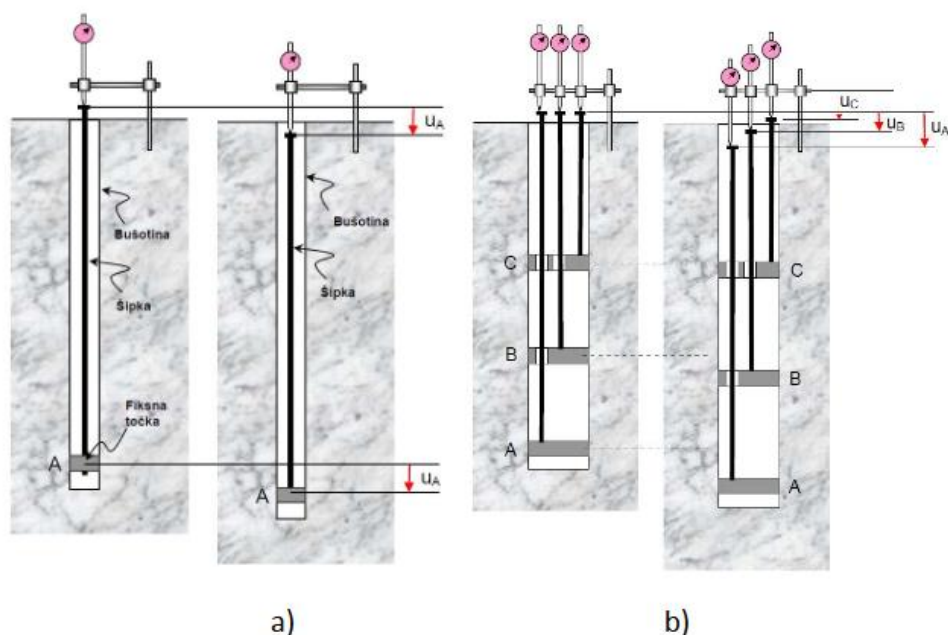
S druge strane, vertikalni ekstenzometri uvijek mjere promjenu razmaka dviju točaka u pravcu bušotine, a inklinometri mjere pomake normale na os cijevi kroz koju prolaze. Samo ime (ekstenzometar) upućuje da su namijenjeni prvenstveno za mjerenje povećanja razmaka dviju točaka (eng. *extension*). Naziv ekstenzometar potiče iz vremena kada su se oni koristili isključivo za mjerenja pomaka unutar građevina gdje se stvarno mogu izmjeriti samo izduženja. Međutim, ekstenzometrom se mogu zabilježiti i skraćivanja.

Prema konstrukciji i principu mjerenja, razlikuju se:

- štapni ekstenzometri (eng. *rod extensometers*),
- žičani ekstenzometri (eng. *wire extensometers*),
- ekstenzometri kod kojih se koristi prenosiva mjerna sonda za mjerenje razmaka fiksnih točaka (eng. *probe extensometers*).

Bez obzira o kom se tipu vertikalnog ekstenzometra radi, mjerenja se uvijek izvode u cijevima koje su ugrađene u prethodno izbušenu bušotinu. Prostor između cijevi i stijenske mase se injektira cementno-bentonitnom injekcijskom smjesom, odgovarajuće konzistencije i čvrstoće nakon stvrdnjavanja. Ekstenzometarska mjerenja (izuzev jednostrukog ekstenzometra) pripadaju skupini tzv. linijskih mjerenja (eng. *linewise measurement*).

Točkasta mjerenja (eng. *pointwise measurement*) dobiju se upotrebom jednostrukog ekstenzometra [3]. Slika 29. prikazuje princip rada jednostrukog (a) i dvostrukog (b) ekstenzometra.



Slika 29. Princip rada a) jednostrukog i b) dvostrukog ekstenzometra [2]

Reflektometrija u vremenskoj domeni još je jedno sredstvo lociranja klizne površine, koja također može mjeriti brzinu pomaka [2]. Ova metoda uključuje injektiranje bušotine putem koaksijalnog kabela koji se sastoji od unutarnjeg i vanjskog metalnog vodiča odvojenih izolacijskim materijalom. Kada se naponski impuls pošalje duž kabela, odrazit će se na bilo kojem mjestu gdje je promjena u udaljenosti između provodnih vodiča. Refleksija nastaje zbog promjene udaljenosti koja mijenja karakterističnu impedanciju kabela. Gibanje klizne ravnine koje uzrokuje savijanje kabela biti će dovoljno za promijeniti impedanciju i tako instrument može otkriti mjesto pomaka.

Primarne prednosti refleksije u vremenskoj domeni su da je kabel jeftin, te se može dopustiti da bude izgubljen prilikom brzo kretajućeg klizanja. Također, očitavanja se mogu izvršiti za nekoliko minuta sa udaljene lokacije ili produženjem kabela na sigurnu lokaciju izvan ravnine klizanja, ili telemetrijom. Mogućnošću daljinskog očitavanja mogu se postići značajne uštede u usporedbi s inklinometrima zbog smanjenog vremena putovanja, a okvir za očitavanje izravno prikazuje pomake bez potrebe za preuzimanjem i obradom rezultata [2].

### 3.2. Analize stabilnosti pokosa

Metode analize stabilnosti koje se koriste pri analiziranju stabilnosti pokosa su:

- metode granične analize
- metode analize granične ravnoteže
- numeričke metode
- probabilističke metode
- empirijski pristup
- fizički modeli

Granične analize stabilnosti podrazumijevaju egzaktno rješenje problema stabilnosti pokosa čije je ponašanje definirano metodama mehanike kontinuuma. Egzaktno rješenje podrazumijeva potpuno zadovoljenje svih uvjeta ravnoteže i kompatibilnosti materijala u svim točkama modela:

- diferencijalnih jednadžbi ravnoteže,
- jednadžbi kompatibilnosti naprezanja i pomaka,
- konstitutivnih jednadžbi ponašanja materijala i
- rubnih uvjeta postavljenog problema.

U metodama analize granične ravnoteže nije u potpunosti zadovoljena niti jedna od osnovnih jednadžbi mehanike kontinuuma koja opisuje ravnotežu, odnos naprezanja i deformacija i konstitutivno ponašanje materijala. Usvaja se postojanje plohe sloma i pretpostavka da je u trenutku sloma na cijeloj kliznoj plohi dosegnuta čvrstoća materijala u trenutku popuštanja. Faktor sigurnosti određen je kao odnos sume sila mogućeg otpora i sume aktivnih sila koje djeluju u pokosu (jednadžba 2) [12].

$$F_s = \frac{\Sigma \text{Sile otpora}}{\Sigma \text{Aktivne sile}} \quad (2)$$

Faktor sigurnosti se u različitim metodama unutar metoda analize granične ravnoteže određuje kao:

- odnos sume sila mogućeg otpora i sume aktivnih sila koje nastoje izazvati klizanje
- odnos naprezanja na plohi sloma i čvrstoće materijala
- odnos parametara čvrstoće na plohi sloma i parametara čvrstoće potrebnih za održanje stabilnosti pokosa
- odnos sume momenata otpora i sume momenata aktivnih sila na plohi sloma

Naziv numeričke metode u analizama stabilnosti pokosa podrazumijeva numeričko modeliranje stanja naprezanja i deformacija u pokosu i numeričke postupke kojima se isto stanje određuje.

Numeričkim analizama potrebno je zadovoljiti rubne uvjete uspostavljenog numeričkog modela, diferencijalne jednačbe ravnoteže, konstitutivne jednačbe materijala te odgovarajuće jednačbe pomaka u zavisnosti od postignutog stanja naprezanja. Kao rezultat analiza u numeričkim modelima dobivaju se vrijednosti stanja naprezanja i deformacija u elementima modela izloženog vanjskim opterećenjima i ograničenog rubnim uvjetima. Faktor sigurnosti može se odrediti iz odnosa naprezanja na plohi sloma i čvrstoće materijala ili korištenjem jedne od metoda analize granične ravnoteže za utvrđeno stanje naprezanja na plohi sloma.

Probabilističke metode polaze od pristupa da su faktori koji utječu na stabilnost pokosa podložni određenim prirodnim varijacijama koje se u idealnim uvjetima mogu uključiti u analize. Za svaki od faktora određuje se funkcija distribucije s kojima se ulazi u usvojeni tip analize. Analiza se provodi odabirom vrijednosti za svaku odabranu funkciju distribucije metodom slučajnih odabira na osnovi čega se određuje faktor sigurnosti za vrlo veliki broj provedenih analiza. Empirijski pristup analize stabilnosti pokosa zasniva se na iskustvima stečenim promatranjem ponašanja zasjeka tijekom izvedbe.

Fizički modeli služe za simulaciju uvjeta ponašanja promatranog pokosa u kontroliranom okruženju pri čemu se uvjeti koji utječu na stabilnost pokosa mogu lako varirati. Također postoji mogućnost ispitivanja i utvrđivanja stanja padine pri kojem se javlja slom u pokosu, a koji može biti odgovarajući pojavi sloma na terenu. Fizički modeli omogućuju prepoznavanje mogućih pojava i mehanizama sloma u kosini, a također služe i za potvrdu ponašanja materijala utvrđenu odgovarajućim numeričkim modelima [12].

### 3.3. Metoda opažanja

Tijekom izvođenja projekta moguća je pojava brojnih nepredviđenih situacija i problema koji se mogu dogoditi i time usporiti dinamiku radova ili u najgorem slučaju u potpunosti zaustaviti izvođenje. Stoga je kod takvih situacija bitno pravovremeno i ispravno reagirati, što je jedino moguće ukoliko postoji razvijen sustav metoda opažanja. Tu metodu je prvi u praksu uveo Terzaghi [13].

U ovom pristupu izgradnja počinje s projektom temeljenim na pretpostavkama o optimističnijim uvjetima u tlu od onih korištenih u konzervativnom klasičnom pristupu, ali uz uvjet da se predvide mjere kojima će se pouzdano utvrditi razlike između stvarnog ponašanja konstrukcije i tla od onog predviđenog inicijalnim projektnim rješenjem, te mjere koje će se poduzeti ako ponašanje konstrukcije izađe iz predviđenih okvira. Dakle, projektiranje se nastavlja tijekom izgradnje. Projekt se prilagođava stvarnom stanju na terenu na temelju opažanja i podataka iz mjernih uređaja [3].

Peck [14] je definirao osam nužnih postavki Metode opažanja:

- 1) istražni radovi dovoljni barem za utvrđivanje opće prirode i svojstava tla, ali ne nužno detaljni,
- 2) procjena najvjerojatnijih prilika u tlu kao i mogućih najnepovoljnijih odstupanja od tih prilika,
- 3) izrada projekta temeljena na radnoj hipotezi o najvjerojatnijim prilikama u tlu,
- 4) izbor veličina koje će se opažati tijekom izvođenja te njihov proračun na temelju radne hipoteze,
- 5) proračun tih veličina za najnepovoljnije prilike u tlu,
- 6) prethodni izbor mjera ili promjena u projektu za svako predvidivo znatnije odstupanje opaženih od predviđenih veličina utvrđenih temeljem radne hipoteze,
- 7) mjerenje veličina kojima će se opažati i vrednovati stvarno stanje
- 8) mijenjanje projekta radi prilagodbe stvarnom stanju

### 3.4. Projekt stabilizacijskih mjera

Projekt stabilizacije stijenskog pokosa uključuje prikupljanje geotehničkih podataka, korištenje odgovarajućih metoda proračuna, provedbu iskopa i mjera stabilizacije/zaštite pogodne za određene uvjete na gradilištu, te po potrebi monitoring. Uz druge inženjerskogeološke značajke, važni su podaci o geološkoj strukturi, koji uobičajeno uključuju orijentaciju diskontinuiteta i njihove karakteristike kao što su duljina, razmak, hrapavost i ispuna. Važni su podaci za pojedine slojeve geotehničkog profila kao što su stupanj ispucalosti, tlačna čvrstoća intaktne stijene stijene, modul deformabilnosti, posmična čvrstoća diskontinuiteta, koeficijent propusnosti i drugi. Podaci o uvjetima podzemne vode

uključuju vjerojatnu razinu podzemne vode unutar pokosa, te su važna informacija za proračun i potrebu za dreniranje.

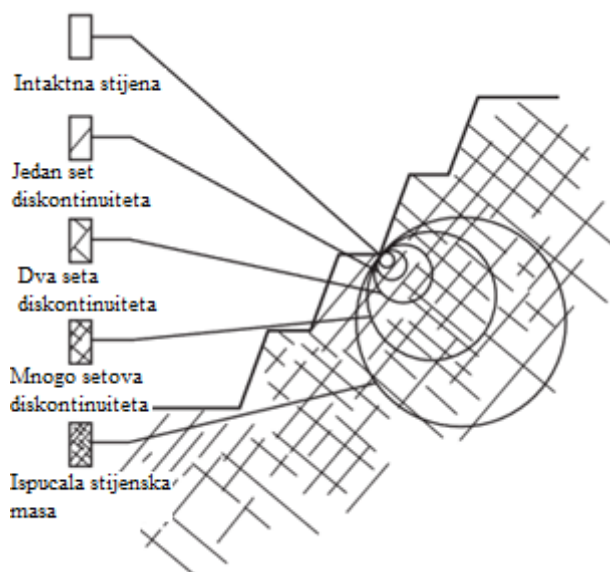
Za mnoge usjeke u stijenskoj masi, naprezanja u stijeni su mnogo manja od čvrstoće stijene, tako da postoji mala vjerojatnost da će se pojaviti slom intaktne stijene. Stoga se kod projektiranja stabilnosti pokosa posebna pažnja obraća na stabilnost blokova formiranih putem diskontinuiteta. Stabilnost stijenskih pokosa često ovisi o strukturnoj geologiji. Strukturna geologija se odnosi na prirodne prekide u stijeni kao što su slojevi, spojevi i rasjedi (pukotine), koji se općenito nazivaju diskontinuiteti. Značaj diskontinuiteta je u tome što su oni slabe točke u usporedbi s mnogo čvršćom intaktnom stijenom, tako da do sloma najčešće dolazi duž ravnina diskontinuiteta. Opća svrha geološkog kartiranja je definirati skup ili skupove diskontinuiteta ili pojedinačne značajke kao što je rasjed, koji će kontrolirati stabilnost na određenom pokosu. Zbog široke raznolikosti uvjeta kao što je lokacija i metoda sanacije, ne smatra se potrebnim izraditi pravila o vrstama i količinama istražnih radova, kao i činjenici da je svaki projekt jedinstven. Jedino opće pravilo koje se odnosi na istražne radove za projektiranje stijenskih pokosa su nužne informacije o geologiji, čvrstoći stijenske mase i podzemnim vodama. Metode monitoringa može se podijeliti na monitoring stabilnosti pokosa, te na površinska mjerenja i na mjerenja ispod površine [2].

Na temelju koncepta stabilnosti pokosa, stabilnost pokosa može se izraziti u jednom ili više pojmova:

- (a) faktor sigurnosti, FS - stabilnost kvantificirana prema graničnoj ravnoteži sila koje djeluju na pokosu, koji je stabilan ako je  $FS > 1$ .
- (b) naprezanje - slom definiran pojavom naprezanja dovoljno velikog da spriječi sigurnu sanaciju pokosa, ili da brzina pomaka nadilazi brzinu iskopa
- (c) vjerojatnost sloma – stabilnost kvantificirana distribucijom vjerojatnosti razlike između sila otpora i sila djelovanja, koje su izražene kao vjerojatnost distribucije.
- (d) LRFD (eng. *load and resistance factor design*) tj. dizajn faktora opterećenja i otpora - stabilnost definirana faktoriziranim otporom koji je veći ili jednak zbroju opterećenja [2].

Danas, faktor sigurnosti (FS) najčešća metoda kod projektiranja stabilnosti pokosa, i postoji veliko iskustvo u njegovoj primjeni za sve vrste geoloških uvjeta, kako za stijene tako i za tla. U analizi stabilnosti stijenskih pokosa, najvažniji faktor koji treba uzeti u obzir je geometrija lica pokosa. Kao što je već rečeno, odnos između orijentacija diskontinuiteta i

iskopanog lica će odrediti hoće li dijelovi stijenske mase slobodno kliziti ili će se prevrnuti. Nakon geologije, sljedeći najvažniji čimbenik koji upravlja stabilnošću je posmična čvrstoća potencijalne klizne površine (plohe). Odabir prave posmične čvrstoće pokosa u velikoj mjeri ovisi o relativnoj skali između klizne površine i strukturne geologije. Na primjer, u pokosu prikazanom na Slici 30., ukupne dimenzije pokosa mnogo su veće od dimenzija postojanih diskontinuiteta, tako da će svaki slom plohe proći kroz ispresjecanu stijensku masu, a prihvatljivi parametar čvrstoće stijene koji bi se koristio kod takve situacije je parametar od stijenske mase [2].



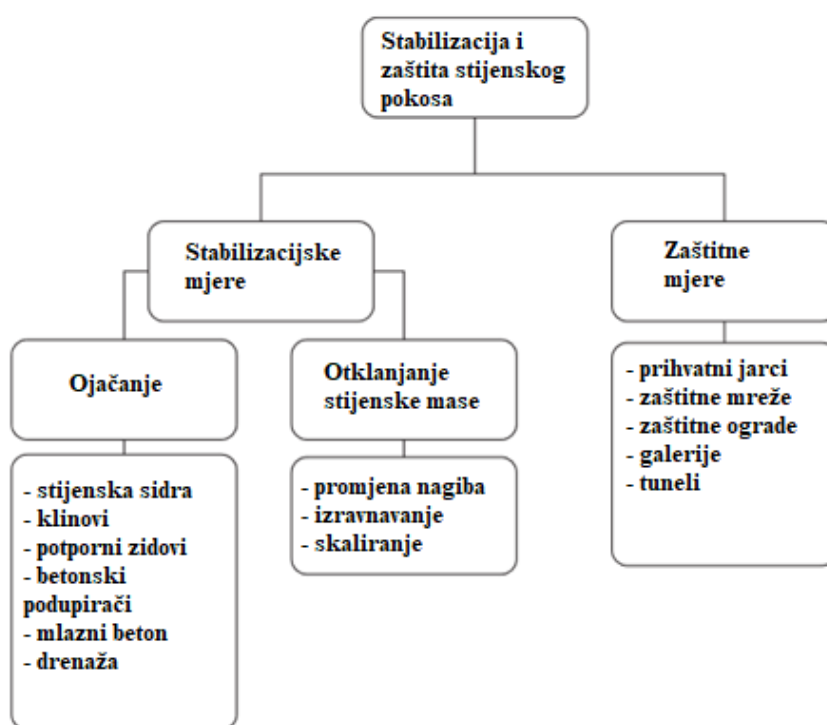
Slika 30. Idealizirani prikaz prelaska sa intaktne stijene na ispucalu stijensku masu sa povećanjem veličine uzorka [2]

Nasuprot tome, visina kampada je otprilike jednaka duljini skupa diskontinuiteta tako da stabilnost može biti kontrolirana jednim skupom diskontinuiteta, a odgovarajući parametar koji je potrebno definirati je posmična čvrstoća diskontinuiteta. Konačno, na razini promatranja manjoj od razmaka skupova gdje se javljaju blokovi intaktne stijene kao element čiju je čvrstoću potrebno definirati, npr. kod bušenja [2].

Mjere stabilizacije koje se uobičajeno koriste pri sanaciji i zaštiti stijenskih pokosa detaljno su opisane u idućem poglavlju.

#### 4. STABILIZACIJA I ZAŠTITA STIJENSKOG POKOSA

Slika 31. uključuje 16 uobičajenih mjera stabilizacije podijeljenih u dvije glavne kategorije, mjere stabilizacije i mjere zaštite. Pri korištenju mjera stabilizacije postoje dva smjera kojima se može krenuti, ovisno o specifičnim značajkama situacije. Prema tome, kao mjera stabilizacije može se koristiti ojačanje stijenske mase ili uklanjanje stijenske mase (promjena nagiba, izravnavanje, skaliranje). Kada se situacija može kontrolirati i nije toliko kritična, tada se mogu koristiti mjere zaštite. Izvode se razne mjere specifične za svaku lokaciju, kojima se može osigurati sigurnost ljudi i imovine, ali i cijele okoline općenito.



Slika 31. Kategorije stijenskih pokosa i mjera stabilizacije (modificirano iz [2])

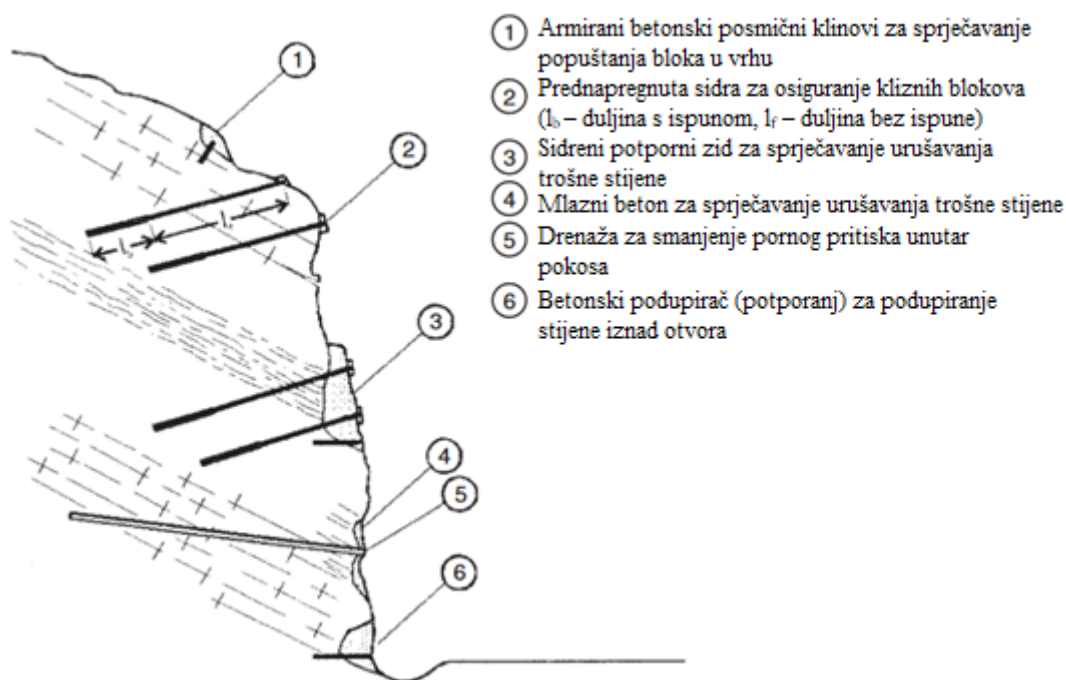
Pri izboru i projektiranju mjera stabilizacija koje su prikladne za lokaciju, uzimaju se u obzir geotehničke, geološke, građevinske i okolišne značajke i ograničenja. Najvažnije geotehničke značajke koje utječu na analize stabilnosti i projektiranje jesu inženjerska geologija, čvrstoća i deformabilnost stijenske mase te uvjeti podzemne vode. Prilikom projektiranja važno je u obzir uzeti okolnosti izgradnje, mogućnosti pristupa lokaciji strojevima, blizinu odlagališta viška materijala iz iskopa, mogućnosti zatvaranja ili preusmjerenja prometa za vrijeme gradnje, troškove rada i drugo. Kod manjih projekata, projekt skaliranja uklonit će najlabavije stijene na strani padine, međutim, treba voditi računa da stijena može biti osjetljiva na atmosferilije što u konačnici može dovesti do ponovne



pojave nestabilnosti i ponovne potrebe za stabilizacijom kroz kraći vremenski period. Alternativno, ukoliko se izvedu opsežnije mjere pomoću mlaznog betona i spajanja sidrima, uz skaliranje. Iako je inicijalni trošak takvog rješenja veći, bio bi učinkovit dulje razdoblje, pa možda i do 20-30 godina. Prilikom analize rješenja i pri donošenju odluka, u proračun je potrebno uzeti u obzir obuhvat, troškove i projektirani vijek stabilizacije, kao i vjerojatnost potencijalnih odrona koji bi mogli uzrokovati nesreće i njihovu cijenu otklanjanja [17;18;19].

