

# Stabilizacija zausjeka željezničkog tunela Rukavac

---

**Sambol, Karla**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:669722>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Karla Sambol

# STABILIZACIJA ZAUSJEKA ŽELJEZNIČKOG TUNELA RUKAVAC

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Karla Sambol

# STABILIZACIJA ZAUSJEKA ŽELJEZNIČKOG TUNELA RUKAVAC

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Lovorka Librić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Karla Sambol

# STABILIZATION OF THE CUT OF THE RAILWAY TUNNEL RUKAVAC

MASTER THESIS

Supervisor: izv. prof. dr. sc. Lovorka Librić

Zagreb, 2024.





OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:



## OBRAZAC 6

### IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

---

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

## SAŽETAK

U ovom radu rješava se problem stabilizacije zausjeka kod željezničkog tunela Rukavac koji se nalazi na pruzi M203 Rijeka – Šapjane – Državna Granica. Na temelju provedenih terenskih i laboratorijskih ispitivanja određene su vrijednosti parametara tla te je izrađen geotehnički model tla. Uvidom u uslojenost tla i njegove karakteristike odabrana je najoptimalnija mjera sanacije nastale nestabilnosti zausjeka – ugradnja pasivnih štapnih sidara čijim se povezivanjem dobiva sustav čavlanog tla. S obzirom na odabranu vrstu stabilizacije provedene su analize stabilnosti i naponsko deformacijske analize za nekoliko odabranih projektnih situacija te su također prikazane karakteristike i dimenzije ugrađenih pasivnih sidara. Za rješavanje svih analiza korišten je program GeoStudio 2021.4. Opisana su najčešće korištena ispitivanja pasivnih sidara koja se provode u svrhu kontrole i osiguranja kvalitete. Naposljetku izrađen je iskaz okvirnih troškova provedenog zahvata stabilizacije zausjeka.

Ključne riječi: zausjek, stabilizacija, pasivna sidra, analiza stabilnosti, naponsko deformacijska analiza, ispitivanja sidara

## SUMMARY

This thesis addresses the problem of stabilizing the cut at the Rukavac railway tunnel, located on the M203 railway line Rijeka – Šapjane – State Border. Based on conducted field and laboratory tests, the soil parameter values are determined and a geotechnical soil model is developed. By reviewing the soil stratification and its characteristics, the most optimal remediation measure for the resulting cut instability is selected – the installation of passive bar anchors which, when interconnected, form a soil nailing system. Given the chosen stabilization method, stability and stress – strain analyses are carried out for several selected project scenarios, and the characteristics and dimensions of the installed passive anchors are also presented. The software GeoStudio 2021.4 is used to perform all the analyses. The most commonly used tests for passive anchors, conducted to control and ensure quality, are described. Finally, an estimate of the costs of the undertaken cut stabilization work is provided.

Key words: cut, stabilization, passive anchors, stability analyses, stress – strain analyses, anchors testing

## SADRŽAJ

|  |     |
|--|-----|
| SAŽETAK.....   | i   |
| SUMMARY.....   | ii  |
| SADRŽAJ.....   | iii |
| 1. UVOD.....   | 1   |
| 2. OPĆENITO O PROJEKTU.....                                  | 2   |
| 2.1. Postojeće stanje zausjeka.....                          | 2   |
| 2.2. Geotehnički istražni radovi.....                        | 5   |
| 2.3. Geofizički istražni radovi.....                         | 10  |
| 2.3.1. Općenito o metodi.....                                | 10  |
| 2.3.2. Provođenje metode na terenu.....                      | 13  |
| 2.4. Karakteristični i proračunski parametri materijala..... | 17  |
| 2.5. Seizmičke karakteristike tla.....                       | 19  |
| 3. METODA STABILIZACIJE ZAUSJEKA.....                        | 22  |
| 3.1. Pasivna sidra.....                                      | 22  |
| 3.1.1. Čavloro tlo.....                                      | 24  |
| 4. GEOTEHNIČKE ANALIZE.....                                  | 27  |
| 4.1. Analize stabilnosti.....                                | 28  |
| 4.2. Naponsko deformacijske analize.....                     | 39  |
| 4.3. Dimenzioniranje elemenata pasivnih sidara.....          | 44  |
| 5. PROGRAM KONTROLE I OSIGURANJA KVALITETE.....              | 46  |
| 5.1. Ispitivanje pasivnih sidara.....                        | 48  |
| 5.1.1. Test čupanja sidra.....                               | 48  |
| 5.1.2. Tehnika akustične emisije.....                        | 49  |
| 5.1.3. Ispitivanje Boltometrom.....                          | 50  |

|   |    |
|---|----|
| 6. ISKAZ TROŠKOVA STABILIZACIJE ZAUSJEKA..... | 52 |
| 7. ZAKLJUČAK.....                             | 53 |
| POPIS LITERATURE.....                         | 54 |
| POPIS SLIKA.....                              | 56 |
| POPIS TABLICA.....                            | 58 |

## 1. UVOD

Na pruzi M203 Rijeka – Šapjane – Državna Granica kod tunela Rukavac došlo je do pojave nestabilnosti zausjeka. Kako bi se dobio bolji uvid u tlo i njegove karakteristike provedeni su terenski istražni radovi i laboratorijska ispitivanja. U sklopu terenskih radova izvršeno je istražno bušenje i geofizičko ispitivanje. Izbušene su dvije bušotine dubine 20 m te je za geofizičko ispitivanje odabrana metoda seizmičke refrakcije. Na temelju svih ispitivanja odabrani su karakteristični parametri materijala i izrađen je geotehnički profil tla. S obzirom na lokaciju zausjeka određene su i seizmičke karakteristike tla za povratne periode od 95 i 475 godina. Uz poznavanje svih uvjeta na terenu i u tlu pristupilo se odabiru najoptimalnije mjere sanacije zausjeka. Predložena je ugradnja pasivnih štapnih sidara čijim se međusobnim povezivanjem dobiva sustav čavlanog tla. Pasivna sidra odnosno čavli su elementi koji reagiraju na silu tek kada se poduprta konstrukcija pomiče. Opisane su metode izvedbe pasivnih sidara, a to su metoda bušenja i injektiranja, metoda samobušivih sidara i metoda zabijanjem. Nakon obrađenog teorijskog dijela, u programu GeoStudio 2021.4 provedene su analize stabilnosti i naponsko deformacijske analize za određene projektne situacije te su određene dimenzije i ostale karakteristike ugrađenih pasivnih sidara. Svi rezultati su prikazani grafički uz tekstualno obrazloženje. Kako bi se osigurala potrebna razina kvalitete i izbjeglo vanjsko ili unutarnje otkazivanje stabilizacijskog sustava provode se ispitivanja ugrađenih sidara. Neka od najčešće korištenih ispitivanja su detaljnije opisana. Na kraju iskazani su okvirni troškovi izvedbe čavlanog tla na predmetnoj lokaciji.



## 2. OPĆENITO O PROJEKTU

### 2.1. Postojeće stanje zausjeka

Zbog pojave nestabilnosti zausjeka na km 43+825 do 43+830 proveden je projekt sanacije zausjeka tunela Rukavac na pruzi M203 Rijeka – Šapjane – Državna Granica. Tunel Rukavac duljine je 312,4 m i proteže se od km 43+508,1 do km 43+820,5. Zausjek je izveden u isto vrijeme kada i sam tunel prije više od 140 godina.

Visina zausjeka iznosi oko 10 do 12 m i može se podijeliti na donji vertikalni dio koji se nalazi u stijeni visine 4-5 m i gornji dio pod nagibom u glini visine 5-7 m. Na cijelom zausjeku može se odrediti 5 karakterističnih zona. Zona A odnosi se na gornji dio i dijeli se na zone A1, A2 i A3, dok zona B obuhvaća donji vertikalni dio zausjeka koji se dijeli na zone B1 i B2. Također postoji i zona C koja se odnosi na cijeli pokos od kraja zida do pješačkog mosta. Navedeno je prikazano u nastavku:

Zona A (gornji dio visine 5-7 m u nagibu od 1:1 do 1:1,5) dijeli se na:

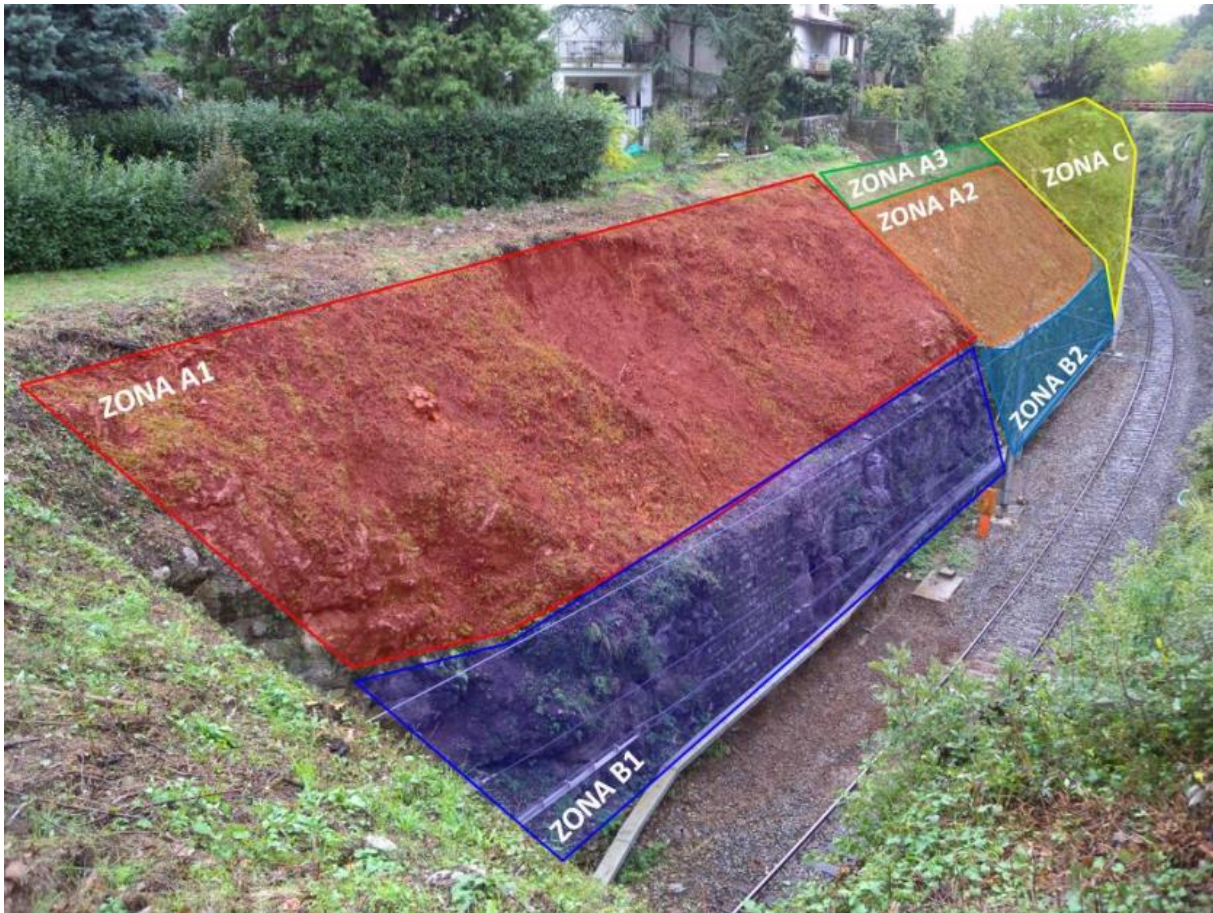
- Zona A1 – zemljani materijal iznad potpornih zidova i stijenskog pokosa,  $L \approx 30$  m
- Zona A2 – slagana kamena obloga na pokosu,  $L \approx 35$  m
- Zona A3 – zemljana kosina iznad kamene obloge u zoni A2

Zona B (donji dio visine 4-5 m) dijeli se na:

- Zona B1 – dio ispod zone A1, izmjenjuju se potporni zidovi i masivni stijenski blokovi,  $L \approx 30$  m
- Zona B2 – dio ispod zone A2, potporni zid od kamenih klesanaca,  $L \approx 35$  m

Zona C – pokos visine 16 m, u nagibima od 4:1 do vertikale

Opisane zone prikazane su na sljedećoj slici.



Slika 1: Zone zausjeka [1]

U zoni A1 došlo je do klizanja zemljanog materijala na prugu. Klizanje materijala zahvatilo je cijelu visinu gornjeg dijela te procijenjena količina otklzanog materijala iznosi otprilike 25-30 m<sup>3</sup>. Do klizanja je došlo uslijed gubitka posmične čvrstoće koji je najvjerojatnije uzrokovan površinskim i podzemnim dotokom vode. Utvrđeno je da su se i ranije pojavljivali problemi na predmetnom zausjeku, točnije kod zone B2 gdje je došlo do pomicanja i djelomičnog bubrenja potpornog zida. Zona B2 sanirana je zabijanjem čeličnih ankera na vrhu zida kako bi se spriječile neželjene posljedice.

Kod zona A1 i B1 već su izvedene mjere privremene sanacije, postavljen je geotekstil na površinu terena koji se sidri armaturnom mrežom na pokos iznad portala tunela, a na dijelu prije portala prekriva se mrežama za zaštitu od odrona koja se proteže skroz do dna zausjeka kako je prikazano na Slici 3. Prije samog postavljanja geotekstila bilo je potrebno izvršiti dopunu materijalom na mjestu otklzanog materijala vidljivo na Slici 2 [1].





Slika 2: Dopuna materijalom na mjestu otklizanog materijala [1]

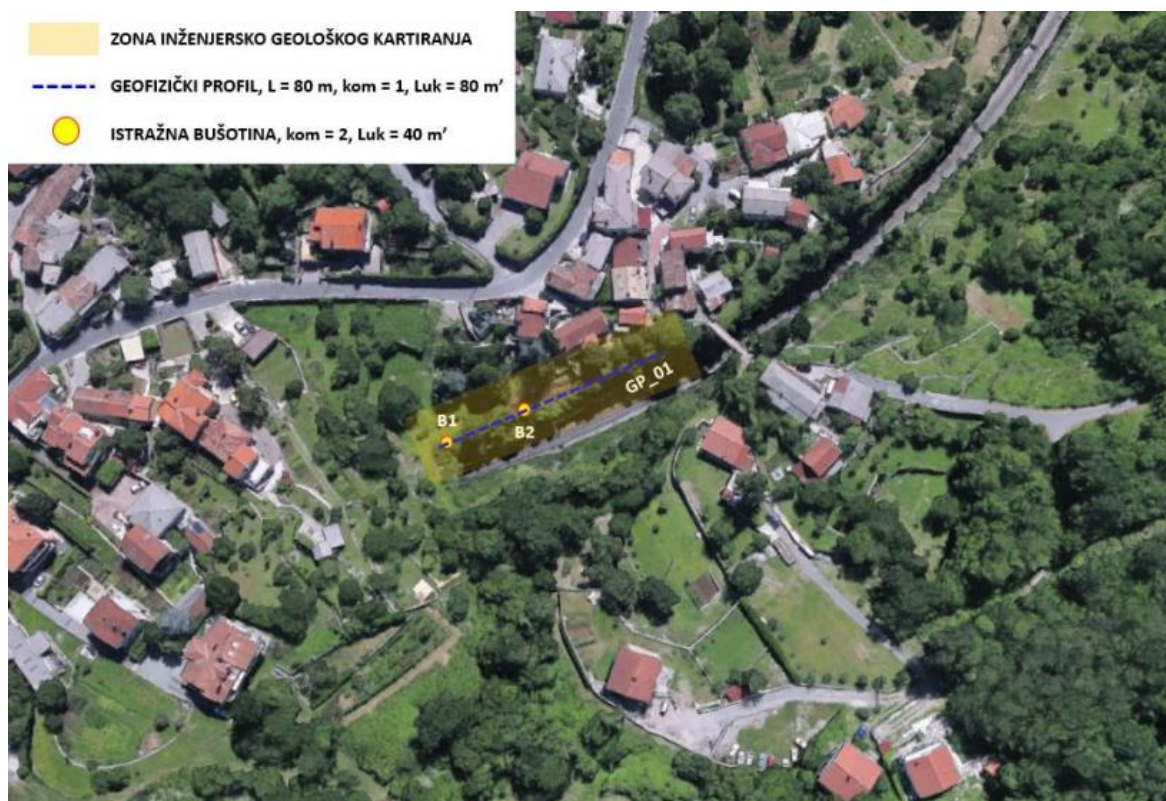


Slika 3: Postavljanje geotekstila [1]



## 2.2. Geotehnički istražni radovi

Za potrebe izrade geotehničkog elaborata provedeni su istražni radovi. Izvedene su dvije istražne bušotine dubine 20 m i izvađena jezgra bušotina slagala se u drvene sanduke. Provedeni su terenski istražni radovi koji su obuhvaćali istražno bušenje i geofizičko ispitivanje metodom seizmičke refrakcije te nakon toga pristupilo se laboratorijskim ispitivanjima. Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata te korištenjem odgovarajućih korelacija izrađen je geotehnički model tla i određene su karakteristične vrijednosti parametara tla.



Slika 4: Položaj istražnih radova [2]

Na mjestu bušotine B1 dobiven je sljedeći profil tla:

0,0 – 12,0 m → glina niske plastičnosti (CL), teško gnječivog do čvrstog konzistentnog stanja, smeđe do tamno smeđe boje s udjelom šljunka do 2%, pijeska od 9 do 13% i koherentnih čestica od 87 do 91%.

12,0 – 20,0 m → stijena s glinenom ispunom, vrlo slabe do slabe kvalitete s udjelom kalcijevog karbonata između 75 i 76%, RQD indeks kreće se od 12 do 49%.

Odabrane karakteristične vrijednosti parametara materijala nalaze se u Tablici 1.

Tablica 1: Karakteristične vrijednosti parametara materijala za bušotinu B1 [2]

| 0,0 – 12,0 m                 |                                       |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Kohezija                     | $c = 5,10 - 5,30 \text{ kPa}$         |
| Kut unutarnjeg trenja        | $\varphi = 28,80 - 33,60^\circ$       |
| Modul stišljivosti           | $M_k = 3,00 - 3,50 \text{ MPa}$       |
| Zapreminska težina           | $\gamma = 20,00 \text{ kN/m}^3$       |
| Prirodna vlažnost            | $w_0 = 20,10 - 27,99\%$               |
| Granica tečenja              | $w_L = 38,38 - 43,00\%$               |
| Granica plastičnosti         | $w_p = 20,42 - 22,26\%$               |
| Indeks plastičnosti          | $I_p = 17,96 - 20,74\%$               |
| Indeks konzistencije         | $I_c = 0,66 - 1,10$                   |
| 12,0 – 20,0 m                |                                       |
| Indeks točkaste čvrstoće     | $I_{S(50)} = 0,82 - 1,96 \text{ MPa}$ |
| Sadržaj kalcijevog karbonata | $\text{CaCO}_3 = 75,04 - 75,96\%$     |
| Zapreminska težina           | $\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$       |

Razina podzemne vode nije zabilježena tijekom bušenja.