#### 4.1. Stabilizacija ojačanjem stijene

Slika 32. prikazuje niz tehnika stabilizacije, tj. ojačanja stijenskog pokosa koje se mogu primijeniti za osiguranje potencijalno nestabilne stijene na licu stijenskog usjeka.



Slika 32. Metode stabilizacije stijenskog pokosa [15]

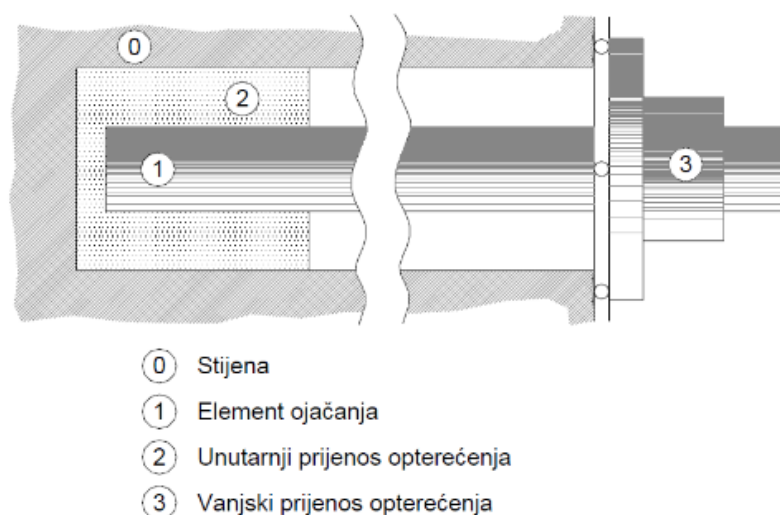
Zajedničko obilježje svih prikazanih tehnika je da minimiziraju opuštanje i pomicanje blokova ili konture stijenske mase prema području iskopa. Nakon što je inicijalno dopušteno opuštanje ili razrahljenje stijenske mase, postoji gubitak međusobnog povezivanja između blokova stijena i značajno smanjenje posmične čvrstoće. Proces razrahljenja i opuštanja stijenske mase nije povratan. Iz tog razloga, ojačanje stijenskih pokosa najučinkovitije je ako se postavlja prije iskopa.

### 1) Armirani betonski posmični klinovi

Armirani betonski klinovi pružaju potporu za blokove stijene debljine do oko metar, kao i zone rastresite i trošne stijene na vrhu pokosa. Koriste se posmični klinovi gdje je stabilnost ograničena veličinom blokova i kako bi se spriječilo klizanje i labavljenje razlomljene, slabe stijene. Posmični klinovi sastoje se od armaturnog čelika promjera oko 25–32 mm i duljine od oko 1000 mm potpuno usidrenih u rupe dubine oko 500–750 mm koje su izbušene u stabilnoj stijenskoj masi. Rupe se nalaze blizu vrha stijene koju treba poduprijeti, i udaljeni su oko 500-1000 mm, ovisno o potrebnoj stabilizaciji. Duljine armature promjera oko 6-8 mm postavljaju se vodoravno i pričvršćuju na okomite šipke. Konačno, armaturni čelik se potpuno prekriva u mlazni beton ili beton izliven u bliskom kontaktu sa stijenom. Potpora koju pruža klin za smicanje je jednaka čvrstoći na smicanje okomitih čeličnih šipki, i koheziji kameno-betonske površine lica [2].

### 2) Stijenska sidra

Štapna sidra i geotehnička sidra predstavljaju sustave ojačanja, pri čemu se sustav ojačanja sastoji od četiri osnovna elementa prikazanih na Slici 33. [16]. Pritom, važno je naglasiti, kako je na Slici 33. i prikazano, stijenska masa čini nulti, odnosno osnovni i najvažniji nosivi element ovog sustava ojačanja.



Slika 33. Osnovni elementi sustava ojačanja stijenske mase [10;16]

Kombinacija štapnih sidara i mreža i/ili mrežama ojačanog mlaznog betona predstavljaju optimalni podgradni sustav za stabilizaciju stijenske mase, kako za privremene, tako i za trajne podgradne konstrukcije. Postoji cijeli niz razloga za upotrebu ojačanja stijenske mase štapnim sidrima, od kojih su najznačajniji slijedeći [17]:

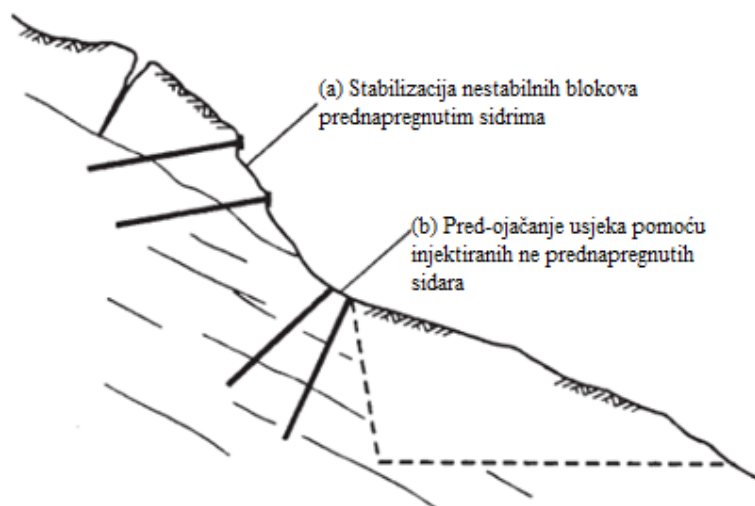
- Svestrana mogućnost uporabe, za bilo koju odabranu geometriju iskopa.
- Jednostavnost i brza mogućnost uporabe.
- Relativno mala cijena u odnosu na druga moguća rješenja.
- Ugradnja je u većoj mjeri ili u potpunosti mehanizirana.

Podjela na grupe štapnih sidara može se izvršiti prema različitim načinima sidrenja [17].

Pri tome se mogu razmatrati slijedeće grupe štapnih sidara:

- mehanički usidrena štapna sidra,
- injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti i
- trenjem usidrena štapna sidra.

Tipične primjene stijenskih sidara, kao što je prikazano na slici 32., stavke 2 i 3, služe za sprječavanje klizanja blokova ili klinova stijene na diskontinuitetima koji izlaze iz lica. Važno je napomenuti da je primarna funkcija stijenskih sidara modificiranje normalne i posmične sile koje djeluju na kliznim ravninama, umjesto da se oslanjaju na posmičnu čvrstoću čelika gdje sidro poprečno prolazi kroz istu ravninu. Stijenska sidra mogu biti potpuno injektirana i ne prednapregnuta (pasivna), ili usidrena prednapregnuta (aktivna). Slika 34. prikazuje ta dva tipa stijenskih sidara.



Slika 34. Ojačanja stijenske mase: a) prednapregnuto sidro; b) potpuno usidreno pasivno sidro [15]

Prednosti ne prednapregnutih sidara je njihova niža cijena i brža instalacija u usporedbi s prednapregnutim sidrima. Prednapregnuta sidra se postavljaju poprijeko kroz potencijalnu kliznu plohu, te se pričvršćuju u stabilnu stijensku masu. Primjena vlačne sile u sidru, koja

se prenosi u stijenu reakcijskom pločom na površini stijene, dovodi do kompresije u stijenskoj masi i modificira normalna i posmična naprezanja na kliznoj površini lica. Nakon što je određena sila i orijentacija bušotine za sidra, instalacija sidara provodi se kroz idućih devet koraka [18;19;20;21;22;23]:

Korak 1: Bušenje - odrediti promjer i dužinu bušotine koja se može izbušiti na gradilištu na temelju raspoložive opreme i pristupa.

Korak 2: Materijali i dimenzije sidara - odabrati materijale sidra i dimenzije koje su kompatibilne s promjerom otvora i potrebne sile sidrenja.

Korak 3: Korozija - procijeniti korozivnost lokacije na kojoj se radovi izvode i primijeniti odgovarajuću razinu zaštite sidara od korozije.

Korak 4: Vrsta veze - odabrati cement ili drugo vezivo ili mehaničko sidro za pričvršćivanje kraja sidra u bušotinu. Čimbenici koji utječu na ovu odluku uključuju promjer bušotine, vlačno opterećenje, duljina sidra, čvrstoća stijene i brzina ugradnje.

Korak 5: Duljina veze – odabire se na temelju vrste otvora, promjera bušotine, napetosti sidra i čvrstoće stijene.

Korak 6: Ukupna duljina sidra - izračunati ukupnu duljina sidra, što čini ukupna dužina veze i duljina slobodnog naprezanja. Slobodna duljina naprezanja treba se protezati od površine stijene do vrha zone veze, s vrhom veze koji je ispod potencijalne klizne ravnine.

Korak 7: Uzorak sidra – postaviti sidra tako da su jednako razmaknuta na licu i tako da pružaju potrebnu ukupnu silu sidrenja.

Korak 8: Rupe za hidroizolaciju – provjeriti da nema diskontinuiteta u zoni vezanja na koju bi se moglo javiti curenje injekcijske smjese, ukoliko je potrebno zakrpati rupu injekcijskom smjesom i ponovnim bušenjem.

Korak 9: Testiranje – postaviti testnu proceduru kojom će se potvrditi da izvedeno stanje može podnesti potrebno opterećenje

### 3) Sidreni potporni zid

Ako se koriste prednapregnuta sidra za podupiranje dijela padine, ispucala stijenska masa može se degradirati i urušiti uslijed reakcije površina koje su usidrene, te je moguć gubitak vlačne sile u sidrima. U takvim okolnostima, može se izvesti armirano betonski zid kako bi se pokrila površina raspucale stijenske mase, a zatim bušotine u zidu u koje se postavljaju stijenska sidra. Konačno, tako postavljena sidra se prednapinju i postavljaju uz lice zida. Zid djeluje i kao zaštita od lomljenja stijene i kao velika reakcijska ploča za sidra. Budući da je svrha zida distribucija sila u sidrima na stijensku masu, ojačanje zida bi trebalo biti

projektirano tako da nema pukotina u betonu ispod koncentriranih opterećenja u glavi sidra. Također, vrlo je bitno da postoji neka vrsta drenaže za odvod vode kako bi se spriječilo stvaranje pritiska vode iza zida [2].

#### 4) Mlazni beton

Konstrukcije od mlaznog betona i druge podgradne konstrukcije u pravilu imaju ulogu prijenosa točkastog opterećenja sidara na širu površinu stijenske mase (Slika 35.).



Slika 35. Nanošenje mlaznog betona na stijenski pokos [3]

Na koji će način mlazni beton sudjelovati u stabiliziranju stijenske mase (kao element armiranja ili kao element podgrađivanja) ovisi o njegovoj debljini [3]. Mlazni beton se pneumatski nanosi, fini agregatni mort se obično stavlja u slojevima debljine 50–100 mm, a često se armira za poboljšana vlačna i posmična čvrstoća [24]. Zone jako raspucale stijenske mase mogu se zaštititi nanošenjem sloja mlaznog betona na lice stijene. Mlazni beton kontrolirati će i pad malih blokova stijena, kao i progresivno urušavanje koje bi na kraju moglo stvoriti nestabilnosti. Međutim, mlazni beton pruža malu sigurnost protiv klizanja za cjelokupni pokos; njegova primarna funkcija je površinska zaštita. Još jedna komponenta ugradnje mlaznog betona je osiguranje odvodnih rupa, tj. cijevi (drenaže) za sprječavanje nakupljanja pritiska vode iza lica pokosa.

#### 5) Drenaža

Podzemna voda u stijenskom pokosu često je primarni ili dodatni uzrok nestabilnosti, stoga smanjenje pritiska vode obično poboljšava stabilnost. Metode kontroliranja pritiska vode uključuju ograničavanje površinske infiltracije, i bušenje vodoravnih drenažnih rupa ili kanala na vrhu padine kako bi se stvorili otvori za vodu. Odabir najprikladnijeg rješenja za

pojedinu lokaciju ovisit će o faktorima kao što su intenzitet oborine, topljenje snijega, nepropusnosti stijenske mase [2].

#### 6) Betonski podupirač

Kada dođe do odrona ili urušavanja uslijed vremenskih utjecaja, može biti nužno izvesti betonski potpornjak kako bi se spriječilo buduće urušavanje. Podupirač ispunjava dvije funkcije: prvo, zadržati i zaštititi područja slabe stijene, i drugo, za podupiranje. Treba biti dizajniran tako da je u sprezi sa djelovanjem ostalih mjera stabilizacije. Na ovaj se način eliminiraju momenti savijanja i sile prevrtanja, i nema potrebe za većim ojačanjima već izvedenog betona ili sidara. Podupirač treba spriječiti opuštanje stijene, stoga bi trebao biti utemeljen na čvrstoj stijenskoj masi. Ako površina nije pod pravim kutom prema smjeru potiska, tada bi oslonac trebalo pričvrstiti na bazu čeličnim klinovima kako bi se spriječilo klizanje [2].

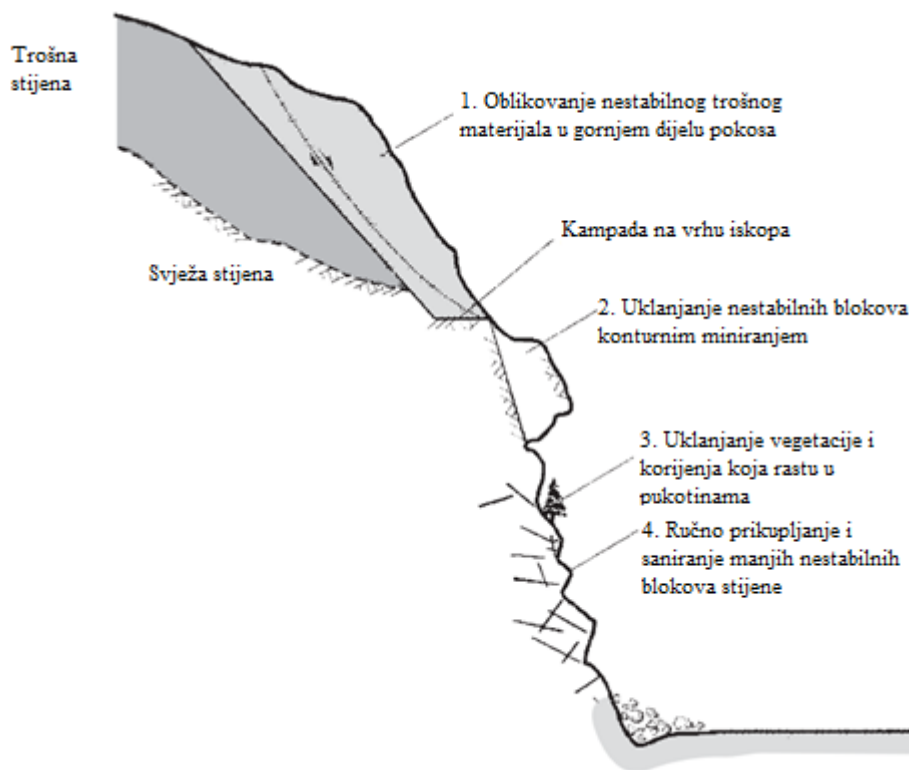
### 4.2. Stabilizacija uklanjanjem nestabilnih zona

Stabilizacija stijenskih pokosa može se postići uklanjanjem potencijalno nestabilne stijene; Slika 36. prikazuje tipične metode uklanjanja takvih stijena, uključujući:

- uređenje zona nestabilne stijenske mase;
- kontrolirano miniranje (otklanjanje) prepusta;
- uklanjanje vegetacije i pojedinačnih blokova stijene.

Općenito, uklanjanje stijenske mase je poželjna metoda stabilizacije jer uklanja opasnost, a osim toga nije potrebno buduće održavanje. Međutim, uklanjanje treba koristiti samo tamo gdje je sigurno da će novo lice pokosa biti stabilno i da neće postojati opasnost od potkopavanja gornjeg dijela pokosa. Područje pod brojem 4 na Slici 36. je primjer gdje bi uklanjanje stijene trebalo provesti pažljivo. Bilo bi sigurno ukloniti krajnju labavu stijenu, pod uvjetom da je frakturiranje uzrokovano miniranjem i samo produljeno na malu dubinu. Međutim, ako je stijenska masa duboko ispucala, uskoro bi se mogla pojaviti pukotina koja bi potkopala gornji dio pokosa. Uklanjanje stijene na licu pokosa nije učinkovito tamo gdje je stijena rastresita, kao što je škrljavac. U tim okolnostima, izloženost novog lica samo će započeti novi ciklus trošenja i nestabilnosti. Za ovo stanje prikladnije je izvesti metode stabilizacije kao što su zaštita lica s mlaznim betonom i sidrima, ili sidreni potporni zid [2]. U slučaju armiranja trošne jedinice stijenskog pokosa u široj zoni, sidra će djelovati na

generalno ojačanje značajki stijenske mase cijele zone, a ne samo stabilizaciju jednog nestabilnog bloka ili zone.



Slika 36. Metode otklanjanja stijene u svrhu stabilizacije stijenskog pokosa [2]

Metode otklanjanja stijenske mase u svrhu stabilizacije stijenskog pokosa, prikazane na Slici 36. i obuhvaćaju slijedeće metode:

#### 1) Oblikovanje i rasterećenje

Tamo gdje se nalazi trošna stijena u gornjem dijelu pokosa, često je potrebno ukloniti takav materijal pod kutom koji je ravniji nego što je to kompaktnija stijena ispod njega. Projektiranje postupka oblikovanja i rasterećenja pokosa započinje povratnom analizom nestabilnog pokosa. Postavljanjem faktora sigurnosti nestabilnog nagiba kao vrijednost 1, moguće je izračunati parametre čvrstoće stijenske mase (povratne analize stabilnosti). Te informacije se zatim mogu koristiti za izračun potrebnog smanjenog kuta nagiba i/ili visine kojom će se postići traženi faktor sigurnosti za realne uvjete na pokosu. U nožici, može se ostaviti prostor za prirodni jarak gdje je moguće nakupljanje za manje odrone. Na mjestu gdje se razvilo klizno tijelo, može biti nužno rasteretiti pokos u gornjem dijelu, kako bi se smanjile sile djelovanja u smjeru klizanja [2].

## 2) Uklanjanje stijene konturnim miniranjem (ublaženim miniranjem)

Slom ili trošenje stijenske mase može uzrokovati nadvišenje na licu pokosa, takvo nadvišenje može predstavljati opasnost u slučaju sloma. U takvim okolnostima, uklanjanje nadvišenja najbolje je obaviti konturnim miniranjem. Kada je opterećenje konturnim miniranjem ograničeno, zbog znatne energije koju ono može stvoriti i kao posljedicu imati izbacivanje malih kamenja velikom brzinom, predlaže se korištenje mjera zaštite kao što su zaštitne prostirke za miniranje. Takve prostirke izrađene su od gume povezane lancima ili žicom [2].

## 3, 4) Uklanjanje drveća i sitnih odrona

Uklanjanje rastresitog kamenja, tla i vegetacije na licu pokosa vrši se pomoću ručnih alata kao što su šipke, lopate i motorne pile i sl., obavlja se kao početni korak gotovo svake zaštite pokosa. Radnici penjači se spuštaju niz pokos kako bi provjerili postoje li labavi blokovi u stijenskom pokosu. Važna komponenta operacije skaliranja u vlažnim klimama je uklanjanje drveća i vegetacije koja raste na licu na razmaku od nekoliko metara iza vrha pokosa. Korijenje drveća koje raste na licu pokosa može otvoriti pukotine i s vremenom uzrokovati slom. Također, njihanje stabala uslijed vjetra zbog korijenja može nepovoljno utjecati na nestabilnim blokovima. Opće popuštanje stijene na licu na kojemu se nalazi korijenje dopušta povećanu infiltraciju vode koja se uslijed promjene temperature, tj. pada temperature smrzava i širi što uzrokuje otvaranje pukotina i daljnje fizičko trošenje stijenske mase posredovanjem biološkog trošenja [2].

### 4.3. Mjere zaštite od nestabilnosti stijenskih pokosa

Učinkovita metoda minimiziranja opasnosti odrona stijena znači dopustiti da se odroni dogode, pritom kontrolirati udaljenost i smjer kretanja blokova koji su se odvojili od stijenske mase. Metode zaštite i kontrole nestabilnosti stijenskih pokosa uključuju prihvatne jarke i barijere, žičane ograde, zaštitne mreže postavljene na lice pokosa i tunele (galerije) u svrhu zaštite od odrona. Zajednička značajka svih ovih zaštitnih struktura i mjera su njihove karakteristike apsorpcije energije kada se odron zaustavlja putujući na nekoj udaljenosti ili se usmjerava izvan dosega zaštićenog područja. Kao što je opisano u ovom poglavlju, korištenjem odgovarajućih tehnika moguće je kontrolirati odrone dimenzija do 2 m koji padaju sa visine do nekoliko stotina metara, razvijajući engeriju udara i do 1 MJ. Krute konstrukcije, kao što su zidovi od armiranog betona ili ograde s krutim pričvršćenjima na

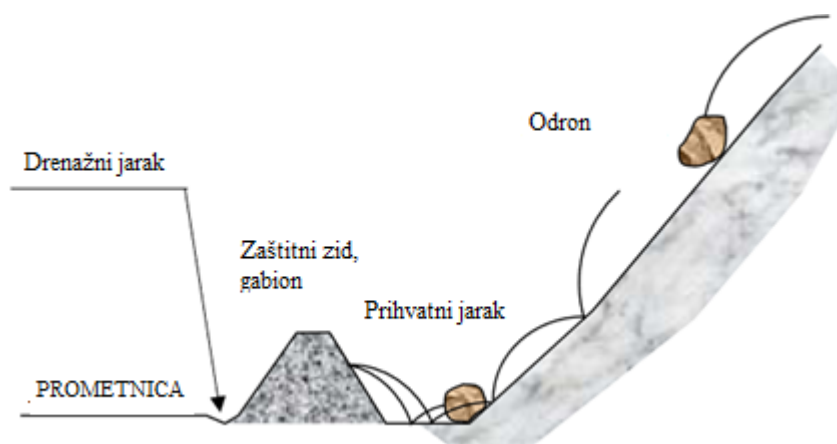


fiksnu podlogu, rijetko su prikladne za zaustavljanje takvih odrona. Izbor i dizajn učinkovitih mjera zaštite zahtijevaju sposobnost predviđanja ponašanja odrona [2].