Na mjestu bušotine B2 dobiven je sljedeći profil tla:

0,0 – 3,0 m → glina niske plastičnosti (CL), teško gnječivog do polučvrstog konzistentnog stanja, smeđe boje s udjelom šljunka oko 1%, pijeska oko 12% i koherentnih čestica oko 87%.  
 3,0 – 5,5 m → stijena s glinenom ispunom, slabe do povoljne kvalitete s udjelom kalcijevog oko 83%, RQD indeks kreće se od 47 do 65%, na dubini od oko 4,5 m pojavljuje se proslojak glinovitog materijala tamno smeđe boje, teško gnječivog do polučvrstog konzistentnog stanja, debljine oko 40 cm.

5,5 – 12,5 m → glina niske plastičnosti s pijeskom (CL), polučvrstog do čvrstog konzistentnog stanja, tamno smeđe boje koja nakon otprilike 10 m dubine prelazi u crvenosmeđu s udjelom šljunka od 1 do 5%, pijeska od 12 do 20% i koherentnih čestica od 79 do 87%. Pojavljuju se proslojci razlomljene stijenske mase na dubinama od oko 7,0 i 8,0 m debljine otprilike 0,5 m. Tu je određen RQD indeks i on se kreće od 0 do 15%.

12,5 – 16,0 m → stijena s glinenom ispunom, vrlo slabe do slabe kvalitete s udjelom kalcijevog karbonata od oko 83%, RQD indeks se kreće od 13 do 45%.

16,0 – 17,7 m → glina niske plastičnosti (CL), polučvrstog do čvrstog konzistentnog stanja, crvenosmeđe boje s udjelom šljunka od oko 7%, pijeska od oko 11% i koherentnih čestica od oko 82%.

17,7- 20,0 m → stijena s glinenom ispunom, vrlo slabe do slabe kvalitete, RQD indeks se kreće od 0 do 33%.

Odabrane karakteristične vrijednosti parametara materijala nalaze se u Tablici 2.

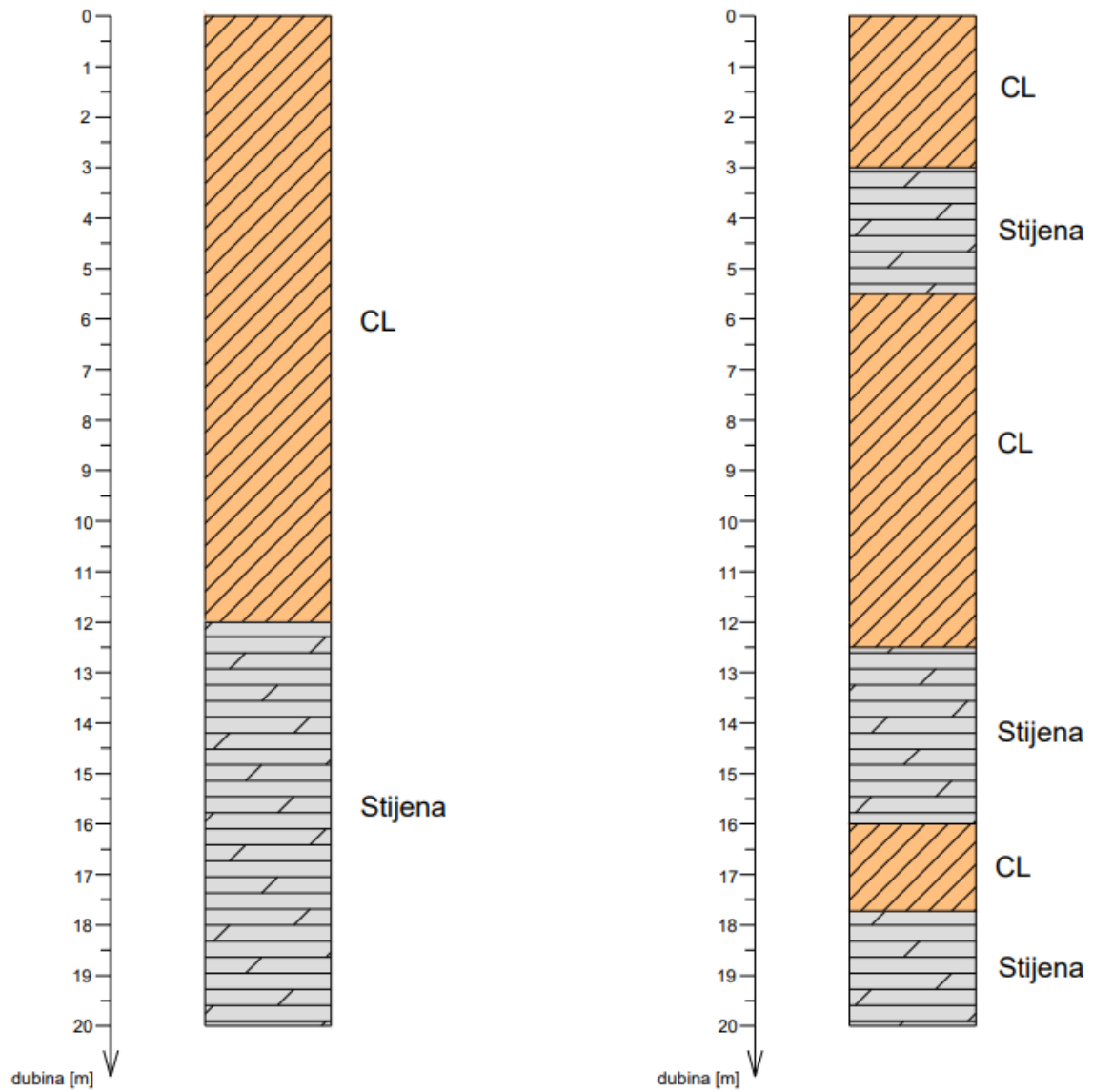
Tablica 2: Karakteristične vrijednosti parametara materijala za bušotinu B2 [2]

|                              |                                 |
|------------------------------|---------------------------------|
| 0,0 – 3,0 m                  |                                 |
| Zapreminska težina           | $\gamma = 20,00 \text{ kN/m}^3$ |
| Prirodna vlažnost            | $w_0 = 27,78\%$                 |
| Granica tečenja              | $w_L = 44,19\%$                 |
| Granica plastičnosti         | $w_P = 22,31\%$                 |
| Indeks plastičnosti          | $I_P = 21,88\%$                 |
| Indeks konzistencije         | $I_C = 0,75$                    |
| 3,0 – 5,5 m                  |                                 |
| Indeks točkaste čvrstoće     | $I_{S(50)} = 0,94 \text{ MPa}$  |
| Sadržaj kalcijevog karbonata | $\text{CaCO}_3 = 82,74\%$       |
| Zapreminska težina           | $\gamma = 26,00 \text{ kN/m}^3$ |
| 5,5 – 12,5 m                 |                                 |
| Kohezija                     | $c = 6,80 - 7,70 \text{ kPa}$   |
| Kut unutarnjeg trenja        | $\varphi = 31,30 - 32,20^\circ$ |
| Modul stišljivosti           | $M_k = 4,20 - 5,10 \text{ MPa}$ |
| Zapreminska težina           | $\gamma = 19,00 \text{ kN/m}^3$ |
| Prirodna vlažnost            | $w_0 = 23,99 - 25,37\%$         |
| Granice tečenja              | $w_L = 38,44 - 50,98\%$         |
| Granica plastičnosti         | $w_P = 20,62 - 25,31\%$         |
| Indeks plastičnosti          | $I_P = 17,82 - 25,67\%$         |
| Indeks konzistencije         | $I_C = 0,81 - 1,00$             |

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| 12,5 – 16,0 m                              |                                 |
| Indeks točkaste čvrstoće                   | $I_{S(50)} = 2,74 \text{ MPa}$  |
| Jednoosna tlačna čvrstoća                  | $\sigma_c = 27,43 \text{ MPa}$  |
| Srednji modul elastičnosti                 | $E_{sr} = 13,63 \text{ GPa}$    |
| Modul elastičnosti pri malim deformacijama | $E = 71,67 \text{ GPa}$         |
| Sadržaj kalcijevog karbonata               | $\text{CaCO}_3 = 83,04\%$       |
| Zapreminska težina                         | $\gamma = 26,00 \text{ kN/m}^3$ |
| 16,0 – 17,7 m                              |                                 |
| Zapreminska težina                         | $\gamma = 20,00 \text{ kN/m}^3$ |
| Prirodna vlažnost                          | $w_0 = 22,40\%$                 |
| Granice tečenja                            | $w_L = 45,43\%$                 |
| Granica plastičnosti                       | $w_P = 22,17\%$                 |
| Indeks plastičnosti                        | $I_P = 23,26\%$                 |
| Indeks konzistencije                       | $I_C = 0,99$                    |
| 17,7 – 20,0 m                              |                                 |
| Indeks točkaste čvrstoće                   | $I_{S(50)} = 2,82 \text{ MPa}$  |
| Zapreminska težina                         | $\gamma = 26,00 \text{ kN/m}^3$ |

Razina podzemne vode nije zabilježena tijekom bušenja.

Na temelju provedenih ispitivanja izrađen je geotehnički profil tla na mjestima izvedenih bušotina kako je prikazano na sljedećoj slici.



Slika 5: Geotehnički profili tla na mjestu bušotina B1 i B2

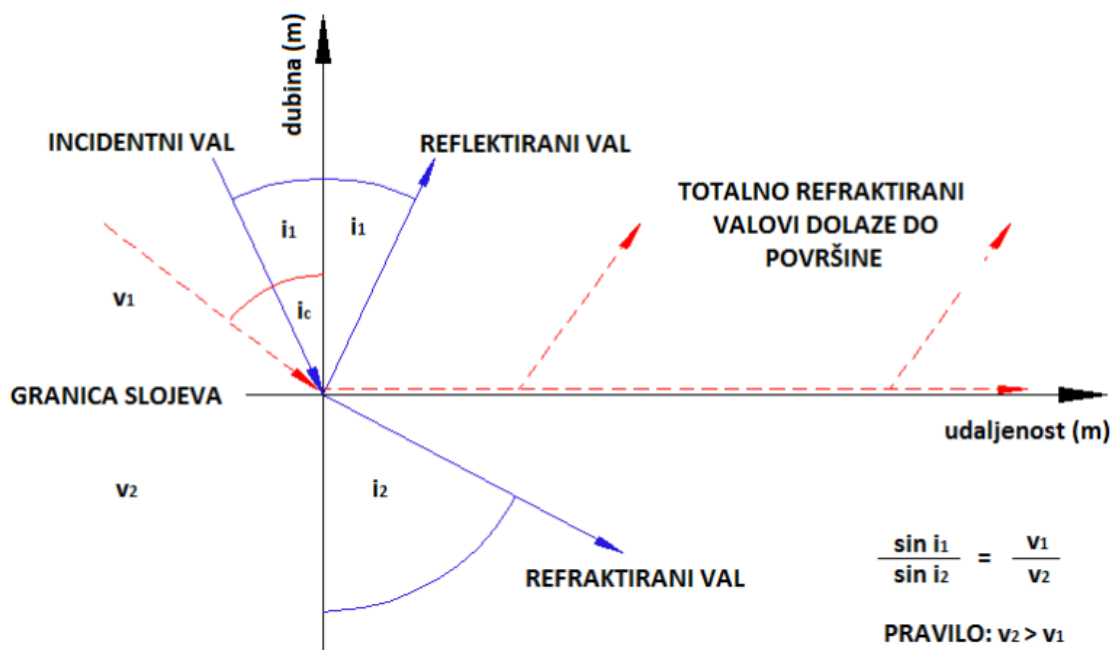


## 2.3. Geofizički istražni radovi

U sklopu istražnih radova provedeno je i seizmičko geofizičko ispitivanje na profilu duljine 60 m.

### 2.3.1. Općenito o metodi

Seizmičke geofizičke metode temelje se na generiranju seizmičkih valova i mjerenju vremena potrebnog valovima da putuju od izvora kroz tlo ili stijenu do geofona koji se postavljaju na površini ili u bušotini. Geofoni su osjetljivi pretvornici pomaka kojima se detektira dolazak vala koji se generira na površini terena udarcem čekića, vibratorom ili eksplozivom. Na granicama između slojeva valovi se odbijaju (reflektiraju) ili lome (refraktiraju) te dolaze opet na površinu. Refleksija odnosno refrakcija valova odvija se prema Snellovom zakonu širenja zraka svjetlosti u uslojenom mediju.



Slika 6: Refleksija i refrakcija valova u dvoslojnoj sredini [3]

Sa slike je vidljivo da val koji pod kutem  $i_1$  od vertikale dolazi iz gornjeg sloja brzinom  $v_1$  na granicu s donjim slojem djelomično se odbija pod istim kutem i vraća na površinu brzinom  $v_1$ , a djelomično se lomi pod kutem  $i_2$  i odlazi u dubinu brzinom  $v_2$ . Ako vrijedi  $v_2 > v_1$  val se lomi pod većim kutem od dolazećeg vala, a ako vrijedi  $v_2 < v_1$  val se lomi pod manjim kutem prema vertikali. Omjer sinusa kutova dolazećeg i lomljenog vala jednak je omjeru brzina kretanja vala u gornjem i donjem sloju.

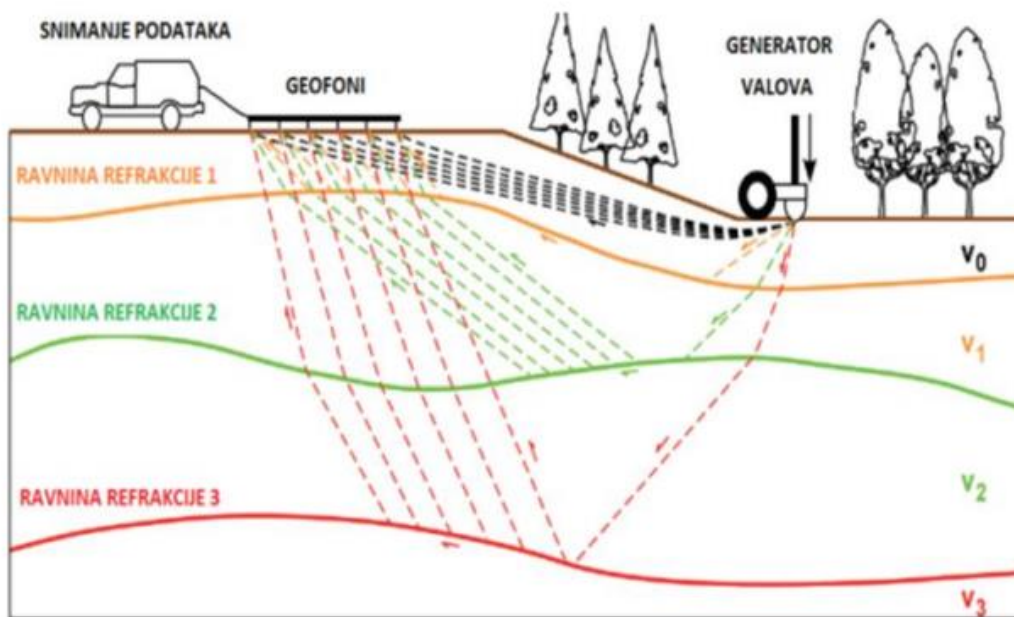
Dolazak vala na granicu slojeva pod tzv. kritičnim kutem  $i_c$  uzrokuje lomljenje vala u cijelosti i njegovo širenje po granici slojeva te vraćanje na površinu pod istim kritičnim kutem nakon određenog vremena. To će se dogoditi samo ako je brzina širenja vala u donjem sloju veća od brzine širenja vala u gornjem sloju, a ako je obrnuto ne može doći do refrakcije vala.

Općenito brzine širenja uzdužnih valova ovise o mediju kroz koji prolaze te su one prikazane u sljedećoj tablici.

Tablica 3: Brzine uzdužnih valova u različitim medijima [3]

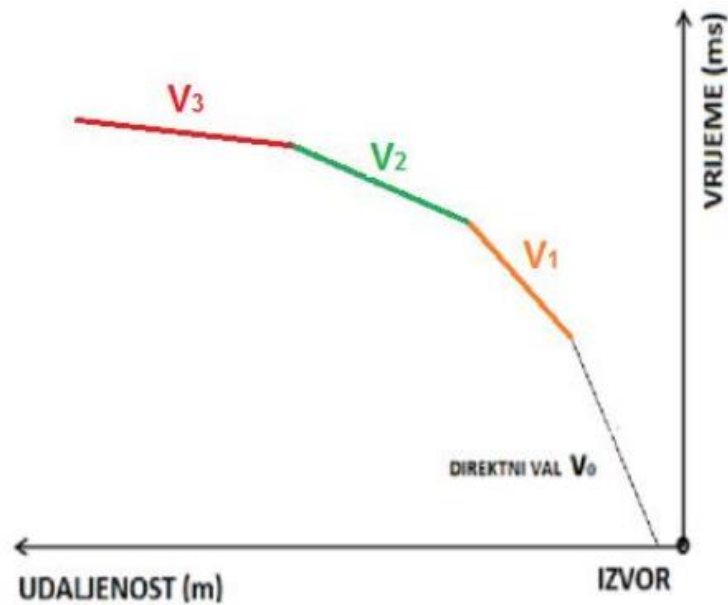
| Materijal                         | $V_p$ (km/s) | Materijal                 | $V_p$ (km/s) |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <i>Nekonsolidirani materijali</i> |              | <i>Metamorfne stijene</i> |              |
| Pijesak ( <i>suh</i> )            | 0.2–1.0      | Granit                    | 5.5–6.0      |
| Pijesak ( <i>saturiran</i> )      | 1.5–2.0      | Gabro                     | 6.5–7.0      |
| Šljunak                           | 1.0–2.0      | <i>Ostali materijali</i>  |              |
| Glina                             | 1.0–2.5      | Zrak                      | 0.3          |
| <i>Sedimentne stijene</i>         |              | Voda                      | 1.4–1.5      |
| Pješčenjak                        | 2.0–6.0      | Led                       | 3.4          |
| Kvarcit                           | 5.5–6.0      | Nafta                     | 1.3–1.4      |
| Vapnenac                          | 2.0–6.0      | Čelik                     | 6.1          |
| Dolomiti                          | 2.5–6.5      | Željezo                   | 5.8          |
| Kreda                             | 2.0–2.5      | Beton                     | 3.6          |
| Soli                              | 4.5–5.0      |                           |              |
| Anhidrit                          | 4.5–6.5      |                           |              |
| Gips                              | 2.0–3.5      |                           |              |

Na terenu provedena je metoda seizmičke refrakcije kod koje se mjere vremena širenja lomljenih (refraktiranih) valova kroz tlo odnosno stijenu. Prije se metoda mogla primijeniti samo ako je brzina širenja valova rasla s dubinom, u protivnom nema refrakcije vala pa je metoda bila neupotrebljiva. Međutim, danas postoje načini obrade prikupljenih podataka, čime se pojava inverzije (sloja manje brzine ispod sloja veće brzine) može uspješno detektirati.