U nastavku, opisana je svaka od navedenih mjera zaštite stijenskog pokosa.

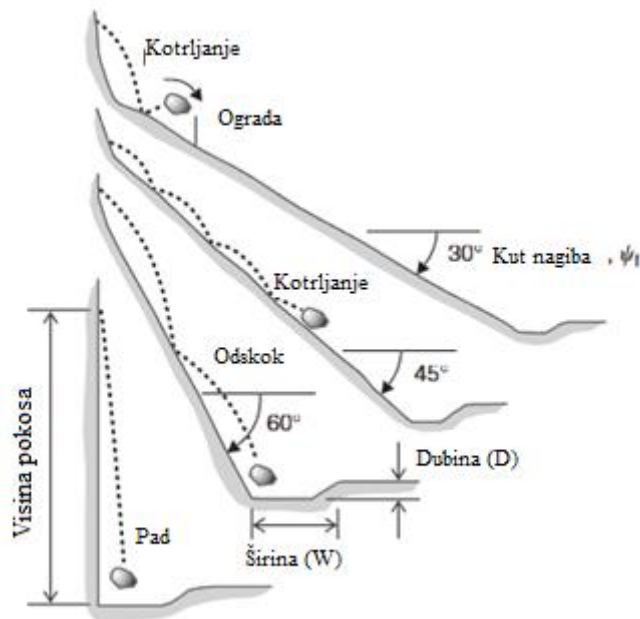
#### 4.3.1. Prihvatni jarci

Prihvatni jarci u nožici pokosa često su najisplativija metoda sprječavanja odrona, uz uvjet kada postoji adekvatno mjesto u nožici pokosa [25]. Potrebne dimenzije jarka, širina i dubina, ovise o visini lica stijenskog pokosa. Slika 37. prikazuje shematski prikaz načina funkcioniranja prihvatnog jarka.



Slika 37. Shematski prikaz funkcioniranja prihvatnog jarka [26]

Za strmije padine od oko  $75^\circ$ , odroni teže ostati blizu lica i pasti blizu nožice pokosa. Za nagib kutova između oko  $55^\circ$  i  $75^\circ$ , odroni teže poskakivanju i vrtnji koja rezultira većoj udaljenosti na koju odroni padaju; posljedično, potreban je široki jark. Za kutove nagiba između oko  $40^\circ$  i  $55^\circ$ , odroni će težiti kotrljanju niz lice i padanju u jark [2]. Slika 38. prikazuje učinak kuta nagiba na put koji odroni obično slijede, i kako to utječe na dizajn jarka.



Slika 38. Ovisnost kuta nagiba i visine prihvatnih jaraka [27]

#### 4.3.2. Zaštitne konstrukcije

Razne konstrukcije mogu se konstruirati za poboljšanje učinkovitosti iskopanih jaraka, ili za formiranje prihvatnih zona u nožici pokosa [28]. Odabir vrste adekvatne konstrukcije u svrsi barijere i njenih dimenzija ovisi o energiji koju stvaraju odroni, te o dimenzijama pokosa, ali i dostupnosti građevinskih materijala. Zahtjev svih barijera je fleksibilnost pri udaru. Barijere apsorbiraju energiju udarca deformiranjem i sustavom visokog kapaciteta udarne energije koji je također fleksibilan i konstruiran od materijala koji može podnesti udar oštrih blokova koji mogu prouzročiti značajnu štetu. U nastavku, opisane su i navedene neke od najčešćih metoda ovakvih barijera.

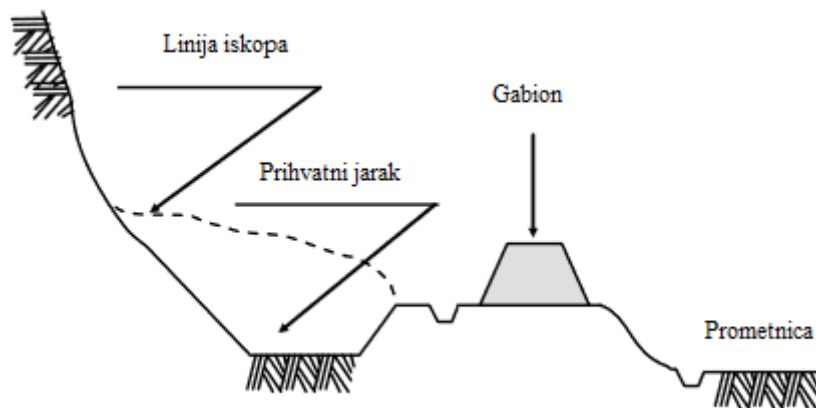
#### **Gabioni i betonski blokovi**

Gabioni ili betonski blokovi učinkovite su zaštitne barijere za padajuće stijene, tj. odrone promjera do oko 0,75 m. Slika 39. prikazuje primjer jarka s dva sloja gabiona duž vanjskog ruba koji čini barijeru visoku 1,5 m.



Slika 39. Gabion sa prihvatnim jarkom [2]

Shematski, takav sustav prikazan je na Slici 40.



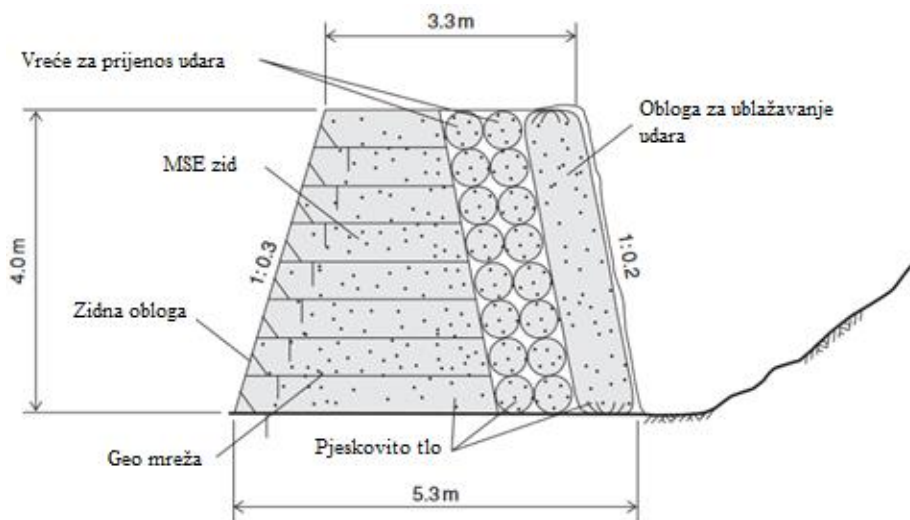
Slika 40. Shematski prikaz gabiona sa prihvatnim jarkom [26]

Funkcija barijere je formiranje jarka s okomicom okrenutom prema licu pokosa koji služi za prikupljanje odrona. Gabioni su košare od žičane mreže ispunjene kamenjem, obično dimenzija 0,91x0,91 m u poprečnom presjeku, te se često konstruiraju na lokaciji sa ostacima kamenih blokova. Prednosti gabiona su jednostavnost gradnje na strmim padinama i postavljanje tamo gdje je temelj nepravilan, a njihov kapacitet može izdržati značajan udar od padajućih odrona. Međutim, gabioni nisu imuni na oštećenja udarima stijena, a troškovi popravka mogu postati značajni. Barijere izgrađene od predfabriciranih betonskih blokova sa sličnim dimenzijama također se koriste kao mjera zaštite od odrona pri transportnim sustavima. Iako su betonski blokovi nešto manje elastični od gabiona, imaju prednost široke

dostupnosti i sposobnost brze ugradnje. Da bi betonski blokovi bili učinkoviti, potrebna je fleksibilnost dopuštanjem kretanja u spojevima između blokova. Nasuprot tome, masivni betonski zidovi su mnogo manje fleksibilni i skloni su pucanju prilikom udara [2].

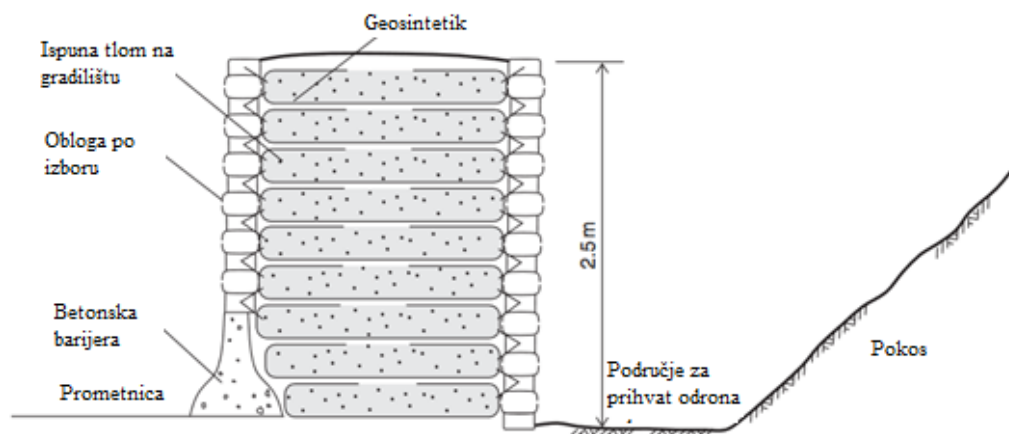
### Geosintetičke barijere sa tlom

Razne barijere su izgrađene korištenjem geotekstila i slojeva tla, svaka debljine oko 0.6 m, izgrađenih da tvore barijeru, koja može biti visoka i do 4 m [29]. Omotavanjem tkanine oko svakog sloja moguće je konstruirati barijeru s okomitom prednjom i stražnjom stranom lica, gdje je lice podložno udarcu i može se zaštititi od oštećenja materijalima kao što su željezničke vezice, gabioni i gume. Slika 41. prikazuje barijeru visine 4 m, konstruiranu od zida sa pjeskovitim tlom i elementima za prijenos udara i mreže.



Slika 41. Barijera izgrađena od pjeskovitog tla [30]

S druge strane, Slika 42. prikazuje drugu vrstu barijere, visine 2,5 m izradenu od betonskih blokova sa geosinteticima.



Slika 42. Barijera izgrađena od geosintetika [30]

Sposobnost barijere ove vrste je da zaustavi odrone stijena ovisno o energiji udara, te otporu na smicanje u podnožju i sposobnosti deformiranja bez sloma. Deformacija može biti i elastična deformacija komponente barijere i posmični pomak na slojevima tkanine ili na podlozi. Nedostatak ovih barijera je činjenica da je potreban znatan prostor za barijeru, kao i zahvatni prostor iza nje [2].

#### *4.3.3. Zaštitne mreže*

Žičana mreža ovješena na lice pokosa može biti učinkovita metoda zadržavanja blokova blizu lica i sprječavanja njihovog odskoka na cestu [31]. Budući da mreža apsorbira dio energije bloka koji pada, potrebne dimenzije jarka u podnožju pokosa su znatno smanjene. Mreža lančanih spojeva je prigodna metoda za kontrolu odrona dimenzija od oko 0,6–1 m, a pleteno žičano užje ili prstenaste mreže prikladne su za odrone dimenzijama do oko 1,3m. Za instalacije koje pokrivaju visok nagib gdje težina lake mreže može premašiti svoju snagu, mreža mora biti ojačana žičanom čeličnom užadi. U svakom slučaju, gornji rub mreže treba biti postavljen blizu početka odrona tako da blokovi imaju mali zamah kada udare o mrežu. Mreža nije usidrena na dnu pokosa ili na pojedinim točkama. Slobodno viseća mreža dopušta stijenama da padnu u jarak, a ne gomilanje iza mreže; težina takve akumulacije može izazvati puknuće i slom mreže [2].

Ovisno o stanju na terenu i mehanizmu sloma u stijenskoj masi, tipovi zaštite pokosa mogu biti podijeljeni na:

- zaštita dvostruko isprepletenim pocinčanim (galvaniziranim) žičanim mrežama
- zaštita pocinčanim žičanim mrežama ojačanim sidrima i čeličnom užadi,
- zaštita visokonosivim mrežama ojačanim sidrima i
- sustavno ojačanje pokosa sidrima i mlaznim betonom.

Najčešće se koriste prve tri vrste zaštite kako bi se osigurala lokalna stabilnost pokosa (erozijska stabilnost, odvajanje i pad malih kamenih blokova, manjeg klina itd.) dok se sustavno ojačanje pokosa koristi za osiguranje globalne stabilnosti pokosa (slom stijenske mase, planarni slom ili slom većeg klina) [32].

### **Dvostruko isprepletene pocinčane mreže**

Dvostruko isprepletene pocinčane žičane mreže proizvedene su u obliku šesterokuta koji omogućuje bolju i pravilnu raspodjelu opterećenja u mreži. Mreža se sastoji od žice (obično debljine 3,0 mm) koja isprepletena i savijena kako bi formirala otvore prema proizvodnim metodama (80 x 100 mm ili 60 x 80 mm). Mreža se ispravlja bočno na mjesto spajanja sa žicom koja ima veću vlačnu čvrstoću i profil (obično debljine 3,9 mm). Dupli sustav za uvijanje lokalizira bilo koju vrstu oštećenja mreže i sprječava širenje i distribuciju eventualnih oštećenja mreže rezultiranih od sloma unutar mreže. Dvostruko isprepletene mreže koristi se za lokalnu stabilizaciju pokosa (zaštita od manjih odrona, zaštita od manji kamenih blokova), za izgradnju potpornih konstrukcija (gabioni, gabioni u vrećama, prethodno napunjeni gabioni i ostalo), za izgradnju armiranih konstrukcija (teramesh i zeleni terramesh sustav) i za ojačanje asfalta (čelična mreža), Slika 43. [32].



Slika 43. Zaštita pokosa dvostruko isprepletenim pocinčanim mrežama [32]

Ova vrsta mreže proizvodi se pod visokim zahtjevima kontroliranih uvjeta; mora imati iznimno visoku čvrstoću, visoku otpornost na loše vremenske uvjete i kemijski agresivne tvari, promjene temperature, koroziju itd. Ako je potrebno, mreža se može zaštititi PVC oblogom (poliakril i sl.). Najčešće se koristi u područjima gdje se radovi izvode u blizini vode ili u slučaju izrazito nepovoljnih klimatskih uvjeta koji bi mogli negativno utjecati na čeličnu konstrukciju [32].

### **Pocinčane mreže ojačane sidrima i čeličnom užadi**

U slučajevima kada je potrebna veća vlačna čvrstoća koriste se dvostruko isprepletene mreže ojačane sidrima i čeličnom užadi. Dvostruko isprepletenu mrežu se postavlja na sidra koja su postavljena u ranije izvedenu bušotinu, te se čelična užad pričvršćuje na ploče koje se nalaze na glavama sidara, Slika 44.



Slika 44. Zaštita pokosa pocinčanim mrežama koje su ojačane sidrima i čeličnom užadi [32]

Ploče su zategnute na glave sidara s maticama i naknadno se cijela površina pokosa pokriva tj. isprepliće čeličnom užadi na odgovarajućim orijentacijama. Promjer čeličnog užeta varira od 12,0 do 16,0 mm debljine [32].

### **Visokonosive mreže ojačane sidrima**

Kada je stijenska masa izrazito raspucala i potrebna je visoka vlačna sposobnost mreže zbog veličine i mase kamenih blokova, koristi se visokonosiva mreža ojačana sidrima (samobušivim). Takva žica se sastoji od visokokvalitetnog čelika sa velikom vlačnom čvrstoćom (minimalno  $1770 \text{ N/m}^2$ ) i stoga tehnologija dvostrukog uvijanja nije moguća, Slika 45.



Slika 45. Visokonosive mreže [32]

Umjesto klasičnih ploča, na sidra se postavljaju šiljaste ploče u obliku romba kako bi se postigao bolji prijenos sile od sidra preko mreže do stijenske mase [32].

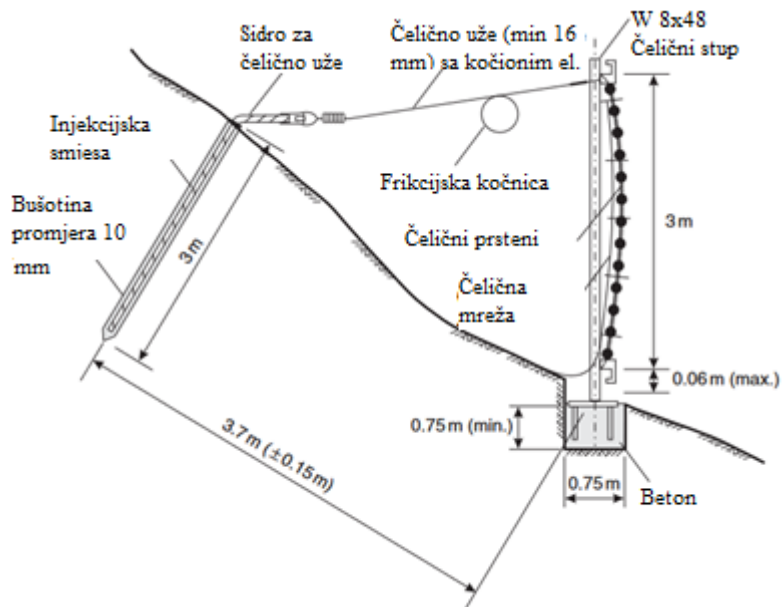
#### *4.3.4. Zaštitne barijere*

Tijekom 1980-ih su razvijene i detaljno ispitane razne barijere prikladne za postavljanje na pokosima, u jarcima i sličnim zonama [30;33;34]. Dizajn pogodan za određenu lokaciju ovisi o topografiji, očekivanom opterećenju udara odrona, visini odskoka i dostupnosti materijala. Zajednička značajka svim ovim sustavima je njihova sposobnost podnošenja energije udara odrona zbog njihove konstrukcije bez ikakvih krutih dijelova. Kada stijena udari u mrežu, dolazi do deformacije mreže koja apsorbira energiju udara putem konstrukcije tijekom vremena. Ova deformacija značajno povećava kapacitet komponenti kako bi se zaustavio odron, te omogućuje upotrebu laganih, jeftinih elemenata konstrukcija.

#### **Barijere s mrežama i čeličnom užadi**

Mreže s apsorpcijom energije kapaciteta u rasponu od 40 do 2000 kJ razvijene su kao vlasnički sustav od strane brojnih proizvođača (npr. Geobrugg Corporation and Isofer Industries). Komponente ovih barijera su serije čeličnih I-profil stupova na oko 6 m razmaka, usidrenih u temelj bušenim šipkama i čeličnom sajlom pričvršćenom na pokos. Dodatna fleksibilnost omogućena je ugradnjom kočnica koje djeluju po principu trenja na kabelu koji podupire mreže i vezan je na pokos. Frikcijske kočnice su petlje žica u čeličnoj cijevi koje se aktiviraju tijekom događaja visoke energije kao što su odroni, te pomažu u raspršivanju utjecaja sile tj. disipaciji energije udara [2]. Slika 46. prikazuje porečni presjek jedog takavog sustava sa pripadajućim elementima.





Slika 46. Zaštitna barijera [15]

Mreža je dvoslojni sustav koji se sastoji od povezanih mreža debljine 50 mm koje su isprepletene čelične mreže ili isprepleteni čelični prstenovi. Slika 47. prikazuje sustav isprepletanih čeličnih prstenova.

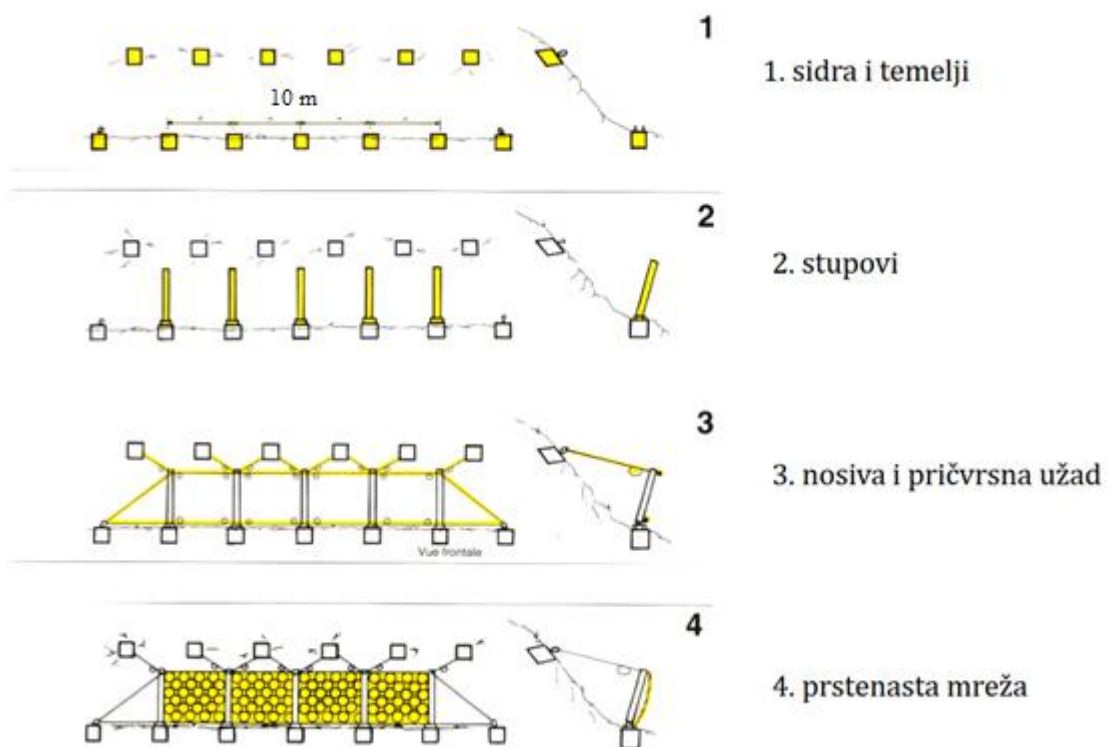


Slika 47. Mreža čeličnih prstenova [35]

Mreža od isprepletanih čeličnih žica obično se sastoji od žica promjera 8 mm sa dijagonalnim uzorkom na svakih 100-200 mm. Dimenzije žice i mreže će varirati u skladu sa očekivanom energijom udara i veličinom blokova. Važna značajka mreža je način pričvršćivanja mjesta spoja čelične užadi sa zatvaračima visoke čvrstoće. Mreža je ovješena na stupove tako da je spojena sa čeličnom užadi koja se pruža duž gornjeg i donjeg dijela

svakog stupa. Kao alternativa isprepletenoj žičanoj mreži, prstenaste mreže izrađuju se od čeličnih prstena promjera 0,31 m, od kojih je svaki isprepleten s četiri susjedna čelična prstena. Prstenje se izrađuje od visoke rastezljive čelične žice promjera 3 mm, i broj žica u svakom prstenu varira između 5 i 19 ovisno o projektiranom energetske kapacitetu mreže [2].