Slika 7: Shematski prikaz konfiguracije mjerne opreme za seizmičku refrakciju [3]

Nakon registriranja vremena prvih nailazaka na geofone, uz poznavanje udaljenosti postavljenih geofona od generatora valova, mogu se formirati parovi vrijednosti udaljenost – vrijeme pomoću kojih se formira dijagram  $x - t$  koji se koristi za interpretaciju rezultata mjerenja i formiranje profila brzina po dubini [3].



Slika 8: Dijagram udaljenost – vrijeme [3]

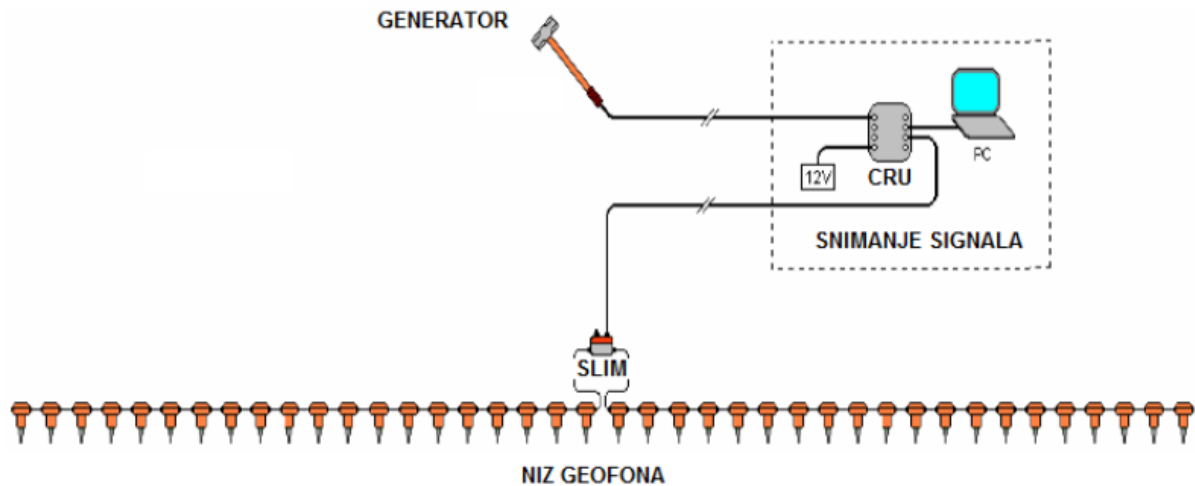
### 2.3.2. Provođenje metode na terenu

Kako bi se provelo ispitivanje potrebna je mjerna oprema koja se sastoji od generatora površinskih valova, digitalnih geofona i računala. Generatorom površinskih valova potrebno je proizvesti val sa što većim frekventnim opsegom i što većom valnom energijom. U ovom ispitivanju kao generator korišten je čekić težine 8,0 kg kojim se udara po čeličnoj ploči dimenzija 32 x 40 cm. Za mjerenje brzine prolazećeg vala koriste se vertikalno polarizirani geofoni međusobno povezani u nizove od po dvadeset geofona (Slika 9). Prilikom postavljanja geofona potrebno je posvetiti veliku pozornost njihovom prianjanju za podlogu, bitno je da svaki geofon cijelom svojom površinom kvalitetno prione za podlogu.



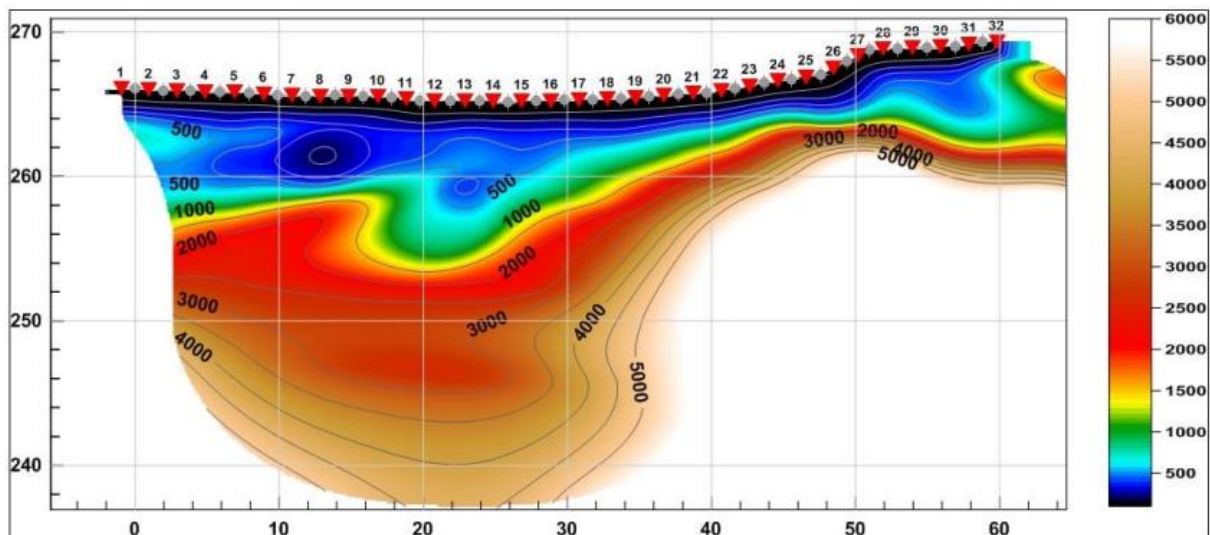
Slika 9: Nizovi geofona postavljenih u refrakcijski profil [2]

Kod ove metode može se koristiti bilo koje prenosivo osobno računalo. Na sljedećoj slici shematski je prikazana konfiguracija mjerne opreme za prikupljanja podataka.



Slika 10: Shematski prikaz konfiguracije mjerne opreme za ispitivanje metodom seizmičke refrakcije [2]

Nakon što se postave i numeriraju geofoni te se odredi njihov položaj može se započeti ispitivanje generiranjem signala na određenim lokacijama duž profila. Prikupljeni signali spremaju se u računalo i idu na daljnju obradu koja se sastoji od definiranja geometrije i unošenja ili odabira vremena nailazaka prvog vala [2]. Dobiveni rezultati prikazani su na Slici 11.



Slika 11: Rezultati ispitivanja dobiveni seizmičkom refrakcijom [2]

Na slici prikazana je dobivena raspodjela brzina uzdužnih valova po dubini. Rezultati ispitivanja vidljivi su do prosječne dubine od 10 do 20 m na kojoj se nalazi vrijednost brzine širenja uzdužnih valova od oko 5000 m/s. Primjetan je porast vrijednosti seizmičkih brzina s dubinom. Kada se usporede rezultati svih provedenih istraživanja i ispitivanja na predmetnoj lokaciji, kao granična brzina između tla i stijene može se uzeti 1000 m/s. Na početku profila vidljivo je da se stijena nalazi na dubini 10 do 12 m, što odgovara i profilu bušotina. Približavanjem portalu tunela stijenska masa se približava površini terena te je na dubini od oko 2,5 m.

## 2.4. Karakteristični i proračunski parametri materijala

Iz prikazanih karakteristika tla određene su karakteristične i proračunske vrijednosti za niskoplastičnu glinu prikazane u sljedećim tablicama.

Tablica 4: Karakteristične vrijednosti parametara materijala

| Materijal | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\varphi'_k$ [°] | $c_k$ [kPa] | $c_{u,k}$ [kPa] | $M_v$ [MPa] | E [MPa] |
|-----------|-------------------------------|------------------|-------------|-----------------|-------------|---------|
| CL        | 20,0                          | 31,2             | 5,2         | 83,0            | 7,07        | 5,25    |

Tablica 5: Proračunske vrijednosti parametara materijala

| Materijal | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\varphi'_d$ [°] | $c_d$ [kPa] | $c_{u,d}$ [kPa] | $M_v$ [MPa] | E [MPa] |
|-----------|-------------------------------|------------------|-------------|-----------------|-------------|---------|
| CL        | 20,0                          | 25,9             | 4,2         | 59,3            | 7,07        | 5,25    |

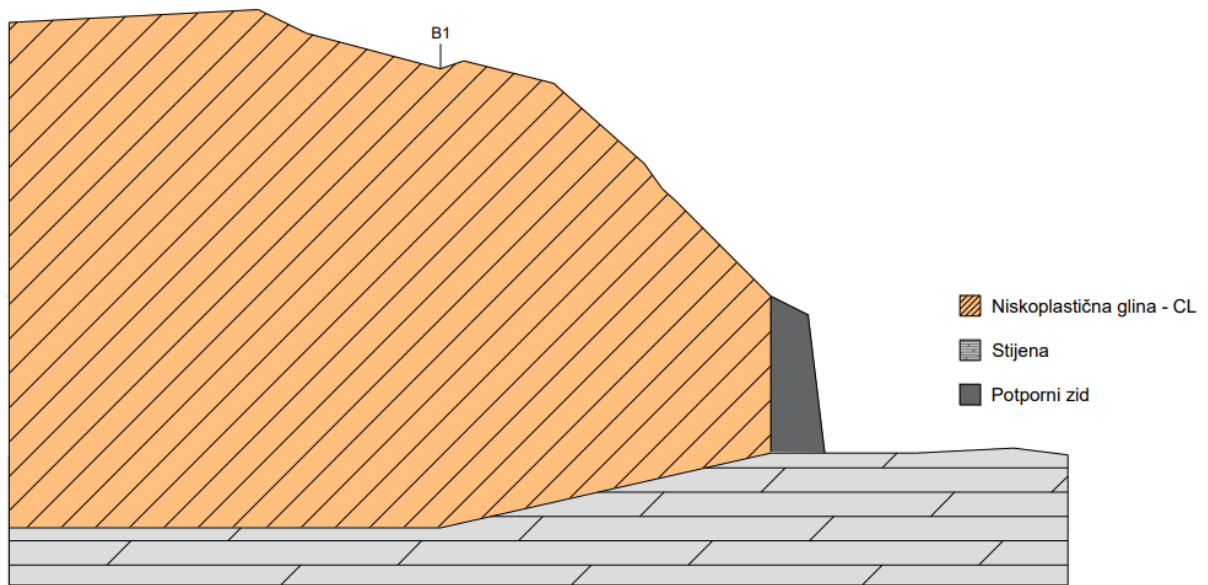
Proračunske vrijednosti dobivene su na temelju parcijalnih faktora (Tablica 6).