Slika 48. prikazuje faze izvođenja sustava barijera za zaštitu od odrona. Pa se tako, u prvoj fazi izvede sidra i temelji, zatim se na njih postavljaju stupovi koji se vežu nosivom i pričvrstnom užadi. Kao zadnji korak, postavlja se čelična mreža.



Slika 48. Faze izvođenja zaštitnih barijera [35]

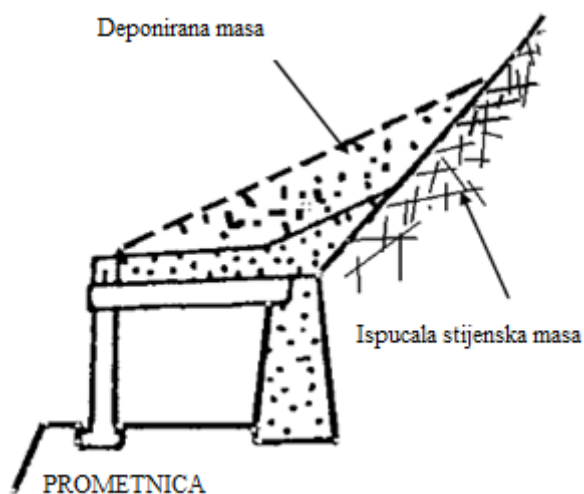
#### 4.3.5. Zaštitne galerije

U područjima ekstremne opasnosti od odrona stijena gdje bi stabilizacija pokosa bila vrlo skupa, izgradnja tunela ili čak preseljenje autoceste u tunele može biti opravdano. Slika 49. prikazuje takvu alternativnu konfiguraciju putem sustava galerija za zaštitu od odrona. Prikazane su tri zaštitne galerije (tunela) s kosim krovovima koje su projektirane kako bi spriječile kotrljajuće blokove preko željezničke pruge. Takve galerije ne podnose direktno opterećenje od udara odrona, stoga su mnogo lakše nego što je to slučaj kod Slike 51. [2].



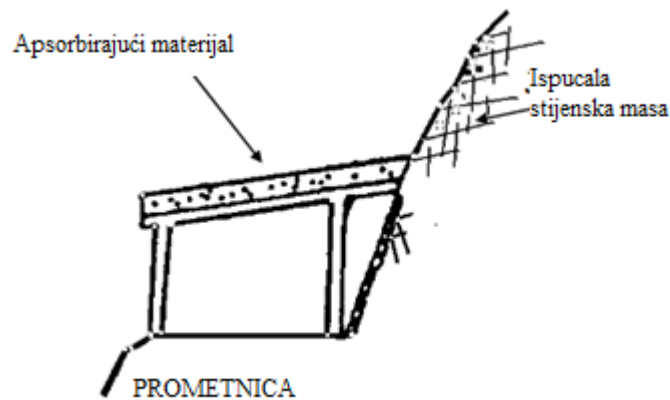
Slika 49. Zaštitne galerije [2]

Poprečni prikaz galerija sa prethodne slike prikazan je na Slici 50.



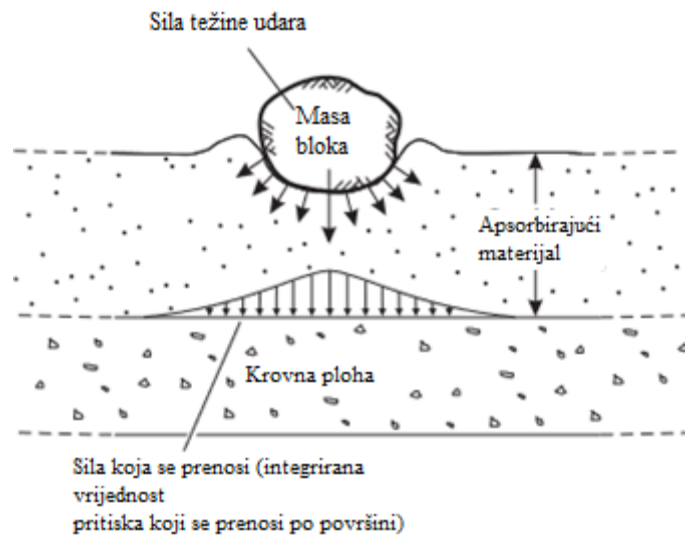
Slika 50. Poprečni presjek zaštitne galerije s kosim krovom [26]

Tamo gdje odroni stijena imaju strmu putanju, galerija ima krov prekriven slojem materijala koji apsorbira energiju kao što je to npr. šljunak (Slika 51.).



Slika 51. Poprečni presjek zaštitne galerije s krovom od apsorberajućeg materijala [26]

Slika 52. prikazuje shematski prikaz funkcioniranja takve zaštite, gdje se težine tj. energija udara prenosi na šljunak koji ublažava odnosno stvara disipaciju energije udara apsorberajući udarac i prenošenjem sile duž plohe.



Slika 52. Karakteristike prijenosa sile kod zaštitnih galerija sa šljunkom [36]

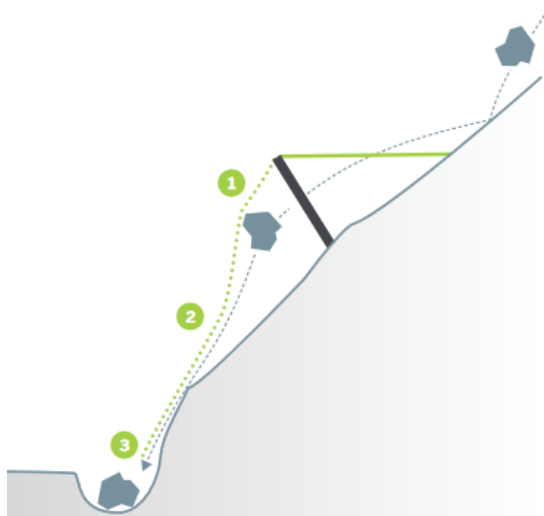
Takve galerije su izrađene sa armiranim betonom ili čelikom, te su dizajnirane kako bi mogle podnesti najgori mogući slučaj udara, tj. stvaranja opterećenja na rubovima krova.

Kritična značajka dizajna ovakvih galerija su težina i karakteristike apsorpcije energije postavljenog apsorberajućeg materijala. Idealno, apsorberajući materijal trebao bi apsorbirati

energiju svojim „upijanjem“ i disipirati energiju tako da se sa točke udara preko konstrukcije prenese na cijelu površinu. Nadalje, materijal bi trebao ostati netaknut nakon udara, pa ne mora biti zamijenjen. Učinkovitost materijala može biti izražena kao razlika između „težine sile udarca“ izazvana udarom stijene, i "prenesene sile" koju apsorbira struktura. Šljunak je najčešće korišteni materijal za amortizaciju jer je jeftin i široko dostupan. Međutim nedostatak šljunka je njegova težina, i postoji točka u kojoj je šljunak toliko gust da njegova težina premašuje opterećenje nastalo udarom. Koriste se i gume, međutim pokazalo se kako su vrlo mekane i lako stišljive sa malom apsorpcijom energije. Održiva alternativa za šljunak je ojačani stiropor koji je učinkovit apsorpcijski materijal male jedinične težine, što omogućuje neke uštede u dimenzijama strukture [37]. Nedostatak stiropora je njegova cijena u usporedbi sa šljunkom, stoga se isplativost njegove upotrebe treba pažljivo procijeniti.

#### 4.3.6. Ostale metode

Osim prethodno spomenutih najzastupljenijih metoda, postoji još i mnogo drugih. Neke od njih su i kombinacije spomenutih zaštita. Pa tako, tvrtka Geobrugg [40] između ostalih sistema za zaštitu stijenskih pokosa razvila je sisteme kao što su npr. eng. „Attenuator“ („prigušivač“) i eng. „Rockfall canopy“ (nadstrešnica sa mrežom protiv odrona). Sistem „prigušivač“ sastoji se od sistema stupova i mreža. Čelične žičane mreže visoke čvrstoće povezane su stupovima i čeličnom užadi, te se koriste na lokacijama koje su izložene čestim odronima, a kod kojih postoji dovoljno mjesta za preusmjeravanje odronskih blokova. Prednosti ovakvog sistema je mali broj komponenti, što instalaciju čini brzom i lakom, a održavanje jednostavnim. Sistem se pojednostavljeno može podijeliti na tri zone (Slika 53.);



Slika 53. Zone „prigušivač“ sustava [41]

1) Zona direktnog udara – preusmjerava odron ispod čeličnih mreža (Slika 54.).



Slika 54. 1. Zona „prigušivač“ sustava [41]

2) Zona mreža – srednji dio sustava koji služi za usmjeravanje padajućih i kotrljajućih odronski blokova duž pokosa u sigurnu zonu nakupljanja (Slika 55.).



Slika 55. 2. Zona „prigušivač“ sustava [41]

3) Zona nakupljana/odlaganja – zona u kojoj se odroni nakupljaju u lako pristupačno područje na kojemu se mogu lako otkloniti (Slika 56.).



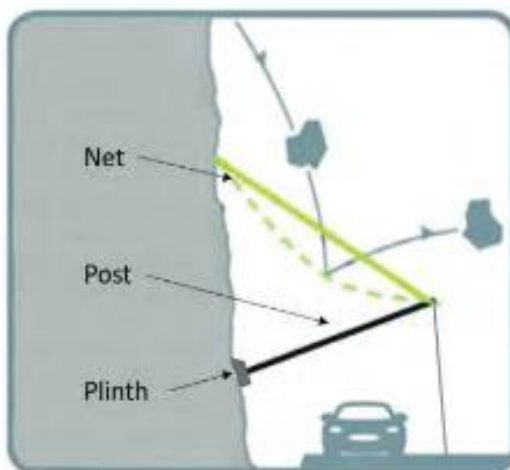
Slika 56. 3. Zona „prigušivač“ sustava [41]

Za potrebe održavanja visoko prometnog transportnog koridora koji je pogođen u potresu u Novom Zelandu, razvijen je sustav nadstrešnice za zaštitu od odrona. Princip rada je sličan prethodno spomenutom sustavu. Razlika je u tome što stupovi stoje horizontalno nagnuti u odnosu na prometnicu ( $15^{\circ}$ - $35^{\circ}$ ), te se kameni blokovi koji se javljaju kao odroni odbijaju o mrežu, umjesto da se kontroliraju i padaju u zonu nakupljanja (Slika 57.).



Slika 57. Nadstrešnica sa mrežom protiv odrona [42]

Sustav se sastoji od stupova koji su usidreni u stijenski pokos i postavljeni na postolje (ploču), te je na njima ovješena mreža. Stupovi su međusobno povezani i ovješeni pomoću čelične užadi. Na kraju svakog stupa ovješena je čelična užad sa teretom koja održava sistem zategnutim i pomaže pri odbijanju blokova. Pojednostavljeni shematski prikaz sustava prikazan je na Slici 58.



Slika 58. Shematski prikaz sustava nadstrešnice [42]

## 5. TEHNIČKI OPIS PROJEKTOG ZADATKA

Projektni zadatak odabran je i izrađen na temelju izvedbenog projekta (geotehnički projekt) južnog kolnika Riječke zaobilaznice, točnije, privremena zaštita pokosa ulaznog predusjeka tunela „Trsat“ u km 0+097. Za analizu je odabrana lijeva strana predusjeka sa najvećim stijenskim pokosom koji se nalazi na stacionaži od km 0+089.00 do 0+115.55. Donja etaža pokosa visine je 12 m i nagiba 2:1, te gornja etaža nagiba 1:1. Svi potrebni parametri, situacije i podloge za izradu projektnog zadatka preuzeti su iz projekta, te su poslužili kao ulazni podaci za sve provedene analize.

U nastavku rada, predstavljena su različita rješenja od usvojenih u projektu pri čemu su ulazni parametri preuzeti iz projektne dokumentacije. Kako bi se odabrao adekvatni sidreno podgradni sklop i dobilo rješenje kojim bi se osigurala stabilnost i sigurnost stijenskog pokosa uz zadovoljavajući faktor sigurnosti (FS), izrađeno je šest računalnih modela u programu „Slope2“ iz programskog paketa tvrtke „Rocscience“. Kroz model 1 obuhvaćena je početna geometrija pokosa s materijalima i njihovim svojstvima. Modelom 2 prikazana je geometrija pokosa nakon izvedenog iskopa, bez mjera sanacije. Modelima 3 do 6 nastoji se osigurati stabilnost pokosa korištenjem sidreno podgradnih sklopova i analizirati utjecaj različitih sidreno-podgradnih sklopova, tj. utjecaj variranja različitih parametara elemenata sanacije kako bi se optimizirale mjere sanacije. Računalnim modelima pokazalo se kako će stijenski pokos biti stabilan s najmanjim faktorom sigurnosti ( $FS = 1,316$ ) u dijelu gdje su izvedene mjere stabilizacije, te je takav dostatan jer je zaštita privremenog karaktera i nakon iskopa će biti zatrpana. Najekonomičnije i najbolje rješenje koje se pokazalo kroz računalne modele su mehanički usidrena štapna sidra (eng. *end anchored*) s aktivnim načinom prijenosa sile na podlogu.

Sidra su duljina 12 m i 5 m, na rasteru od 2 x 2 m, dok kapacitet po sidru iznosi 400 kN. Na donjoj etaži koja je većeg nagiba (2:1) postavljeno je 107 mehanički usidrenih (aktivnih) štapnih sidara duljine 12 m, dok je na gornjoj etaži postavljeno 39 sidara istoga tipa, ali manje duljine od 5 m. Situacija je prikazana na Prilogu 1. Poprečni presjek stijenskog pokosa s obje etaže i postavljenim mjerama stabilizacije prikazan je na Prilogu 2. Pogled na stijenski pokos s postavljenim mjerama stabilizacije prikazan je u grafičkom prilogu na Prilogu 3. Detalj postavljenih sidara prikazan je na Prilogu 4.



## 6. REZULTATI I ANALIZE RJEŠENJA

Kako je već rečeno, korištene dvije vrste sidara, te je svaka dodatno podijeljena s obzirom na način prijenosa sile na podlogu (aktivna i pasivna) kako bi se vidjela razlika. U idućim poglavljima predstavljen je i opisan svaki od šest modela koji svaki za sebe predstavljaju određenu fazu izvedbe. Konačni rezultati su prikazani preko faktora sigurnosti. Kako je već prije navedeno, faktor sigurnosti definiran je kao omjer sila koje se odupiru pomaku i silama pokretanja. Pokretačke sile uključuju masu klina ubranu gravitacijom, seizmičke sile i pritisak vode. S druge strane, sile otpora proizlaze iz kohezije i kuta trenja na plohi sloma [43].

### 6.1. Model 1 – početna geometrija pokosa

Model 1 prikazuje početnu geometriju pokosa. Model pokosa sastoji se od tri materijala s karakterističnim svojstvima kako je prikazano na slici 59. Pa su tako redom zastupljeni slojevi materijala kao; pokrivač, lapor (vapnoviti i glinoviti), te siltit (glinoviti). Pokrivač ima zapremninsku težinu od  $18 \text{ kN/m}^3$ , koheziju od  $10 \text{ kPa}$ , dok kut trenja iznosi  $25^\circ$ . Lapor, koji je vapnoviti i glinoviti, ima zapremninsku težinu od  $20 \text{ kN/m}^3$ , koheziju od  $20 \text{ kPa}$ , te kut trenja koji iznosi  $35^\circ$ . Naposljetku, glinoviti siltit ima jednaku zapremninsku težinu kao i lapor,  $20 \text{ kN/m}^3$  i koheziju istu kao i pokrivač, dakle  $10 \text{ kPa}$ . Kut trenja ovog materijala iznosi  $30^\circ$ . Razina podzemne vode uzeta je u obzir u modelu definiranjem vrijednosti  $R_u$  koeficijenta.  $R_u$  koeficijent uvodi se kako bi se definirao porni pritisak. Njime se jednostavno modelira porni pritisak kao djelić vertikalnog pritiska materijala za svaki komad pokosa [44]. Jednostavnije rečeno,  $R_u$  koeficijent je omjer pornog pritiska i geostatičkog vertikalnog naprezanja (jednadžba 3).

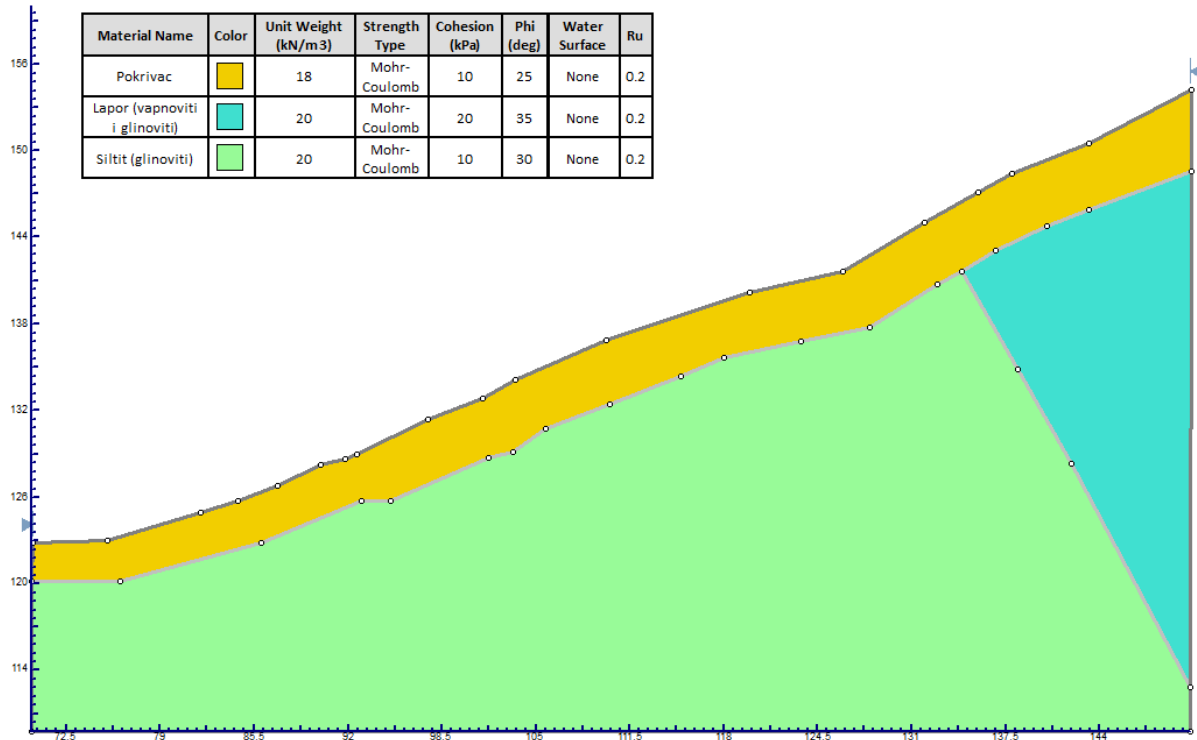
$$R_u = \frac{u_w}{\sigma_v} \quad (3)$$

Gdje je:

$u_w$  – porni pritisak (kPa)

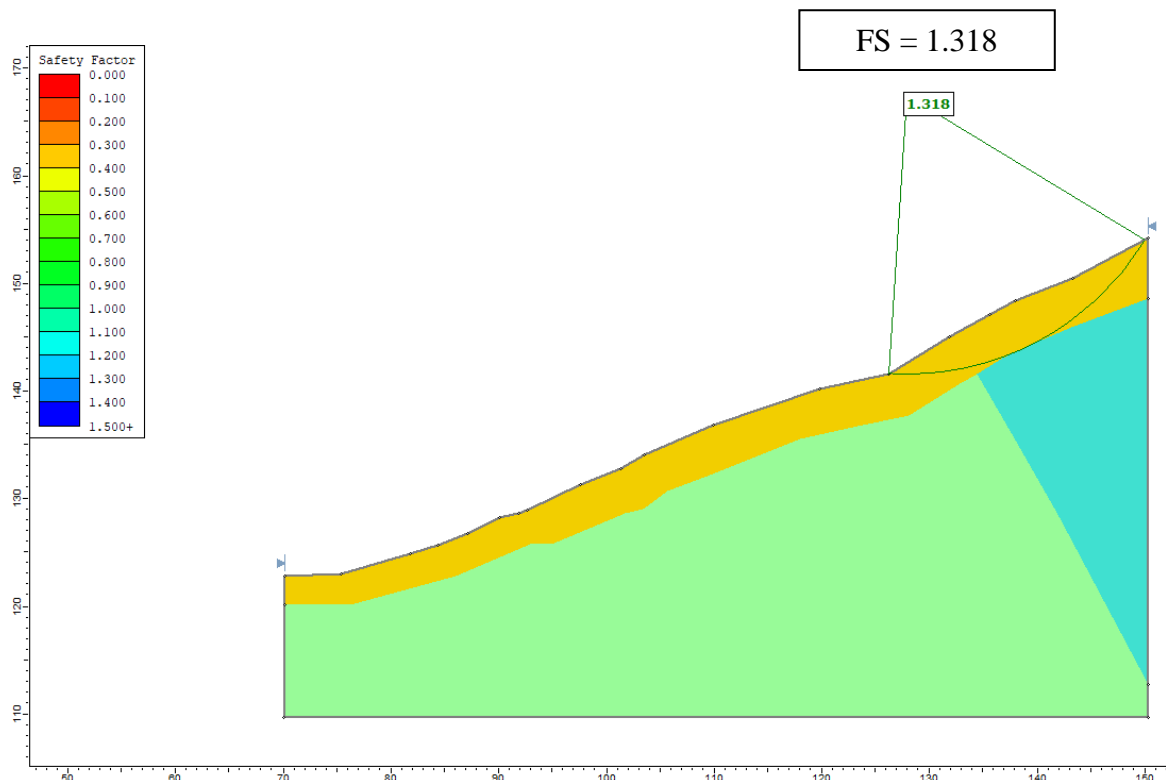
$\sigma_v$  – geostatičko vertikalno naprezanje ( $\text{kN/m}^2$ )

Početna situacija odnosno geometrija s definiranim materijalima pokosa prikazana je na Slici 59.



Slika 59. Model 1 – početna geometrija pokosa

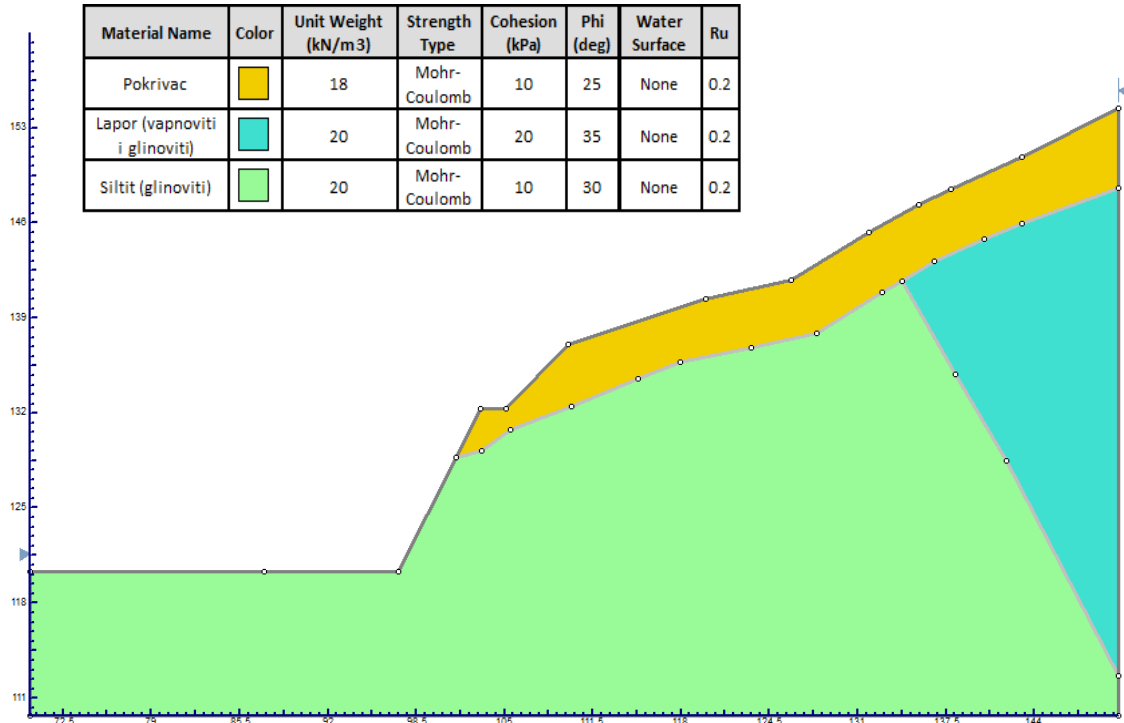
Za pokos prirodne geometrije, odnosno prije izvođenja bilo kakvih zahvata, dobiven je položaj kritične klizne plohe s FS = 1,32 kako je prikazano na Slici 60.



Slika 60. Model 1 – faktor sigurnosti kritične klizne plohe

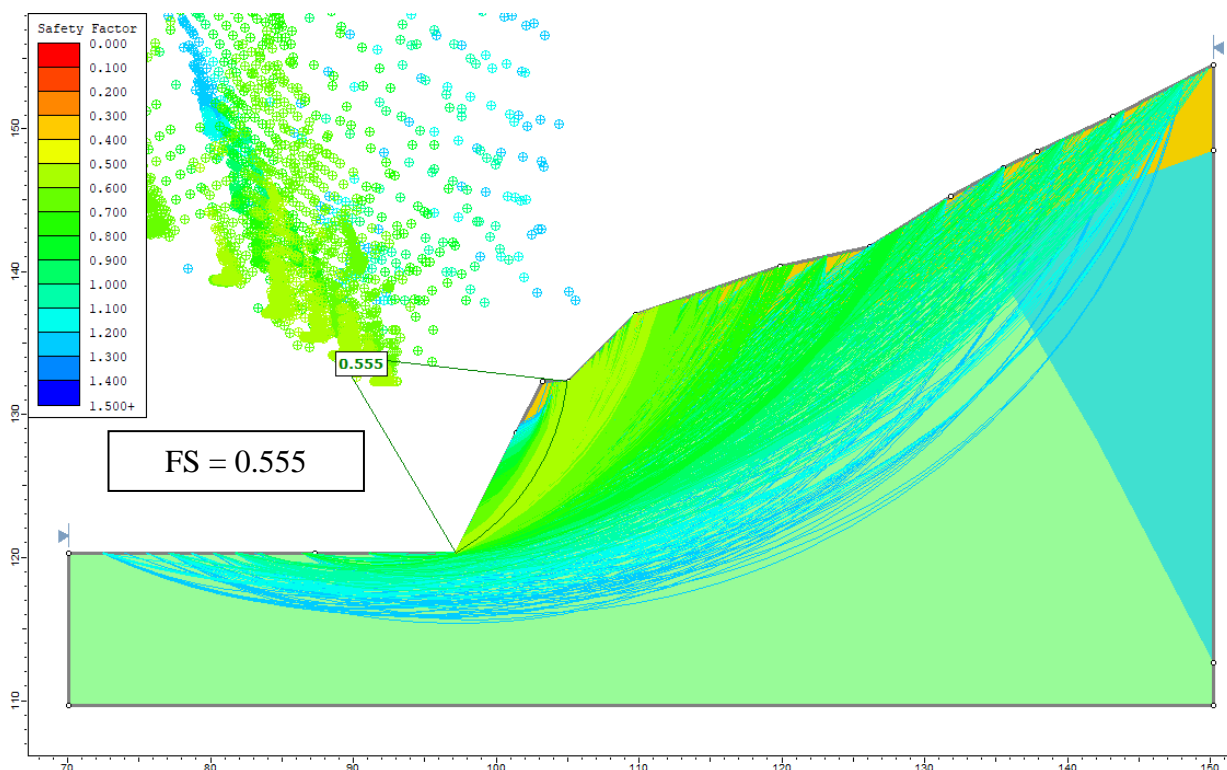
## 6.2. Model 2 – zasjek pokosa

Na prethodnom modelu izveden je zasjek pokosa u pokosima nagiba 2:1 za donju, te nagiba 1:1 za gornju etažu, te je takav prikazan u modelu 2 na Slici 61.



Slika 61. Model 2 – geometrija zasjeka pokosa

Za pretpostaviti je da će se ovakvim zahvatom na pokosu utjecati na njegovu stabilnost, te je potrebno provjeriti uvjete stabilnosti u ovom dijelu modela, kao i globalnu stabilnost modela pokosa nakon promjene geometrije. Slika 62. prikazuje položaj kritične klizne plohe za Model 2 ( $FS = 0.555$ ), te sve klizne plohe s  $FS < 1,30$ .



Slika 62. Model 2 – faktor sigurnosti i plohe sa FS < 1,30

### 6.3. Model 3 – sidreno podgradni sklop 1

Napredovanjem iskopa potrebno je osigurati stabilnost pokosa ugradnjom određenih mjera sanacije, a to su u ovome slučaju stijenska sidra. Odabrana su mehanički usidrena štapna sidra sa aktivnim načinom prijenosa sile na plohu, dok su u modelu 4 odabrana sidra sa pasivim prijenosom sile na plohu. Aktivna sidra djeluju tako da smanjuju pokretačku silu u izračunu faktora sigurnosti. Prednapregnuti kablovi ili sidra, koja vrše silu na plohu prije nego li se ikakav pomak uopće dogodi, mogu se smatrati aktivnim sustavom stabilizacije [43]. Aktivni prijenos sile na plohu može se izračunati prema jednadžbi 4 kako slijedi;

$$F_{aktivno} = \frac{F_r + T_N \cdot \tan \phi}{F_a - T_S} \quad (4)$$

Gdje je:

$F_r$  – sila otpora (kN);

$F_a$  – pokretačka sila (kN)

$T_N$  – normalna sila (kN)

$T_S$  – posmična sila (kN)

$\tan \phi$  - kut trenja (°)

Kako je već spomenuto, u modelu 3 i 4 korištena su mehanički usidrena štapna sidra. Pri korištenju ovakvog tipa sidara, opterećenje preneseno na kliznu plohu biti će konstantno, bez obzira gdje klizna ploha presijeca duljinu sidra. Preneseno opterećenje (sila) po jedinici širine pokosa jednako je kapacitetu sidra podijeljenim sa razmakom izvan ravnine [45]. Prenesena sila može se izvesti preko jednadžbe 5 kako slijedi;

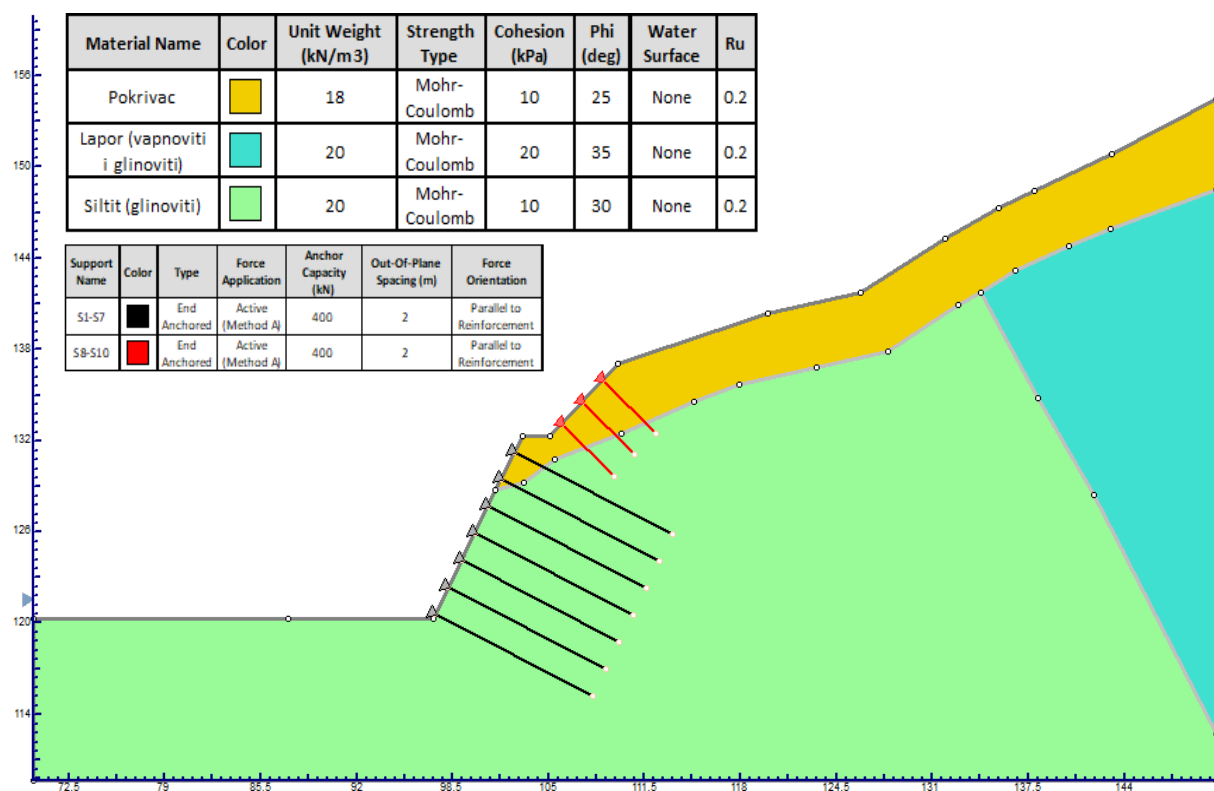
$$F = \frac{T}{S} \quad (5)$$

Gdje je:

T – kapacitet sidra (kN)

S – razmak izvan ravnine (m)

Na Slici 63. prikazan je model 3, sidreno podgradni sklop koji se sastoji od mehanički usidrenih štapnih sidara sa aktivnim prijenosom sile na podlogu.



Slika 63. Model 3 – sidreno podgradni sklop

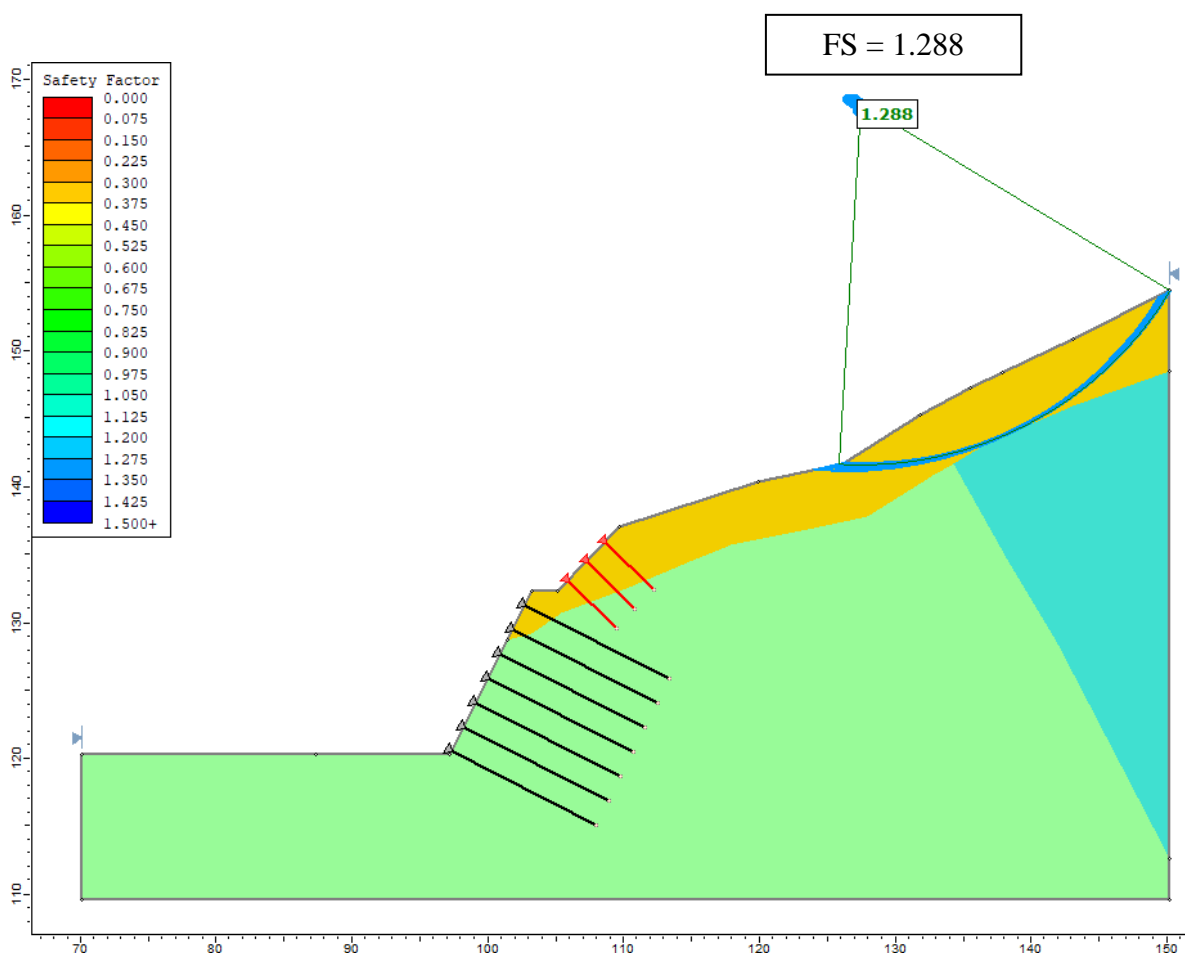
U Tablici 2. prikazana su svojstva korištenih sidara kao što je njihova duljina, kapacitet i raster na kojemu su postavljena.

Tablica 2. Svojstva sidreno podgradnog sklopa

| <b>TIP SIDRA</b>             | <b>DULJINA [m]</b> | <b>RASTER [m]</b> | <b>KAPACITET [kN/sidro]</b> |
|------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|
| Mehanički usidrena (aktivna) | 12                 | 2 x 2             | 400                         |
| Mehanički usidrena (aktivna) | 5                  | 2 x 2             | 400                         |

Iz tablice je vidljivo kako se duljina sidara kreće od 12 m za donju etažu koja je većeg nagiba od one iznad, u kojoj su predviđena sidra duljine 5 m. Raster na kojima su postavljena iznosi 2 m u horizontalnoj i 2 m u vertikalnoj ravnini. Kapaciteti po sidru iznose 400 kN.

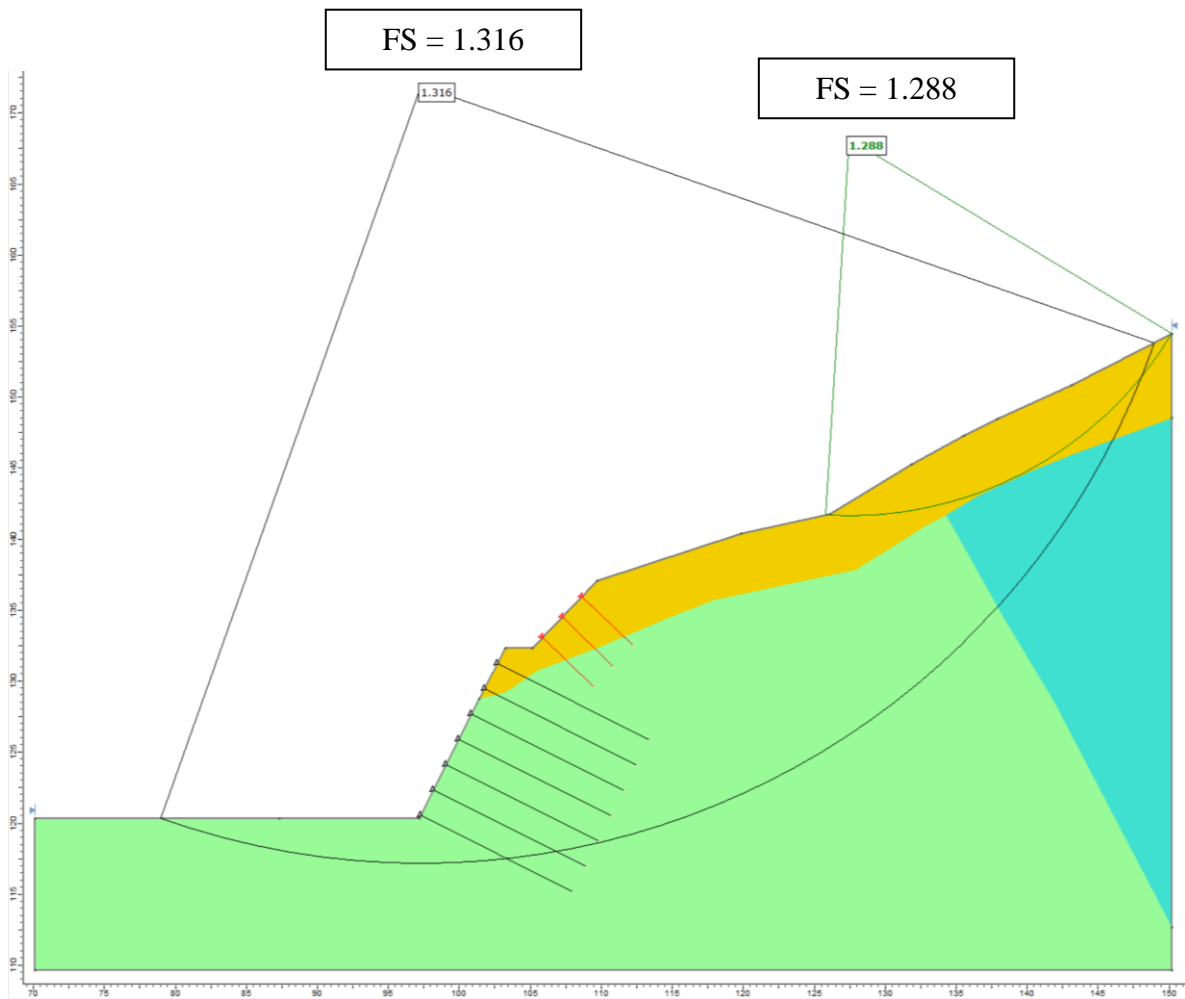
Slika 64. prikazuje najmanji dobiveni faktor sigurnosti za odabrani sidreno podgradni sklop, te izdvojene plohe koje imaju FS < 1,30.



Slika 64. Model 3 – faktor sigurnosti i plohe sa FS < 1,30

Kako je vidljivo sa slike, nakon implementacije sidara u model, klizna ploha s min FS nalazi izvan područja zahvata i iznosi (FS = 1,29).

Slika 65. prikazuje FS za kritičnu kliznu plohu nakon provedenih mjera sanacije.



Slika 65. Model 3 – faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu

Kako je vidljivo sa slike, faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu u kojoj je izveden sidreno podgradni sklop iznosi  $FS = 1,32$  što znači da je  $FS > 1,30$  što udovoljava traženim zahtjevima stabilnosti.

#### 6.4. Model 4 – sidreno podgradni sklop 2

Kako je već rečeno, kod modela 4 postavljena su ista sidra kao i kod modela 3, uz razliku u načinu prijenosa sile na plohu. Naime, pasivna sidra povećavaju silu otpora pruženom posmičnom čvrstoćom u izračunu faktora sigurnosti. Neprednapregnuti kablovi ili sidra koja razvijaju silu otpora tek nakon pomaka nekog klina ili plohe, mogu se smatrati pasivnim sustavom stabilizacije [43]. Pasivni prijenos sile na plohu može se izračunati prema jednadžbi 6 kako slijedi;

$$F_{pasivno} = \frac{F_r + T_N \cdot \tan \phi + T_S}{F_a} \quad (6)$$

Gdje je:

$F_r$  – sila otpora (kN);

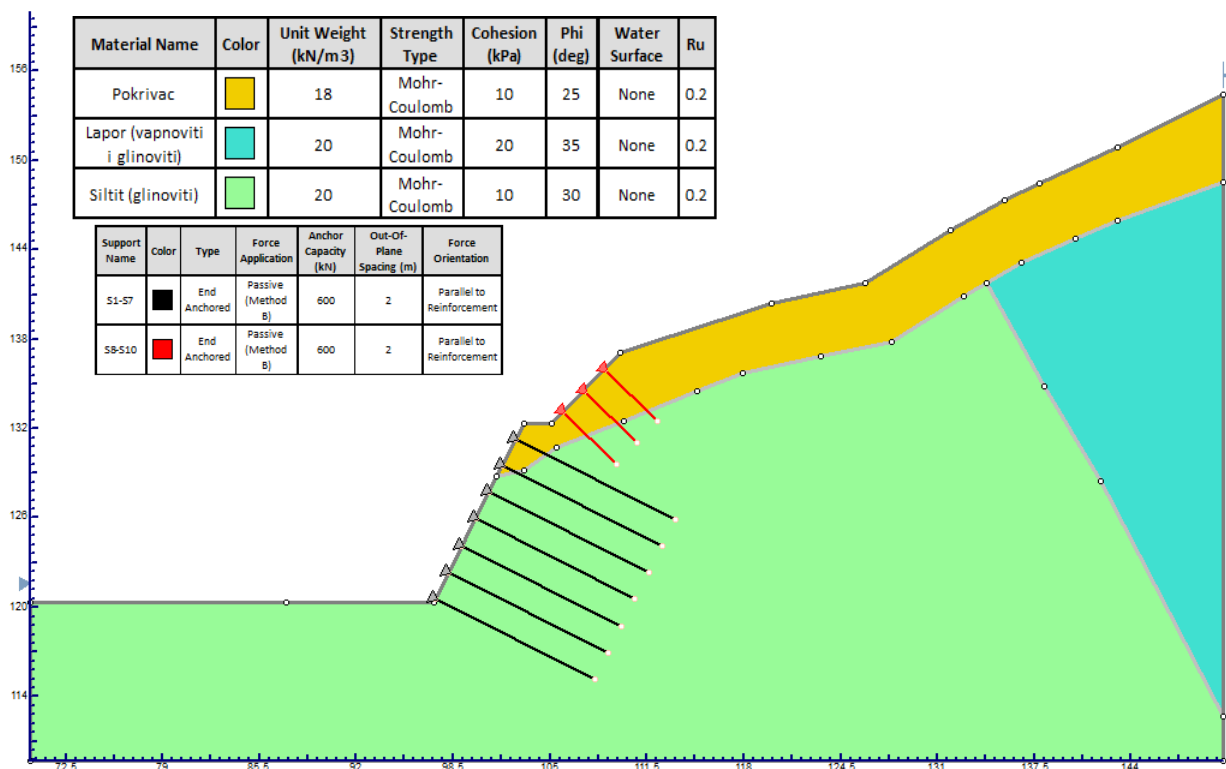
$F_a$  – pokretačka sila (kN)

$T_N$  – normalna sila (kN)

$T_S$  – posmična sila (kN)

$\tan \phi$  - kut trenja ( $^{\circ}$ )

Na Slici 66. prikazan je model 4, sidreno podgradni sklop koji se sastoji od mehanički usidrenih štapnih sidara pasivnim prijenosom sile na podlogu.