Tablica 6: Parcijalni faktori [2]

| (1) Parcijalni faktori djelovanja ( $\gamma_F$ ) i učinka djelovanja ( $\gamma_E$ ) |            |                                 |      |      |    |    |
|---|------------|---------------------------------|------|------|----|----|
| Djelovanja  |            | Simbol                          | A1   | A2   |    |    |
| Trajna:   | nepovoljna | $\gamma_{G,dst}$                | 1,35 | 1    |    |    |
|   | povoljna   | $\gamma_{G,stb}$                | 1    | 1    |    |    |
| Promjenjiva:  | nepovoljna | $\gamma_{Q,dst}$                | 1,5  | 1,3  |    |    |
|   | povoljna   | $\gamma_{Q,stb}$                | 0    | 0    |    |    |
| (2) Parcijalni faktori svojstva materijala (tlo, stijena) ( $\gamma_M$ )            |            |                                 |      |      |    |    |
| Svojstvo  |            | Simbol                          | M1   | M2   |    |    |
| Tangens efektivnog kuta trenja  |            | $\gamma_{\varphi'}$             | 1    | 1,25 |    |    |
| Efektivna kohezija  |            | $\gamma_{c'}$                   | 1    | 1,25 |    |    |
| Nedrenirana i jednoosna čvrstoća  |            | $\gamma_{cu}$ ili $\gamma_{qu}$ | 1    | 1,4  |    |    |
| Težinska gustoća  |            | $\gamma_{\gamma}$               | 1    | 1    |    |    |
| (3) Parcijalni faktori otpora ( $\gamma_R$ )  |            |                                 |      |      |    |    |
| Otpornost   |            | Simbol                          | R1   | R2   | R3 | R4 |
| Plitki temelji:   | nosivost   | $\gamma_{Rv}$                   | 1    | 1,4  | 1  | -  |
|   | klizanje   | $\gamma_{Rh}$                   | 1    | 1,1  | 1  | -  |
| Potporne konstrukcije:  | nosivost   | $\gamma_{Rv}$                   | 1    | 1,4  | 1  | -  |
|   | klizanje   | $\gamma_{Rh}$                   | 1    | 1,1  | 1  | -  |
|   | otpor tla  | $\gamma_{Re}$                   | 1    | 1,4  | 1  | -  |
| Kosine i opća stabilnost:   | otpor tla  | $\gamma_{Re}$                   | 1    | 1,1  | 1  | -  |



Karakteristike stijene ne uzimaju se u obzir kod proračuna stabilnosti jer ploha sloma neće nastati kroz stijensku masu. Prema tome stijenska masa gleda se kao „materijal visoke čvrstoće“ kroz koji ne može doći do sloma.



Slika 12: Geotehnički profil tla

## 2.5. Seizmičke karakteristike tla

Kako bi se osigurala stabilnost zausjeka u slučaju potresa potrebno je u obzir uzeti i seizmičke parametre. Potrebno je odrediti ubrzanje tla koje ovisi o vrsti tla i lokaciji građevine na temelju kojeg se dobiva statička sila koja se nanosi na konstrukciju. Potresna ubrzanja moguće je dobiti iz potresnih karata te se određuju iznosi horizontalnih vršnih ubrzanja tla tipa A ( $a_{gR}$ ) za povratna razdoblja od  $T_p = 95$  i 475 godina izraženih u jedinicama gravitacijskog ubrzanja ( $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$ ) za bilo koje područje u Republici Hrvatskoj [4].



Slika 13: Potresna karta Republike Hrvatske [4]

Za predmetnu lokaciju odabrane vrijednosti horizontalnih vršnih ubrzanja tla tipa A nalaze se u Tablici 7.

Tablica 7: Usvojene vrijednosti horizontalnih vršnih ubrzanja tla

| Povratni period | $a_{gR}$ (g) |
|-----------------|--------------|
| 95 godina       | 0,10 g       |
| 475 godina      | 0,18 g       |

Postoji sedam kategorija kojima se definiraju tipovi tla prema Eurokodu 8 (Tablica 8) te ovisno o tipu tla na lokaciji računaju se potresni koeficijenti.

Tablica 8: Tipovi tla

| Tip tla | Opis geotehničkog profila  | $V_{s,30}$<br>[m/s] | $N_{SPT}$<br>[n/30 cm] | $C_u$<br>[kPa] |
|---------|--|---------------------|------------------------|----------------|
| A       | Stijena ili druga geološka formacija uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini.  | > 800               | -                      | -              |
| B       | Nanosi vrlo zbijenog pijeska, šljunka ili vrlo krute gline debljine najmanje nekoliko desetaka metara, sa svojstvom postupnog povećanja mehaničkih svojstava s dubinom.              | 360 - 800           | > 50                   | > 250          |
| C       | Debeli nanosi srednje zbijenog pijeska, šljunka ili srednje krute gline debljine od nekoliko desetaka do više stotina metara.  | 180 - 360           | 15 - 50                | 70 - 250       |
| D       | Nanosi slabo do srednje koherentni (sa ili bez mekih koherentnih slojeva) ili s predominantno mekim do srednje krutim koherentnim tlima.   | < 180               | < 15                   | < 70           |
| E       | Profili koji sadrže površinski sloj koji karakterizira brzina $v_s$ tzv. tipove tla C i D i debljine od 5 do 20 m, a ispod njih je kruti materijal s brzinom većom od $v_s$ 800 m/s. |                     |                        |                |
| S1      | Nanosi koji sadrže najmanje 10 m debeli sloj mekane gline s visoko plastičnim indeksom ( $PI > 40$ ) i visokim sadržajem vode.   | < 100               |                        | < 20           |
| S2      | Nanosi likvefakcijski osjetljivog tla pijeska i gline ili bilo koji tip tla koji nije opisan od A do E i pod S1.   |                     |                        |                |

Također, potrebno je odrediti parametar tla S ovisno o odabranom tipu tla prema sljedećoj tablici.

Tablica 9: Parametri tla prema tipovima tla

| Klasa tla | S    | $T_{B(s)}$ | $T_{C(s)}$ | $T_{D(s)}$ |
|-----------|------|------------|------------|------------|
| A         | 1,00 | 0,15       | 0,4        | 2,0        |
| B         | 1,20 | 0,15       | 0,5        | 2,0        |
| C         | 1,15 | 0,20       | 0,6        | 2,0        |
| D         | 1,35 | 0,20       | 0,8        | 2,0        |
| E         | 1,40 | 0,15       | 0,5        | 2,0        |

Tablica 10: Vrijednosti parametara konstrukcije r u ovisnosti o vrsti temeljne konstrukcije

| Vrsta temeljne konstrukcije  | r   |
|--|-----|
| Gravitacijski zidovi koji mogu prihvatiti slijeganja do $d_r = 300 \cdot \alpha \cdot S$ [mm]  | 2,0 |
| Gravitacijski zidovi koji mogu prihvatiti slijeganja do $d_r = 200 \cdot \alpha \cdot S$ [mm]  | 1,5 |
| Savitljivi armiranobetonski zidovi, sidreni ili razupirani zidovi, armiranobetonski zidovi na pilotima, upeti podrumski zidovi i upornjaci mostova | 1,0 |

Na temelju provedenih istražnih radova predmetna lokacija klasificirana je u Tip B prema Tablici 8. Prema tome parametar tla S iznosi 1,20 i parametar konstrukcije r iznosi 2,0 jer kosine od prirodnih materijala dopuštaju relativno velike pomake. Sada se može izračunati horizontalni seizmički koeficijent te iz njega vertikalni seizmički koeficijent:

- horizontalni seizmički koeficijent:

$$k_h = \frac{\alpha \cdot S}{r} = \frac{a_g \cdot S}{r}$$

- vertikalni seizmički koeficijent:

$$k_v = \pm 0,33 \cdot k_h$$

Za povratni period od 95 godina:

$$k_h = \frac{0,10 \cdot 1,20}{2,0} = 0,06$$

$$k_v = \pm 0,33 \cdot 0,06 = \pm 0,02$$

Za povratni period od 475 godina:

$$k_h = \frac{0,18 \cdot 1,20}{2,0} = 0,108$$

$$k_v = \pm 0,33 \cdot 0,108 = \pm 0,036$$

Tablica 11: Seizmički parametri tla

| Povratni period [god] | $a_{gR}$       | Tip tla | S    | r   | $k_h$ | $k_v$       |
|-----------------------|----------------|---------|------|-----|-------|-------------|
| 95                    | $0,10 \cdot g$ | B       | 1,20 | 2,0 | 0,06  | $\pm 0,02$  |
| 475                   | $0,18 \cdot g$ |         |      |     | 0,108 | $\pm 0,036$ |