Slika 66. Model 4 – sidreno podgradni sklop



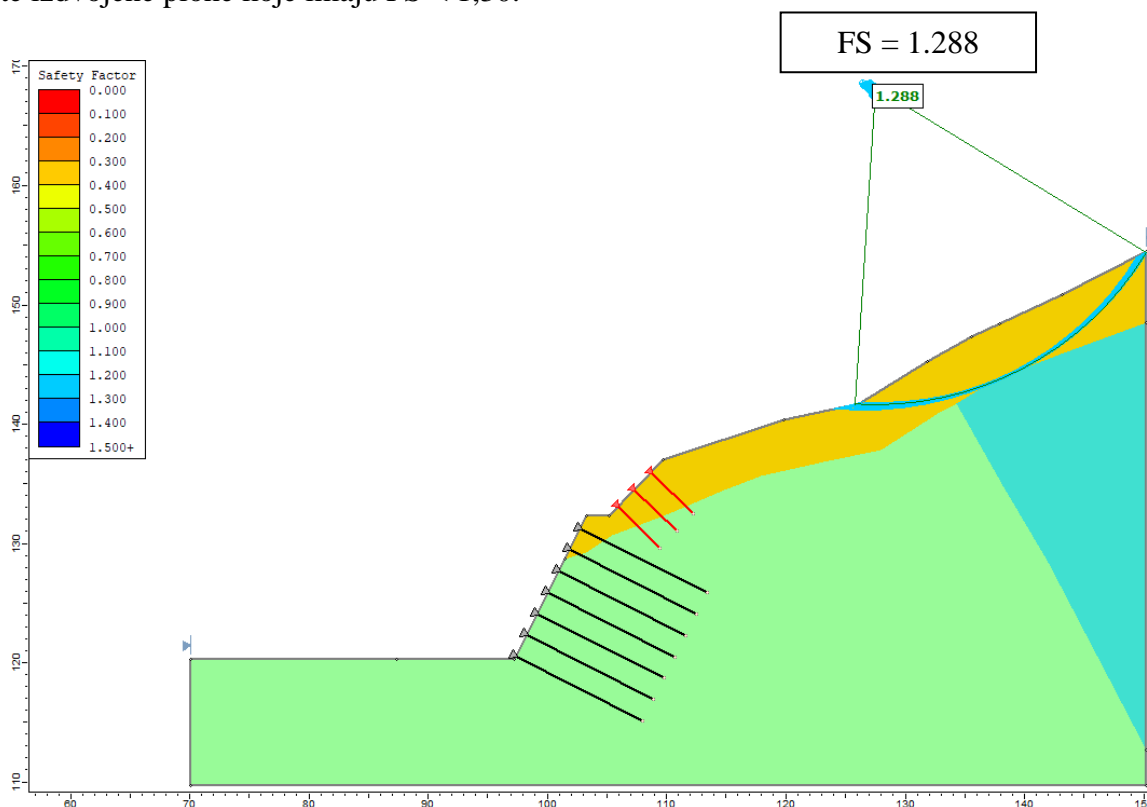
U Tablici 3. prikazana su svojstva korištenih sidara kao što je njihova duljina, kapacitet i raster na kojemu su postavljena.

Tablica 3. Svojstva sidreno podgradnog sklopa

| <b>TIP SIDRA</b>             | <b>DULJINA [m]</b> | <b>RASTER [m]</b> | <b>KAPACITET [kN/sidro]</b> |
|------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|
| Mehanički usidrena (pasivna) | 12                 | 2 x 2             | 600                         |
| Mehanički usidrena (pasivna) | 5                  | 2 x 2             | 600                         |

Iz tablice je vidljivo kako su duljina i raster jednaki kao i kod modela 3, dok je kapacitet po sidru povećan sa 400 na 600 kN.

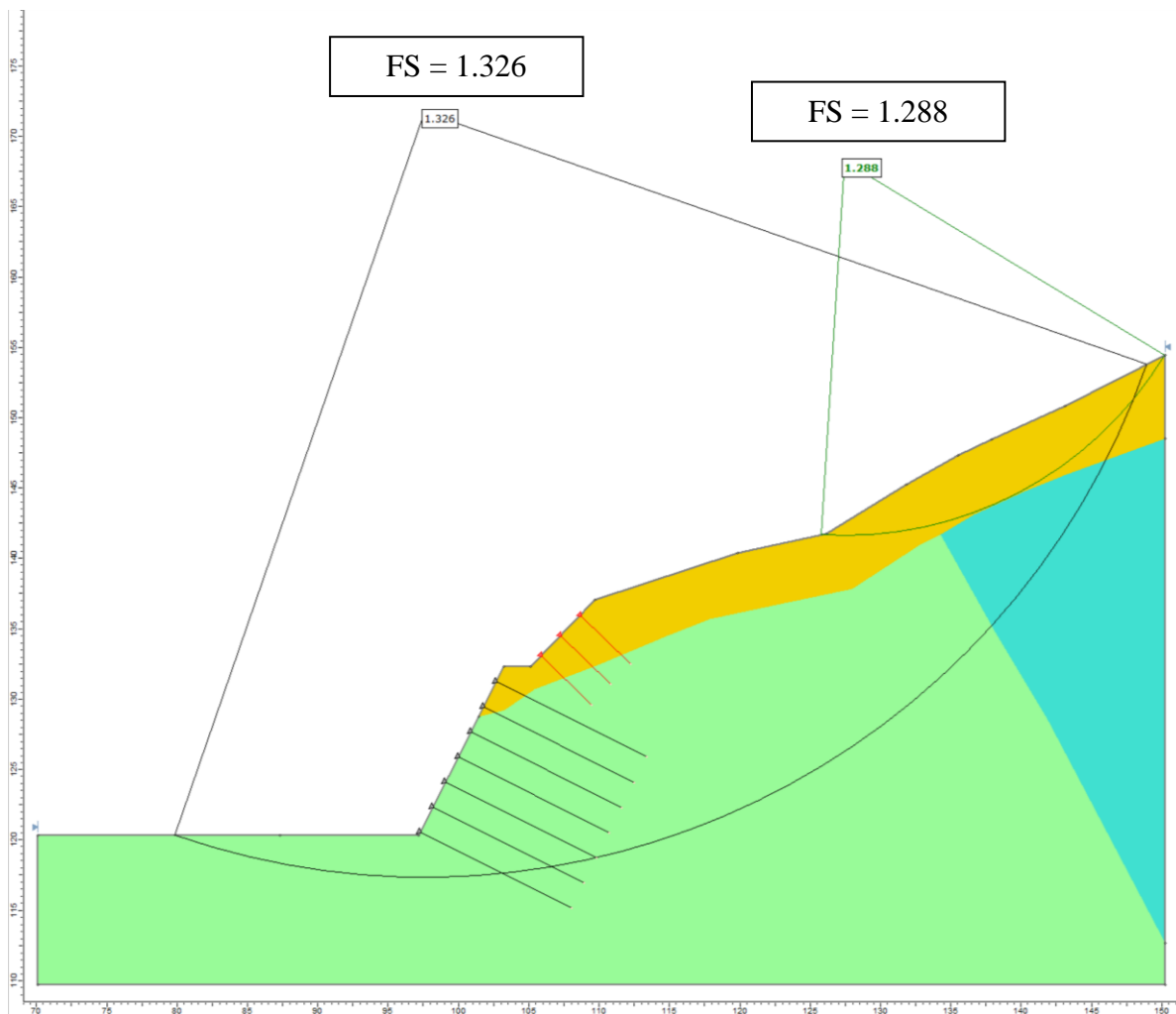
Slika 67. prikazuje najmanji dobiveni faktor sigurnosti za odabrani sidreno podgradni sklop, te izdvojene plohe koje imaju FS < 1,30.



Slika 67. Model 4 – faktor sigurnosti i plohe sa FS < 1,30

Kako je vidljivo sa slike, nakon implementacije sidara u model, klizna ploha s min FS nalazi izvan područja zahvata i iznosi (FS = 1,29).

Slika 68. prikazuje FS za kritičnu kliznu plohu nakon provedenih mjera sanacije.



Slika 68. Model 4 – faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu

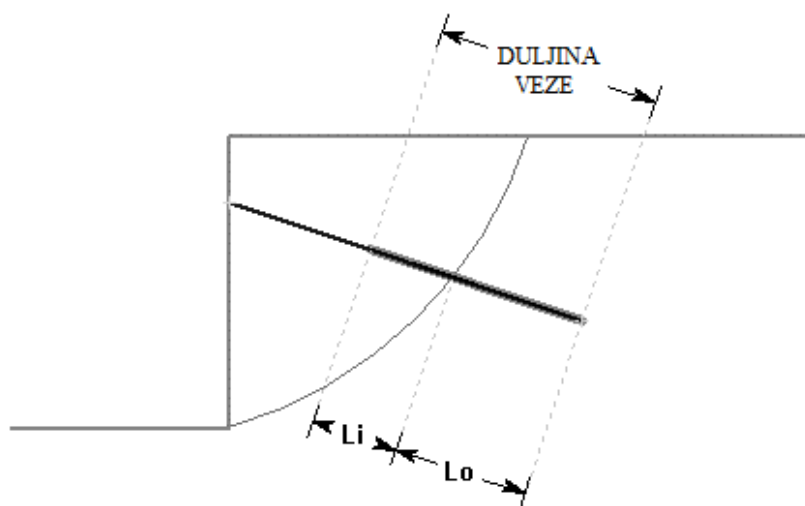
Kako je vidljivo sa slike, faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu u kojoj je izveden sidreno podgradni sklop iznosi  $FS = 1,33$  što znači da je  $FS > 1,30$  što udovoljava traženim zahtjevima stabilnosti.

Iz rezultata modela 3 i 4 vidljivo je kako je dobiven gotovo isti faktor sigurnosti za isti tip sidara koja se razlikuju jedino u načinu prijenosa sile na podlogu (aktivno i pasivno). Međutim, pri korištenju pasivnih sidara, kapacitet svakog sidra povećan je sa 400 kN na 600 kN u odnosu na aktivna sidra. Razlog povećanja kapaciteta je činjenica da ukoliko bi se koristio isti kapacitet sidara od 400 kN, FS bi bio manji od 1,30 što ne udovoljava traženim zahtjevima stabilnosti. Prema tome, može se zaključiti kako je ekonomičnije koristiti aktivna sidra kapaciteta 400 kN, a da pokos i dalje ostane stabilan.

### 6.5. Model 5 – sidreno podgradni sklop 3

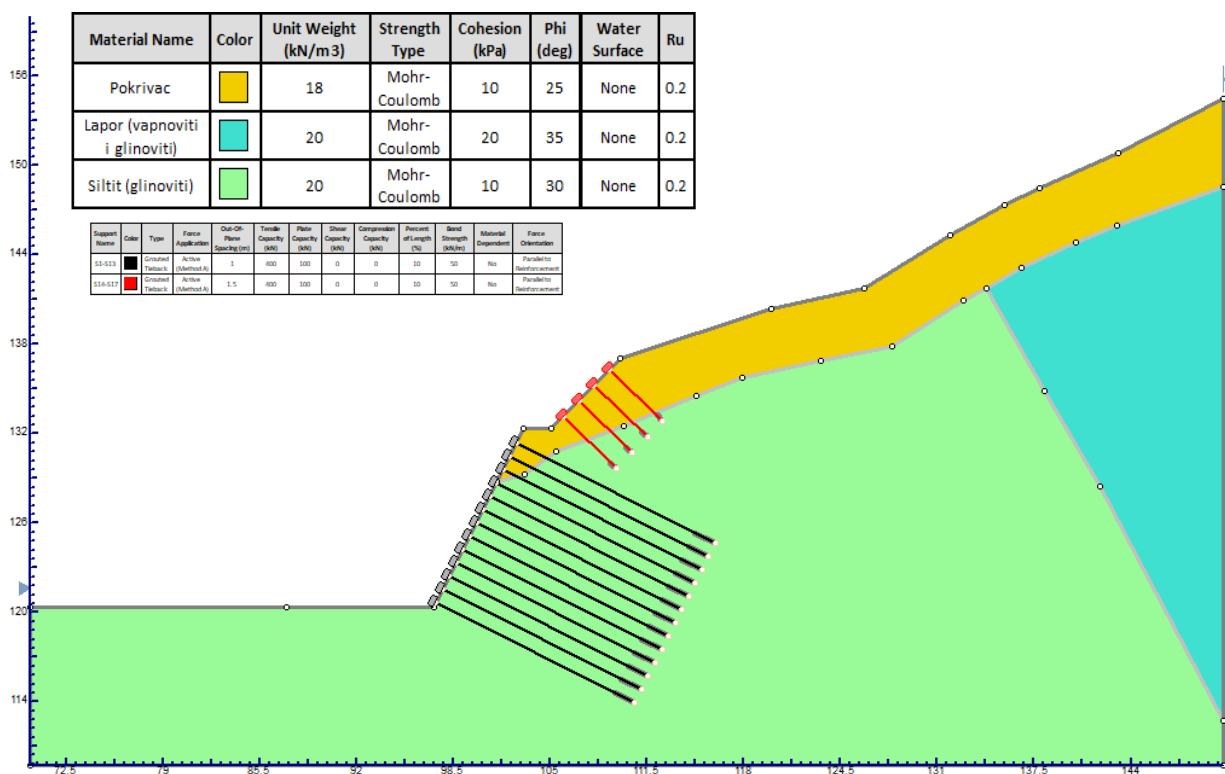
U modelima 5 i 6 korištena su injektirana sidra (eng. *grouted tieback*), uz razliku načina prijenosa sile na podlogu kao i u prijašnjim modelima. Nosivost ovakvih sidara definirana je kao sila po jedinici duljine. Međutim, bitno je napomenuti da je ta duljina definirana kao duljina duž sidra. Maksimalna sila izvlačenja je prema tome jednaka duljini veze sidra koja ostvaruje kontakt sa materijalom, pomnožena sa jačinom veze tog kontakta [46]. Kako bi se poboljšao kontakt i povećala otpornost tla i time spriječilo izvlačenje, kroz rupe sidra se pod pritiskom upumpava injekcijska smjesa.

Slika 69. shematski prikazuje spomenutu karakterističnu duljinu veze kod proračuna ovakvih sidara gdje  $L_i$  predstavlja duljinu veze sidra unutar klizne mase, dok  $L_o$  predstavlja duljinu veze sidra ugrađene izvan klizne plohe/nestabilne zone.



Slika 69. Duljina veze injektiranih sidara [46]

Na Slici 70. prikazan je model 5, sidreno podgradni sklop koji se sastoji od injektiranih sidara sa aktivnim prijenosom sile na podlogu.



Slika 70. Model 5 – sidreno podgradni sklop

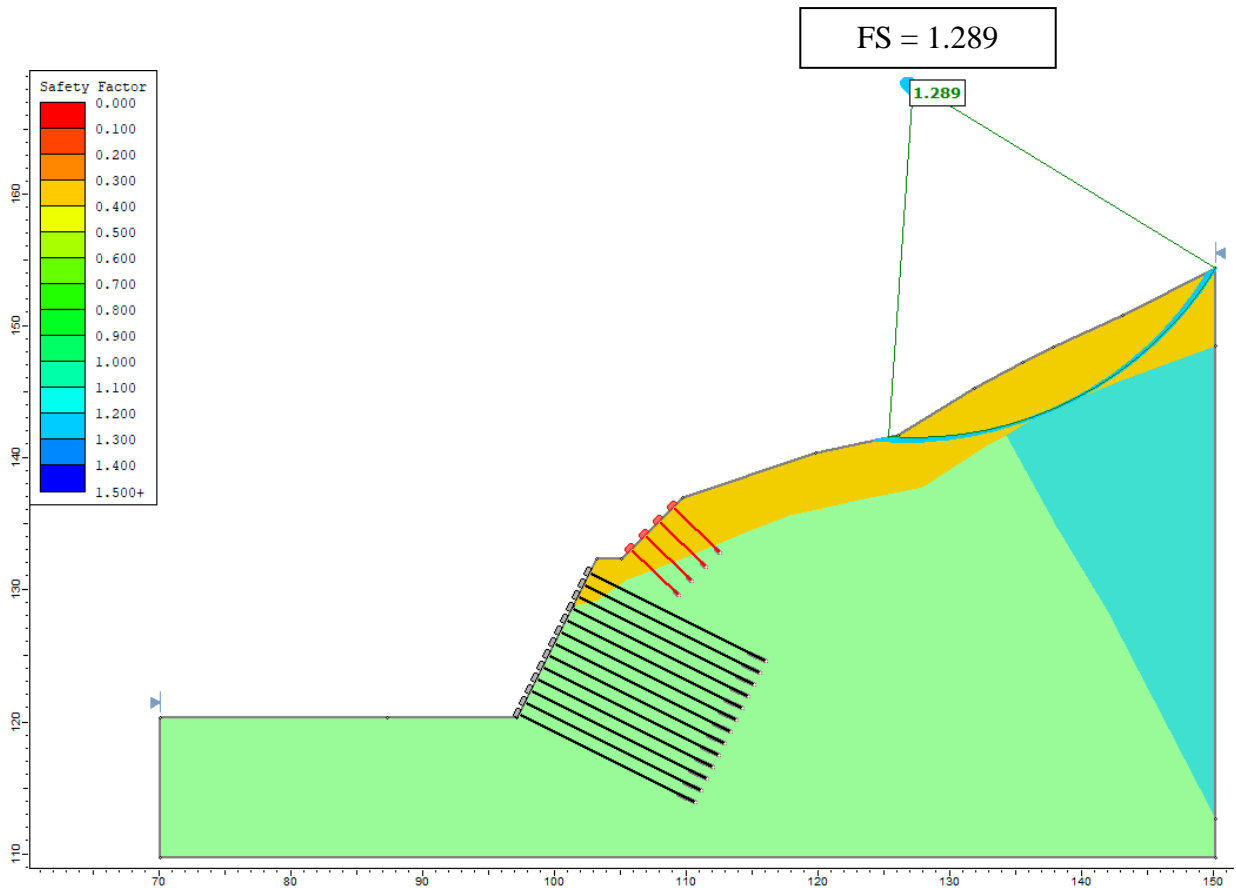
U Tablici 4. prikazana su svojstva korištenih sidara kao što je njihova duljina, kapacitet i raster na kojemu su postavljena.

Tablica 4. Svojstva sidreno podgradnog sklopa

| <b>TIP SIDRA</b>            | <b>DULJINA [m]</b> | <b>RASTER [m]</b> | <b>KAPACITET [kN/sidro]</b> |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|
| Injektirana sidra (aktivna) | 15                 | 1 x 1             | 400                         |
| Injektirana sidra (aktivna) | 5                  | 1,5 x 1,5         | 400                         |

Iz tablice je vidljivo kako se duljina sidara kreće od 15 m za donju etažu koja je većeg nagiba od one iznad gdje su predviđena sidra duljine 5 m. Raster na kojima su postavljena iznosi 1 m u horizontalnoj i 1 m u vertikalnoj ravnini za donju etažu, te 1,5 x 1,5 m za gornju. Kapaciteti po sidru iznose 400 kN.

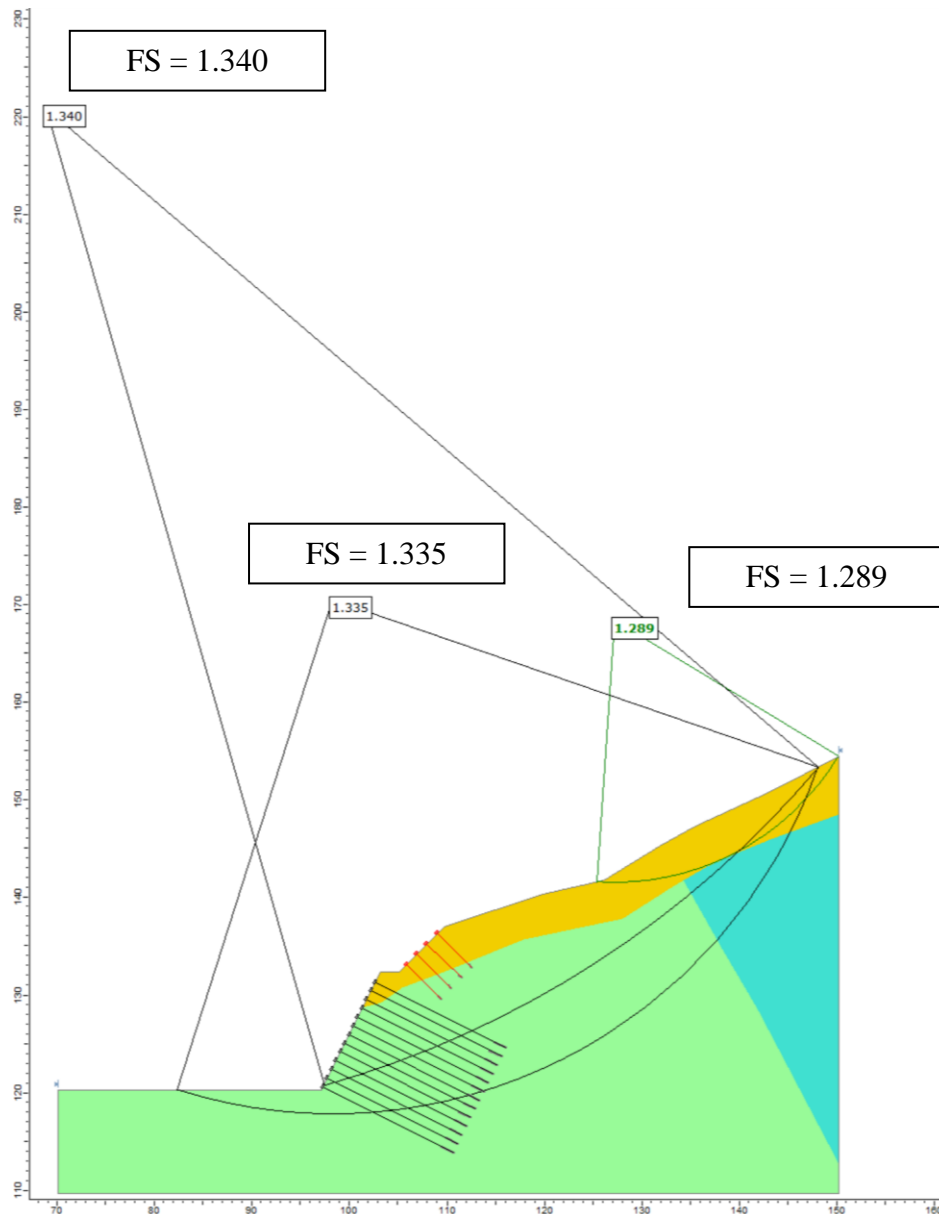
Slika 71. prikazuje najmanji dobiveni faktor sigurnosti za odabrani sidreno podgradni sklop, te izdvojene plohe koje imaju FS < 1,30.