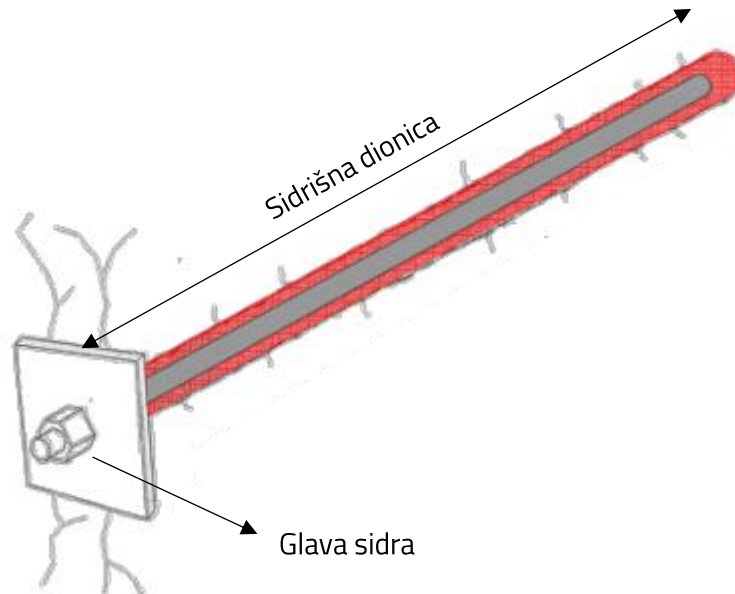
### 3. METODA STABILIZACIJE ZAUSJEKA

Postoji mnogo različitih metoda koje bi se mogle primijeniti kao trajne mjere sanacije predmetnog zausjeka. Stoga je prvi korak u procesu projektiranja procjena pojedinih tipova konstrukcije za traženu primjenu. Nakon toga u obzir se uzimaju načini na koje može doći do sloma konstrukcije. Bitno je na pravilan način rangirati različite parametre koji utječu na konačni odabir metode stabilizacije. U većini slučajeva funkcija konstrukcije je najvažniji parametar, nakon toga propisi nalažu da se konstrukcija može sigurno izgraditi. Također postoje i mnogi drugi faktori koji mogu utjecati na odabir potporne konstrukcije kao što su: visina tla koje treba poduprijeti, vrsta pridržanog tla, vrsta temeljnog tla, režim podzemnih voda, susjedni objekti, dostupne građevinske tehnike i oprema, dostupan prostor za izgradnju i građevinski pogon, iskustvo i lokalna praksa, dostupni standard i troškovi [5].

Kako bi se povećala stabilnost cijelog gornjeg dijela zausjeka građenog od naslaga gline, kao trajna mjera sanacije, ugraditi će se pasivna štapna sidra čijim se međusobnim povezivanjem dobiva sustav čavlanog tla.

#### 3.1. Pasivna sidra

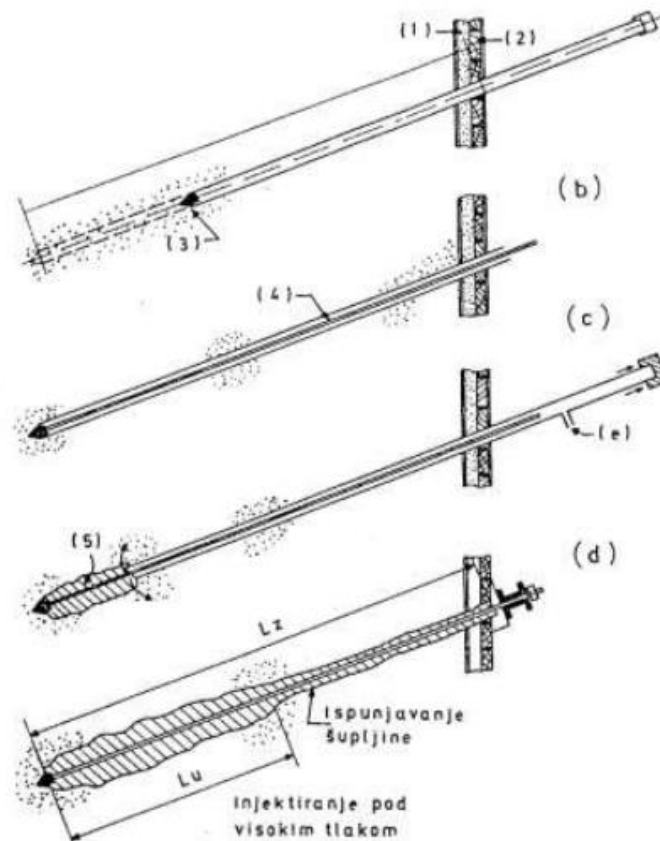
Općenito postoje aktivna (geotehnička) i pasivna sidra. Aktivna sidra unose početnu silu u konstrukciju koju podupiru neovisno o konačnoj interakciji tlo – konstrukcija, dok pasivna sidra reagiraju na silu tek kad se poduprta konstrukcija pomiče. Dva glavna dijela pasivnog sidra su sidrišna dionica i glava sidra. Sidrišna dionica odnosno tijelo sidra je projektna duljina duž koje se sila preko ispune prenosi u okolno tlo ili stijenu, najčešće se izvodi injektiranjem cementne smjese pod pritiskom koja ujedno štiti i od korozije. Glava sidra ili sidrište je završni dio sidra koji prenosi vlačnu silu na površinu tla ili u konstrukciju. Kod aktivnih sidara postoji još i slobodna dionica između glave sidra i početka sidrišne dionice. Na sljedećoj slici prikazana su dva glavna dijela pasivnog sidra [6].



Slika 14: Sidrišna dionica i glava pasivnog sidra [7]

Nosivost i ponašanje svakog sidra ovisi o osobinama temeljnog tla (posmična čvrstoća), postupcima ugradnje kao što je učvršćenje sidrišne dionice te o kvaliteti izrade koja se može postići na terenu. Prema tome potrebno je provoditi provjere nosivosti sidara koje se odnose na presjek čelične šipke ili žice, prionjivost čeličnog elementa i injekcijske smjese, trenje između sidrišnog tijela i okolnog tla ili stijene te globalni slom („čupanje“ iz zemljane ili stijenske mase) [6].

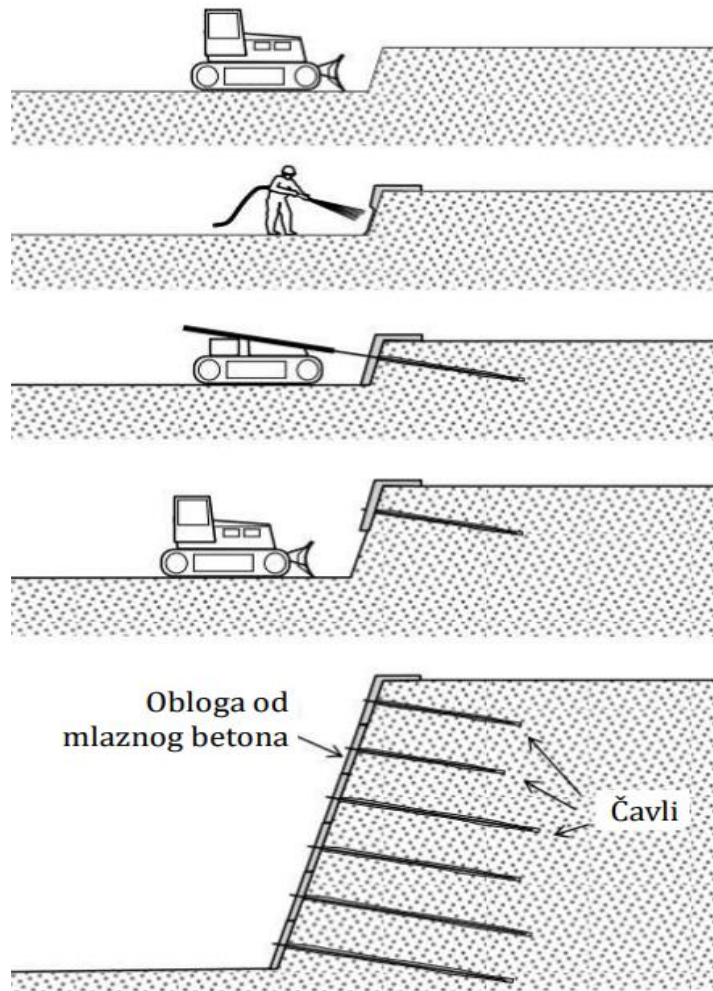
Postupak ugradnje pasivnih sidara vrlo je jednostavan te zbog malih i prilagodljivih izvedbenih tehnologija može se primijeniti na vrlo skućenim i teško dostupnim mjestima. Prvo je potrebno izbušiti bušotinu pod određenim kutem i na određenoj dubini, nakon toga bušotina se mora pravilno očistiti. Potom se ugrađuju pasivna sidra, obično se upotrebljavaju šuplje šipke od valjanog čelika s beskonačnim navojem, a promjer sidara i svrdla za bušenje prilagođavaju se statičkim zahtjevima projekta. Potom se prostor oko ugrađene šipke zapunjava injekcijskom smjesom. Elementi nisu prednapeti, što je razlika u odnosu na aktivna sidra, prema tome silu počinju apsorbirati prilikom pomaka temeljnog tla. Na kraju se postavlja čelična ploča s maticom (glava sidra) na način da se može povezati s injektiranim betonom koji sa svim sidrima čini sustav čavlanog tla [8]. Objašnjeni postupak ugradnje pasivnih sidara prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 15: Postupak ugradnje pasivnih sidara [6]

### 3.1.1. Čavlorano tlo

Čavlorano tlo je metoda armiranja tla koja se izvodi na licu mjesta i sastoji se od obloge od mlaznog betona i čavala (pasivnih sidara). Ugradnja čavala odvija se paralelno s top – down iskopom uz nanošenje mlaznog betona i čelične mreže kako je prikazano na sljedećoj slici. Tehnika se pokazala najprikladnijom za gotovo vertikalna lica kosina u relativno dobrom terenu, ali također treba imati na umu da je riječ o pasivnom sustavu pa je potreban određeni pomak za mobilizaciju bilo kakve potpore [5].