Slika 71. Model 5 – faktor sigurnosti i plohe sa FS < 1,30

Kako je vidljivo sa slike, nakon implementacije sidara u model, klizna ploha s min FS nalazi izvan područja zahvata i iznosi (FS = 1,29).

Slika 72. prikazuje FS za kritičnu kliznu plohu nakon provedenih mjera sanacije.

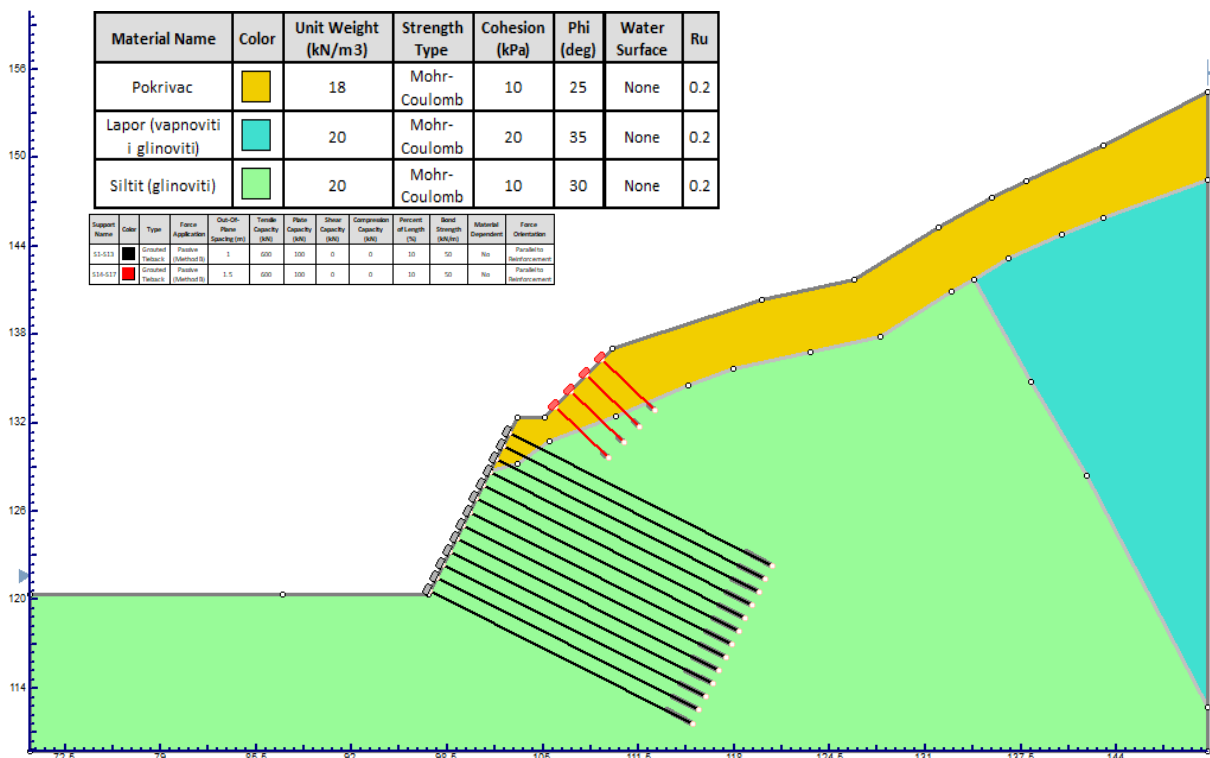


Slika 72. Model 5 – faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu

Kako je vidljivo sa slike, faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu u kojoj je izveden sidreno podgradni sklop iznosi  $FS = 1,34$  što znači da je  $FS > 1,30$  što udovoljava traženim zahtjevima stabilnosti.

### 6.6. Model 6 – sidreno podgradni sklop 4

Sidreno podgradni sklop kod modela 6 također se sastoji od injektiranih sidara, uz razliku da je u ovom modelu način prijenosa sile na podlogu pasivan. Model 6 prikazan je na Slici 73.



Slika 73. Model 6 – sidreno podgradni sklop

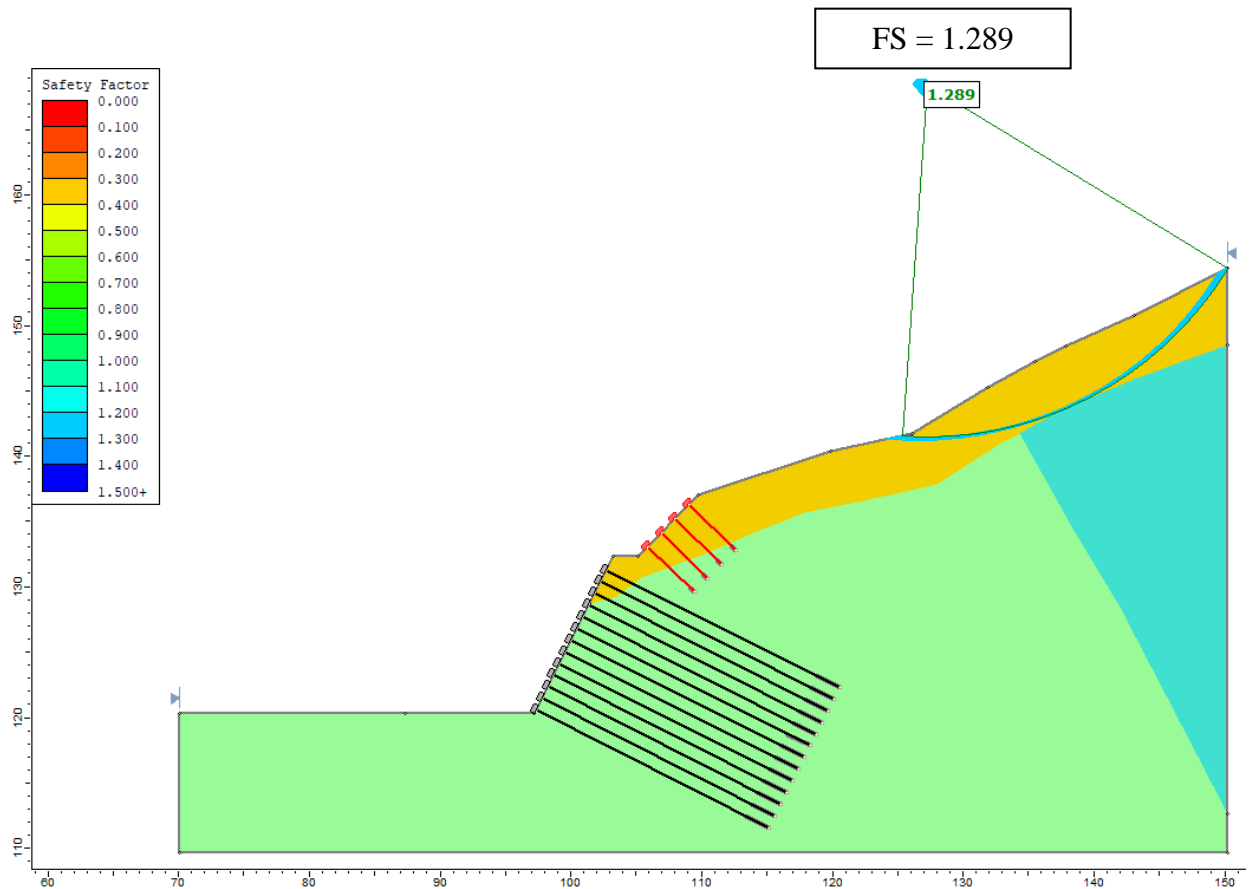
U Tablici 5. prikazana su svojstva korištenih sidara kao što je njihova duljina, kapacitet i raster na kojemu su postavljena.

Tablica 5. Svojstva sidreno podgradnog sklopa

| <b>TIP SIDRA</b>            | <b>DULJINA [m]</b> | <b>RASTER [m]</b> | <b>KAPACITET [kN/sidro]</b> |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|
| Injektirana sidra (pasivna) | 20                 | 1 x 1             | 600                         |
| Injektirana sidra (pasivna) | 5                  | 1,5 x 1,5         | 600                         |

Iz tablice je vidljivo kako se duljina sidara kreće od 20 m za donju etažu koja je većeg nagiba od one iznad gdje su predviđena sidra duljine 5 m. Raster na kojima su postavljena iznosi 1 m u horizontalnoj i 1 m u vertikalnoj ravnini za donju etažu, te 1,5 x 1,5 m za gornju. Kapaciteti po sidru iznose 600 kN.

Slika 74. prikazuje najmanji dobiveni faktor sigurnosti za odabrani sidreno podgradni sklop, te izdvojene plohe koje imaju  $FS < 1,30$ .

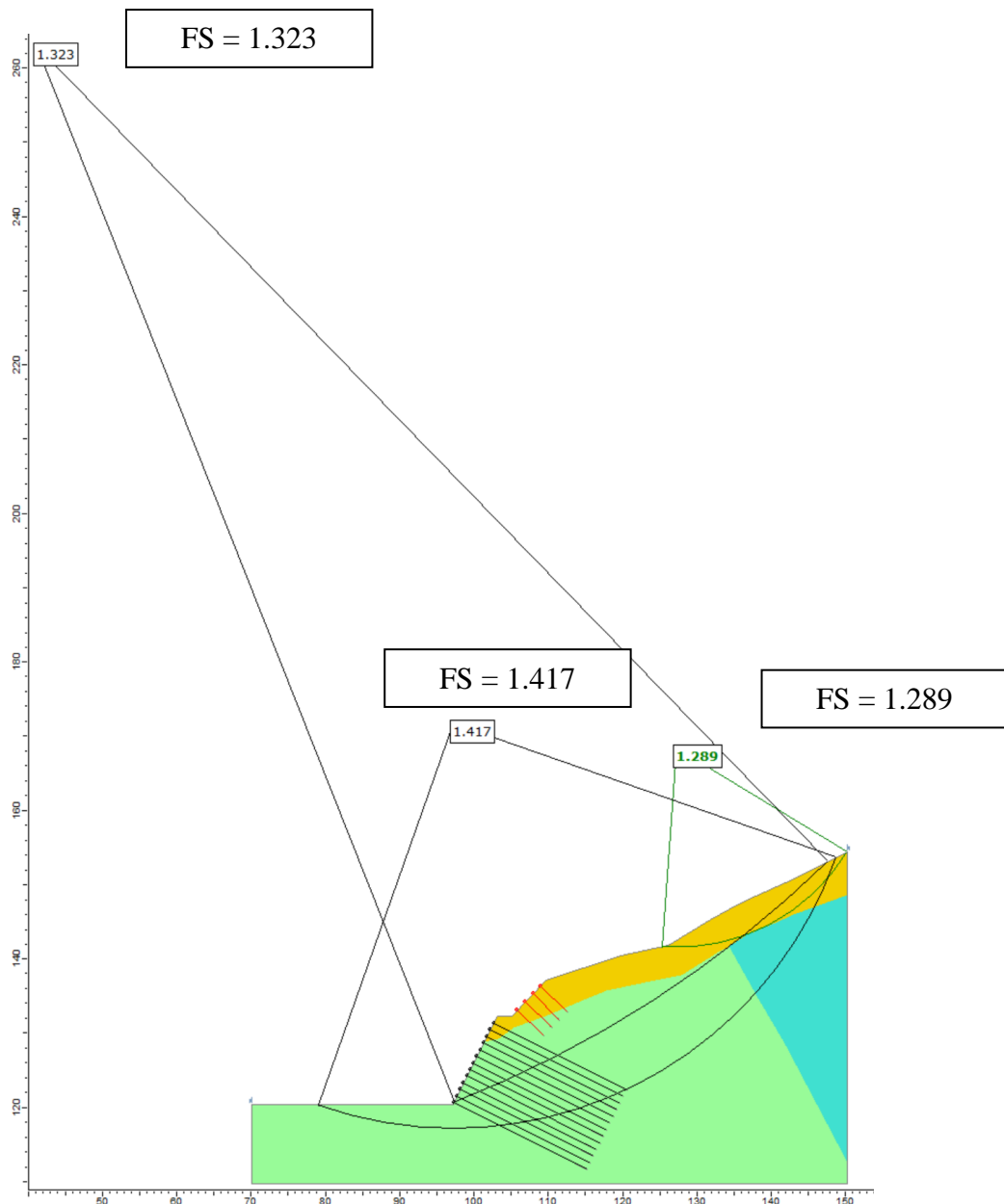


Slika 74. Model 6 – faktor sigurnosti i plohe sa  $FS < 1,30$

Kako je vidljivo sa slike, nakon implementacije sidara u model, klizna ploha s min FS nalazi izvan područja zahvata i iznosi ( $FS = 1,29$ ).

Slika 75. prikazuje FS za kritičnu kliznu plohu nakon provedenih mjera sanacije.





Slika 75. Model 6 – faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu

Kako je vidljivo sa slike, faktor sigurnosti za kritičnu kliznu plohu u kojoj je izveden sidreno podgradni sklop iznosi  $FS = 1,42$  što znači da je  $FS > 1,30$  što udovoljava traženim zahtjevima stabilnosti.

Kao i kod prethodnih modela, iz rezultata modela 5 i 6 vidljivo je kako je dobiven gotovo isti faktor sigurnosti za isti tip sidara koja se razlikuju jedino u načinu prijenosa sile na podlogu (aktivno i pasivno). Međutim, pri korištenju pasivnih sidara, kapacitet svakog sidra povećan je sa 400 kN na 600 kN u odnosu na aktivna sidra. Također, osim povećanja kapaciteta, dužina pasivnih sidara povećana je sa 15 m na 20 m. Razlog povećanja kapaciteta

i dužine sidara je činjenica da ukoliko bi se koristio isti kapacitet sidara od 400 kN, te dužina od 15 m, FS bi bio manji od 1,30 što ne udovoljava traženim zahtjevima stabilnosti. Prema tome, može se zaključiti kako je ekonomičnije koristiti aktivna sidra kapaciteta 400 kN, a da pokos i dalje ostane stabilan.

Dobiveni faktori sigurnosti modela 3 i 4 ( $FS = 1,316$  i  $FS = 1,326$ ), te modela 5 i 6 ( $FS = 1,335$  i  $FS = 1,417$ ) su veći od 1,30, te se uzimaju kao dostatni jer je zaštita privremenog karaktera, odnosno, po završetku iskopa ona će biti zatrpana.

## 7. TEHNIČKI UVJETI IZVEDBE RADOVA

Kako je već rečeno u uvodnom dijelu, za analizu je odabrana lijeva strana predusjeka sa najvećim i najkritičnijim stijenskim pokosom koji se nalazi na stacionaži od km 0+089.00 do 0+115.55. Donja etaža pokosa visine 12 m i nagiba 2:1, dok je gornja etaža visine oko 5,5 m i nagiba 1:1.

### **Opazanja na stijenskom pokosu**

Geotehničkim projektom predviđena su mjerenja pomaka (geodetska mjerenja prostornih pomaka, mjerenja horizontalnih pomaka u vertikalnom inklinometru, horizontalnih pomaka u deformetrima) i vertikalnih pomaka u vertikalnom deformetru tijekom i nakon izvođenja predusjeka. Predviđeno je da se tijekom izvođenja radova, vrše geodetska mjerenja eventualnih pomaka ugrađenih repera. Obavlja se mjerenje prostornih pomaka. Cilj ovih mjerenja je kontrola stabilnosti pokosa predusjeka kako bi se u slučaju potrebe na vrijeme poduzele dodatne mjere zaštite, odnosno mogućnost interpretacije pomaka mjerenih u deformetrima kao veličine apsolutnih pomaka [38].

Mjerenje horizontalnih pomaka tla u vertikalno postavljenom inklinometru i deformetru zasniva se na mjerenju relativnih kuteva zaokreta i mjerenju relativnih deformacija u tlo ugrađenih PVC cijevi promjera  $\Phi 71/60$  mm. Cijevi se injektiranjem ugrađuju u izvedene bušotine promjera  $\Phi 100$  mm. Mjerenja linijskih deformacija i pomaka tla po dubini kliznim deformetrom zasniva se na mjerenju relativnih deformacija u tlo ugrađenih specijalnih PVC cijevi promjera  $\Phi 27/32$  mm. Cijevi su duljine 1 m i spajaju se specijalnim teleskopskim spojnicama. Spojnice se teleskopski deformiraju i tako omogućavaju mjerenje relativnih deformacija [38].

### **Tehnički uvjeti izvedbe**

Nakon geodetskog iskolčenja projektiranog pokosa te skinutog humusa, rušenja stabala, vađenja panjeva i ugradnji vertikalnih inklinometara pristupa se iskopu. Iskop počinje od gornjeg ruba zahvata prema dnu. Materijal se kopa i transportira niz pokos guranjem prema donjem platou, gdje se utovaruje u transportno sredstvo i odvozi u trasu odnosno deponije, a sve u skladu s Glavnim projektom trase. Materijal u kojem će se izvoditi iskop je B i C kategorije. Tijekom iskopa treba na pokose ugraditi repere za praćenje pomaka, a za verifikaciju podgradnih mjera ugrađuju se deformetri i inklinometri [38].

Iskop ispod postojećeg nivoa može se provoditi nakon ugradnje deformetra, te obavljanja nultog mjerenja, a uz pridržavanje slijedećeg režima:

- završetak rada na jednoj kampadi podrazumijeva: nanošenje mlaznog betona, ugradnju sidara, postavljanje nosivih armaturnih mreža, postavljanje podložnih pločica i zatezanje sidara
- iskop slijedeće vertikalne kampade;
- mjerenje u deformetru, predaja podataka projektantu;
- ponavljanje ciklusa [38].

### **Izvedene mjere stabilizacije**

Sidreno podgradni sklop - lijeva strana predusjeka od km 0+089.00 do 0+115.55 i portalni zasjek – donja etaža do visine 12 m i nagiba 2:1, te gornja etaža visine do 5,5 m i nagiba 1:1.

- nagibi pokosa 2:1 i 1:1
- mlazni beton debljine 10 cm (dva sloja po 5 cm) i armaturna mreža Q188, te aktivna sidra
- osim površinskog tipa zaštite u svrhu kontrole porednih pritisaka obloge podgradnog sklopa provodi se dreniranje procjednicama promjera 50 mm i duljine 2 m na rasteru od 2 m

Redovi sidara navode se od dna pokosa prema vrhu:

1. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 12$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m
2. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 12$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m
3. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 12$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m
4. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 12$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m
5. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 12$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m
6. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 12$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m
7. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 12$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m
8. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 5$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m
9. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 5$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m
10. red sidara – Tip mehanički usidrena štapna sidra, duljine  $l = 5$  m, na rasteru  $2 \times 2$  m

U Tablici 6. prikazan je popis izvedenih mjera stabilizacije.

*Tablica 6. Izvedene mjere stabilizacije*

| Početak zaštite pokosa – stacionaža km | Završetak zaštite pokosa – stacionaža km | Mehanički usidrena štapna sidra, l = 12 m | Mehanički usidrena štapna sidra, l = 5 m | Mlazni beton, dva sloja, d = 5 cm | Armaturna mreža |
|--|--|---|--|-----------------------------------|-----------------|
| 0 + 089.00                             | 0 + 115.55                               | 107                                       | 39                                       | d = 10 cm                         | Q188            |
|  |  |   |  | d = 10 cm                         | Q188            |

Iz tablice je vidljivo kako je ukupno izvedeno 107 mehanički usidrenih štapnih sidara duljine 12 m u donjoj etaži, te 39 mehanički usidrenih štapnih sidara duljine 5 m u gornjoj etaži.

## 8. ZAKLJUČAK

Ovim radom predstavljene su mjere i načini kojima se postiže stabilizacija stijenskih pokosa, te kako se potencijalni slomovi u stijenskoj masi mogu prepoznati, ali i pratiti. Kroz svakodnevni život susrećemo se sa stijenskim pokosima, bilo na cestama ili željezničkim prugama, prije ili kasnije se nailazi na stijenski pokos i razne poduzete mjere stabilizacije jednog takvog sustava. Očito je kako su stijenski pokosi dio naše svakodnevnice, te da je njihovo poznavanje i rješavanje problema stabilnosti ključno za sigurnost ljudi, dobara i imovine. Stoga bi inženjerski doprinos, odnosno razina posvećene pažnje u obuhvaćanju ovog područja i poznavanju mehanizama sloma, načinu stabilizacije i odabiru odgovarajuće podgrade i mjera stabilizacije trebala biti na visokoj, odnosno najvišoj mogućoj razini. Također, važno je na vrijeme prepoznati potencijalne nestabilnosti i slomove prije nego li se oni stvarno dogode, stoga, monitoring ovakvih sustava je prvi korak u umanjenju hazarda od klizanja, pružanju sigurnosti kroz projektiranje i planiranje spomenutih mjera sanacije i osiguranja stabilnosti.

U radu je prikazan pristup rješavanju problema sanacije odnosno projektiranju rješenja izvedbe podgradnog sustava putem računalnih modela, na primjeru predusjeka tunela. Računalnim modelima prikazano je kako se varijacijom načina prijenosa sile, dužinama i razmakom između sidara mijenja FS za svaki od danih scenarija. Korištena su mehanički usidrena štapna sidra i injektirana sidra sa obje varijacije u načinu prijenosa sile na podlogu, tj. aktivno i pasivno.

Bez adekvatnog znanja o ponašanju stijenske mase, mehanizmima sloma i odgovarajućeg stupnja monitoringa nije moguće ponuditi takvo rješenje za bilo koju lokaciju i uvjete. Iz dobivenih rezultata provedenih proračuna vidljivo je kako su se aktivna sidra u usporedbi s pasivnim pokazala kao povoljnije rješenje jer se pri korištenju aktivnih sidara za isti kapacitet i dužinu sidara dobiva FS koji odgovara traženim uvjetima sigurnosti, što nije slučaj pri korištenju pasivnih sidara uz iste parametre. Kako bi se dobio FS koji odgovara traženim uvjetima sigurnosti sličan onome pri korištenju aktivnih sidara, pasivna sidra su zahtijevala povećanje kapaciteta sa 400 kN na 600 kN, te povećanje dužine sidra sa 15 m na 20 m. Dakle, vidljivo je kako su sidra s aktivnim prijenosom sile na podlogu povoljnije rješenje za dani slučaj. Međutim, svaki projekt je specifičan i ne postoji jedan „univerzalni“

način i metoda pristupa, stoga su računalni modeli veoma bitan faktor kako bi se prikazali razni scenariji i pritom odabralo najpovoljnije rješenje.

Nakon dobivanja najpovoljnijeg rješenja, pristupa se razradi odabranog proračunskog modela i projektnog rješenja.

## LITERATURA

- [1] Roje-Bonacci, Tanja. (2015). Zaštita kosina i sanacija klizišta. Hrvatske Vode. 90. 352-360.
- [2] Wyllie D.C. Mah C.W. Hoek E. *Rock Slope Engineering : Civil and Mining*. 4th ed. London: Spon Press; 2004.
- [3] Dugonjić Jovančević, Sanja, Skripta Inženjerska mehanika stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2016.
- [4] Goodman, R. E. and Bray, J. (1976) Toppling of rock slopes. ASCE, Proc. Specialty Conf. on Rock Eng. for Foundations and Slopes, Boulder, CO, 2, 201–34.
- [5] Zavodni, Z.M. (2000) Time-dependent movements of open pit slopes. Slope Stability in Surface Mining. Soc. Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton CO, Ch. 8, pp. 81–7.
- [6] Savvaidis P. (2003), Existing Landslide Monitoring Systems and Techniques. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, The Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
- [7] Shao-tang L., Zhi-wu W. (2008). Choice of surveying methods for landslide monitoring. Proc. of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slope, pp. 1211-1216, Xi'an
- [8] Vamosi, S. and Berube, M. (1987) Is Parliament Hill moving Canadian Dept. Energy Mines and Resources, Geos Magazine, 4, 18–22.
- [9] Wyllie, D. C. and Munn, F. J. (1979) Use of movement monitoring to minimize production losses due to pit slope failure. Proc. 1st Int. Symp. on Stability in Coal Mining, Vancouver, Canada, Miller Freeman Publications, pp. 75–94.
- [10] Arbanas, Ž., Projektiranje u stijenskim masama, Tečaj stručnog usavršavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2008.
- [11] Dunnicliff, J. (1993). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [12] Arbanas, Ž. Predavanja stabilnost kosina, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
- [13] Terzaghi K., Peck R.B. (1967). Soil mechanics in Engineering Practice. John Wiley, New York.
- [14] Peck R.B. (1969) Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Géotechnique, 19(2), 171-187.



- [15] Transportation Research Board (TRB) (1996) Landslides, Investigation and Mitigation. National Research Council, Special Report 247, Ch. 1, Washington DC, 673 pp.
- [16] Windsor C.R. (1996) Rock Reinforcement Systems, 1996 Schlumberger Award – Special Lecture, Proceeding of EUROCK '96, Special Papers Volume, Torino, Italy, <http://www.roctec.com.au/papers.html>.
- [17] Stillborg B. (1994) Professional Users Handbook for Rock Bolting, Trans Tech Publications, Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 18, 2nd Edn., Clausthal-Zellerfeld, 164p
- [18] Littlejohn, G. S. and Bruce, D. A. (1977) Rock Anchors-State of the Art. Foundation Publications Ltd., Brentwood, Essex, UK.
- [19] Federal Highway Administration (FHWA) (1982) Tiebacks. Publication No. FHWA/RD 82/047, Washington, DC.
- [20] British Standards Institute (BSI) (1989) British Standard Code of Practice for Ground Anchorages, BS 8081: 1989. BSI, 2 Park Street, London, W1A 2BS, 176 pp.
- [21] Xanthakos, P. P. (1991) Ground Anchorages and Anchored Structures. John Wiley & Sons Inc., New York, 686 pp.
- [22] Post Tensioning Institute (PTI) (1996) Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors, 2nd edn. Phoenix, Az, 70 pp.
- [23] Wyllie, D. C. (1999) Foundations on Rock, 2nd edn, Taylor and Francis, London, UK, 401 pp.
- [24] American Concrete Institute (ACI) (1995) Specifications for Materials, Proportioning and Application of Shotcrete. ACI Report 506.2-95, Revised 1995.
- [25] Wyllie, D. C. and Wood, D. F. (1981) Preventative rock blasting protects track. Railway Track and Structures, Chicago, IL, Sept., 34–40.
- [26] Japan International Cooperation Agency : Nippon Koei Co., Ltd. : OYO International Corp., The study on risk management for sediment-related disaster in selected national highways in the Republic of the Philippines : final report ; Guide 3. -Guide to road slope protection, 2007.
- [27] Ritchie, A. M. (1963) Evaluation of rock fall and its control. Highway Research Record 17, Highway Research Board, NRC, Washington, DC, pp. 13–28.
- [28] Andrew, R. D. (1992a) Restricting rock falls. ASCE, Civil Engineering, Washington, DC, October, pp. 66–7.
- [29] Threadgold, L. and McNichol, D. P. (1985) Design and construction of polymer grid boulder barriers to protect a large public housing site for Hong Kong Housing Authority. Polymer Grid Reinforcement, Thomas Telford, London, UK

- [30] Barrett, R. K. and White, J. L. (1991) Rock fall prediction and control. Proc. National Symp. on Highway and Railway Slope Maintenance, Assoc. of Eng. Geol., Chicago, pp. 23–40.
- [31] Ciarla, M. (1986) Wire netting for rock fall protection. Proc. 37th Ann. Highway Geology Symp., Helena, Montana, Montana Department of Highways, pp. 10–118.
- [32] Dugonjić Jovančević, S., Grošić, M., Udovic, D. (2008). Designing, constructing and monitoring of slopes in rock mass in Croatia. 10.1201/9780203883204.ch88
- [33] Smith, D. D. and Duffy J. D. (1990) Field Tests and Evaluation of Rock Fall Restraining Nets. Division of Transportation Materials and Research, Engineering Geology Branch, California Department of Transportation, Sacramento, CA.
- [34] Duffy, J. D. and Haller, B. (1993) Field tests of flexible rock fall barriers. Proc. Int. Conf. on Transportation Facilities through Difficult Terrain, Aspen, Colorado, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 465–73.
- [35] Dugonjić Jovančević, S., Predavanja inženjerska mehanika stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.
- [36] Yoshida, H., Ushiro, T., Masuya, H. and Fujii, T. (1991) An evaluation of impulsive design load of rock sheds taking into account slope properties (in Japanese). J. Struct. Eng., 37A (March), 1603-16.
- [37] Mamaghani, I. H. P., Yoshida, H. and Obata, Y. (1999) Reinforced expanded polystyrene Styrofoam covering rock sheds under impact of falling rock. Proc. Joint Japan–Swiss Sci.
- [38] OpusGEO d.o.o. (2008.) Zaobilaznica Rijeke – južni kolnik, Izvedbeni projekt: Privremena zaštita pokosa ulaznog predusjeka tunela „Trsat“ u km 0+097, Zagreb

Web izvori:

- [39] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/aa/Leica\\_TCRP\\_1203.jpg/800px-Leica\\_TCRP\\_1203.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/aa/Leica_TCRP_1203.jpg/800px-Leica_TCRP_1203.jpg), pristupljeno: 15.5.2023.
- [40] [https://www.geobrugg.com/en/Rockfall-Protection-77472,7858.html?branche\\_id=59494](https://www.geobrugg.com/en/Rockfall-Protection-77472,7858.html?branche_id=59494), pristupljeno: 15.5.2023.
- [41] [https://www.geobrugg.com/file-55750/downloadcenter/level1-brochures/Rockfall-Impact-Attenuators/ATTENUATOR\\_product\\_profile\\_200131-EN.pdf](https://www.geobrugg.com/file-55750/downloadcenter/level1-brochures/Rockfall-Impact-Attenuators/ATTENUATOR_product_profile_200131-EN.pdf), pristupljeno: 15.5.2023.
- [42] [https://www.geobrugg.com/file-110100/downloadcenter/level1-media-review/Media-Review-2022/Selection-102\\_Dec21\\_NZGeo-News.pdf](https://www.geobrugg.com/file-110100/downloadcenter/level1-media-review/Media-Review-2022/Selection-102_Dec21_NZGeo-News.pdf), pristupljeno: 15.5.2023.
- [43] <https://www.rocscience.com/help/swedge/documentation/support/bolt-theory/how-bolts-are-implemented-in-swedge>, pristupljeno: 28.5.2023.

[44] <https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/material-properties/define-material-properties/water-parameters/water-parameters-2>, pristupljeno: 28.5.2023.

[45] <https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/support-2/define-support-properties/end-anchored>, pristupljeno: 28.5.2023.

[46] <https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/support-2/define-support-properties/grouted-tieback>, pristupljeno: 28.5.2023.

## 9. NACRTNA DOKUMENTACIJA – GRAFIČKI PRILOZI

Prilog 1: SITUACIJA, M 1:500

Prilog 2: POPREČNI PRESJEK, M 1:250

Prilog 3: POGLED NA STIJENSKI POKOS, M 1:100

Prilog 4: DETALJ MEHANIČKI USIDRENOG ŠTAPNOG SIDRA, M 1:50



LEGENDA

- MJERE SANACIJE
- 0+089.00 - 0+115.55
- ZONA OBUHVATA
- 0+070.00 - 0+150.00

**G F** GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI

Diplomski rad:  
Zaštita stijenskog pokosa  
ulaznog predusjeka tunela

Sadržaj nacrt:  
Situacija

Student: Andrija Papež

Kolegij: Podzemne građevine i tuneli

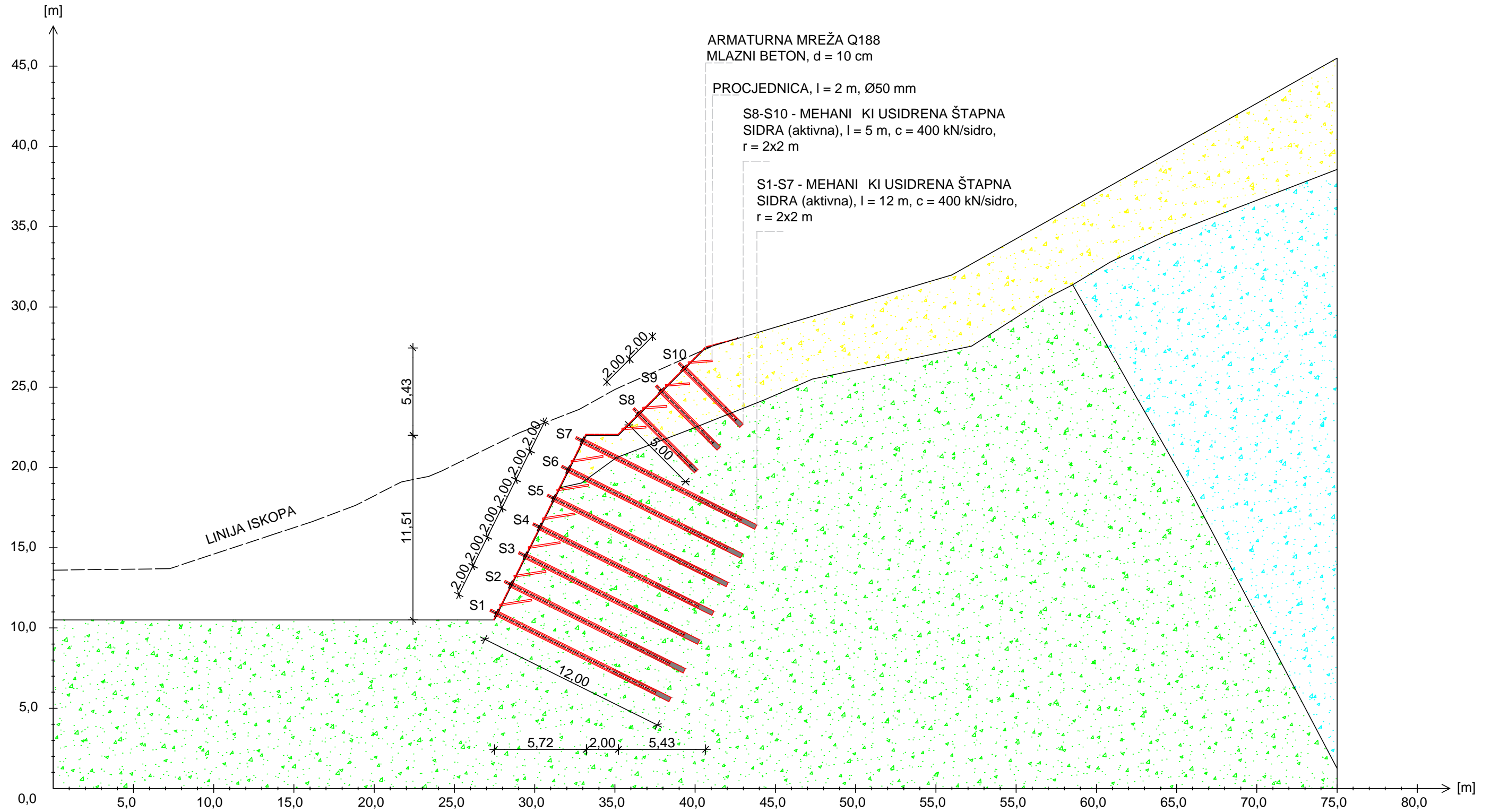
Mentor: izv.prof.dr.sc. Sanja Dugonjić Jovančević  
Komentor: doc.dr.sc. Josip Peranić

Datum:  
03.07.203.


Mjerilo:  
1:500

List br.:  
1.

# POPRE NI PRESJEK

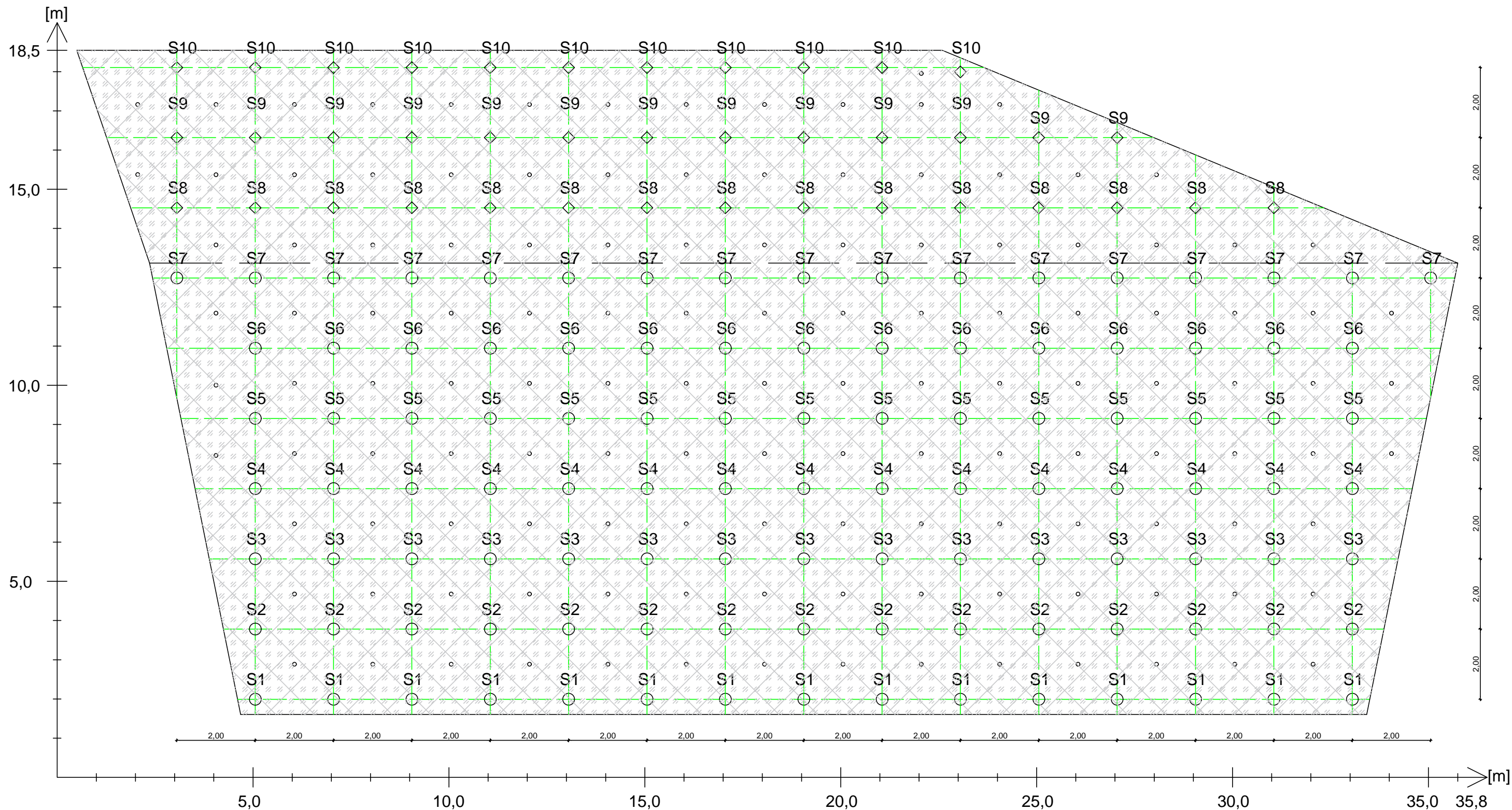


## LEGENDA





-  POKRIVA
-  LAPOR (vapnoviti i glinoviti)
-  SILTIT (glinoviti)

|   |  |   |                                     |
|---|--|---|-------------------------------------|
| <b>G</b>  | GRA EVINSKI FAKULTET, SVEU ILIŠTE U RIJECI                               |   |                                     |
| <b>F</b>  | Diplomski rad:<br>Zaštita stijenskog pokosa<br>ulaznog predusjeka tunela |   | Sadržaj nacрта:<br>Popre ni presjek |
| Student: Andrija Papež  |  | Kolegij: Podzemne gra evine i<br>tuneli |                                     |
| Mentor: izv.prof.dr.sc. Sanja<br>Dugonji Jovan evi<br>Komentor: doc.dr.sc. Josip Perani |  | Datum:<br>03.07.2023.                   | Mjerilo:<br>1:250                   |
|   |  | LIST<br>br.: 2                          |                                     |


# POGLED NA STIJENSKI POKOS



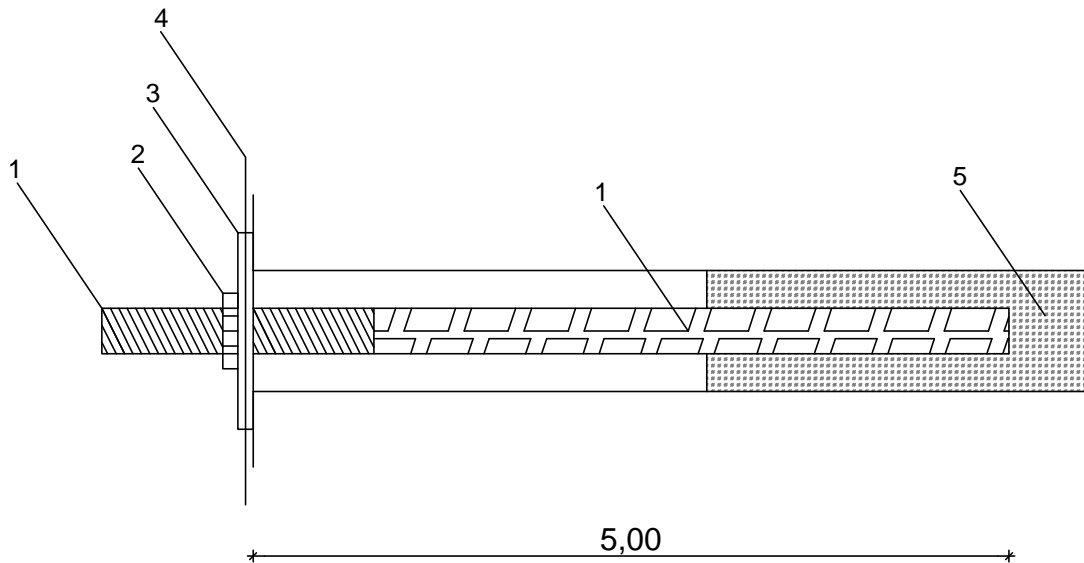
## LEGENDA

-  S1-S7 - MEHANI KI USIDRENA ŠTAPNA SIDRA (aktivna),  $l = 12 \text{ m}$ ,  $c = 400 \text{ kN/sidro}$ ,  $r = 2 \times 2 \text{ m}$
-  S8-S10 -MEHANI KI USIDRENA ŠTAPNA SIDRA (aktivna),  $l = 5 \text{ m}$ ,  $c = 400 \text{ kN/sidro}$ ,  $r = 2 \times 2 \text{ m}$
-  ARMATURNA MREŽA Q188
-  MLAZNI BETON,  $d = 10 \text{ cm}$

| Početak zaštite pokosa – stacionaža km | Završetak zaštite pokosa – stacionaža km | Mehanički usidrena štapna sidra, $l = 12 \text{ m}$ | Mehanički usidrena štapna sidra, $l = 5 \text{ m}$ | Mlazni beton, dva sloja, $d = 5 \text{ cm}$ | Armaturna mreža |
|--|--|---|--|---|-----------------|
| 0 + 089.00                             | 0 + 115.55                               | 107   | 39   | $d = 10 \text{ cm}$                         | Q188            |
|  |  |   |  | $d = 10 \text{ cm}$                         | Q188            |

|   |  |   |                   |
|---|--|---|-------------------|
|  <b>GRA EVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b> |  |   |                   |
| Diplomski rad:<br>Zaštita stijenskog pokosa ulaznog predusjeka tunela   |  | Sadržaj nacrt:<br>Pogled na stijenski pokos |                   |
| Student: Andrija Papež  |  | Kolegij: Podzemne građevine i tuneli        |                   |
| Mentor: izv.prof.dr.sc. Sanja Dugonji Jovan evi<br>Komentor: doc.dr.sc. Josip Perani  |  | Datum:<br>03.07.2023.                       | Mjerilo:<br>1:100 |
|   |  | LIST<br>br.: 3                              |                   |

DETALJ MEHANI KI USIDRENOG ŠTAPNOG SIDRA,  
(S8-S10)



LEGENDA

- 1 - Sidrena šipka
- 2 - Navrtka (vijak)
- 3 - Podložna ploča
- 4 - Armaturna mreža i mlazni beton
- 5 - Injekcijska smjesa

|   |  |   |                  |
|---|--|---|------------------|
| <b>G</b><br><b>F</b>  | GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI |   |                  |
| Diplomski rad:<br>Zaštita stijenskog pokosa<br>ulaznog predusjeka tunela                |  | Sadržaj nacrt:<br>Detalj mehanički usidrenog<br>štapnog sidra |                  |
| Student: Andrija Papež  |  | Kolegij: Podzemne građevine i<br>tuneli                       |                  |
| Mentor: izv.prof.dr.sc. Sanja<br>Dugonji Jovanović<br>Komentor: doc.dr.sc. Josip Perani |  | Datum:<br>03.07.2023.   | Mjerilo:<br>1:50 |
|   |  | LIST<br>br.: 4  |                  |