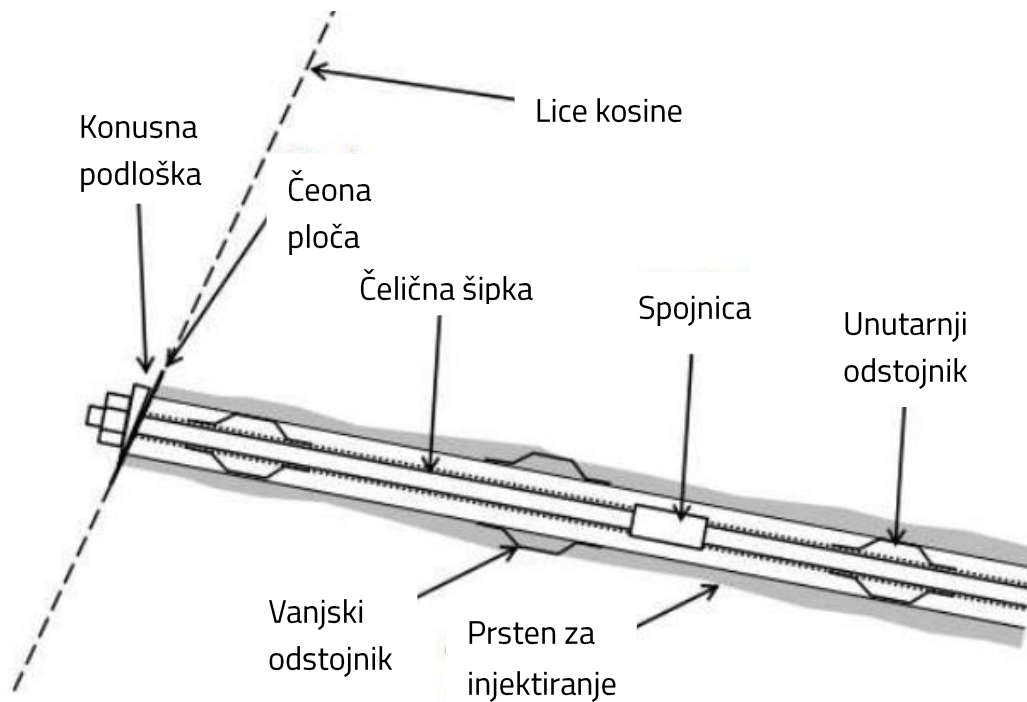


Slika 16: Izvođenje čavlanog tla [5]

Sidra se najčešće izvode metodom bušenja i injektiranja kako je prikazano na Slici 16, ali postoje i druge metode ugradnje sidara kao što su metoda samobušivih sidara i metoda zabijanjem. Metoda samobušivih sidara je relativno nova metoda u usporedbi s metodom bušenja i injektiranja. Sidro se direktno buši u tlo pomoću specijalnog svrdla. Samo sidro je šuplje pa ono funkcionira i kao bušeća šipka i kao cijev za injektiranje cementne mase. Velika prednost ove metode je učinkovitost jer se bušenje i injektiranje odvijaju istovremeno što ubrzava proces ugradnje. Međutim, metoda nije prikladna kod tla koja sadrže grube materijale poput oblutaka jer sidra teško prodiru kroz takve materijale. Kod metode zabijanjem sidro se direktno zabija u tlo balističkom metodom koristeći napravu koja sadrži stlačeni zrak, udarnom metodom ili korištenjem vibratora. Tijekom procesa zabijanja tlo oko sidra će se pomaknuti i zbiti. Proces ugradnje je brz i uzrokuje minimalne poremećaje u tlu. Metoda se koristi samo ako se ugrađuju sidra manjih duljina zbog ograničenja opreme. Potrebno je u obzir uzeti i problem korozije pošto je sidro u direktnom kontaktu s tlom [9].



Sidra se obično ugrađuju u redove koji su na vertikalnim razmacima između 1,5 i 2,0 m te se svako sidro sastoji od nekoliko ključnih komponenta, a to su: čelična šipka promjera 10 – 30 mm, čelona ploča, konusna podloška, sigurnosna matica, kanal, odstojnici, omotač, premaz za sprječavanje korozije i prsten za injektiranje (Slika 17).



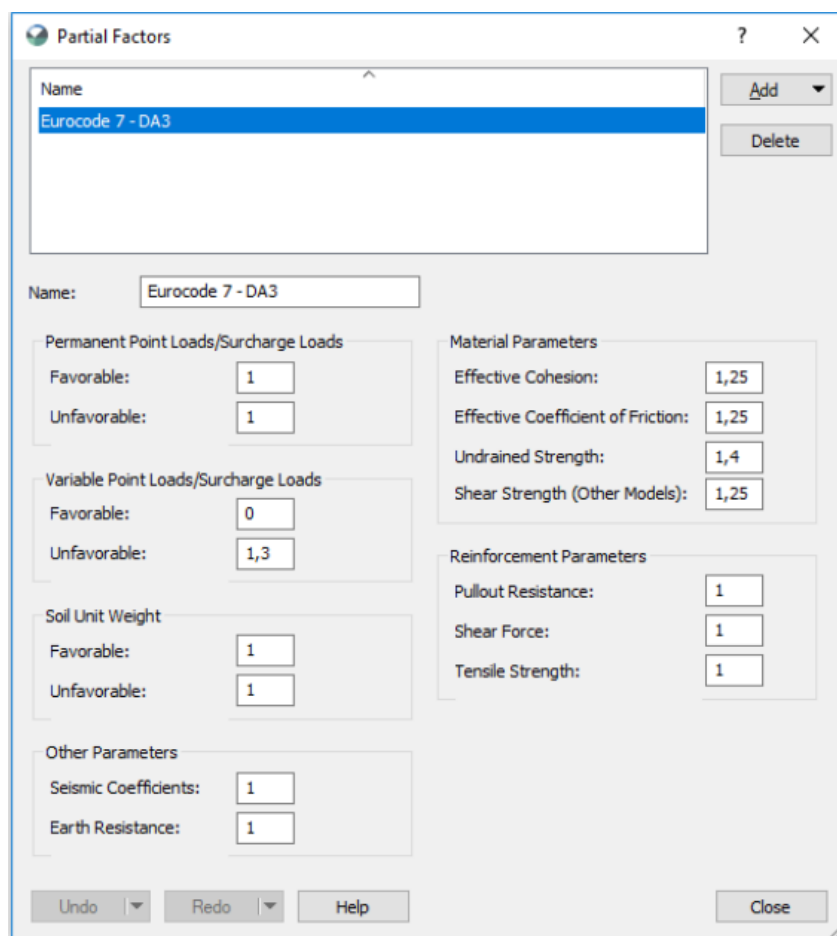
Slika 17: Komponente pasivnih sidara [6]

Kod donošenja odluke o izvođenju čavlanog tla potrebno je ocijeniti je li tlo pogodno za tu tehniku na temelju sljedećih zahtjeva:

- Mogućnost oblikovanja „katova“ visine 1 – 3 m s kojih se postavljaju sidra
- Meke gline i prahovi nisu prikladni za čavlando tlo, gline s nedreniranom čvrstoćom > 50 kPa su prikladne, ali treba izbjegavati bušenje s ispiranjem vodom
- Grubi materijali poput oblutaka mogu spriječiti ugradnju sidara
- Zrnato tlo neće održati stabilnost tijekom ugradnje sidara, osim ako nije prirodno cementirano
- Veća postojeća nestabilnost može zahtijevati duga sidra
- Visoka razina podzemne vode može ugroziti ili spriječiti ugradnju, a podzemna voda može sadržavati nepovoljne kemikalije [6]

## 4. GEOTEHNIČKE ANALIZE

Sve analize provedene su u programu GeoStudio 2021.4 koji sadrži puno različitih modula ovisno o vrsti analize koja se provodi. U ovom slučaju koristio se modul SLOPE/W za provedbu analiza stabilnosti i modul SIGMA/W za provedbu naponsko deformacijskih analiza. Kod modula SLOPE/W parametri materijala zadaju se kao karakteristične vrijednosti, ali su u proračunu korištene proračunske vrijednosti automatski faktorizirane proračunskim pristupom 3 (PP3) kako je prikazano na sljedećoj slici.



Slika 18: Proračunski pristup 3 zadan u modulu SLOPE/W

U modulu SIGMA/W parametri materijala direktno se zadaju kao proračunske vrijednosti prethodno dobivene i prikazane u Tablici 5.

## 4.1. Analize stabilnosti

Pomoću modula SLOPE/W se metodom granične ravnoteže računa stabilnost krutih, nedeformabilnih blokova na potencijalnim kliznim plohama u dvije dimenzije. Cilj analize je pronaći kritičnu kliznu plohu s najmanjim faktorom sigurnosti koji se definira kao odnos posmične čvrstoće i posmičnog naprezanja na kliznoj plohi. Program GeoStudio 2021.4 sadrži više različitih metoda granične ravnoteže koje se razlikuju po pretpostavkama, obliku klizne plohe i jednadžbama ravnoteže [2]. Opisi metoda prikazani su u sljedećoj tablici.

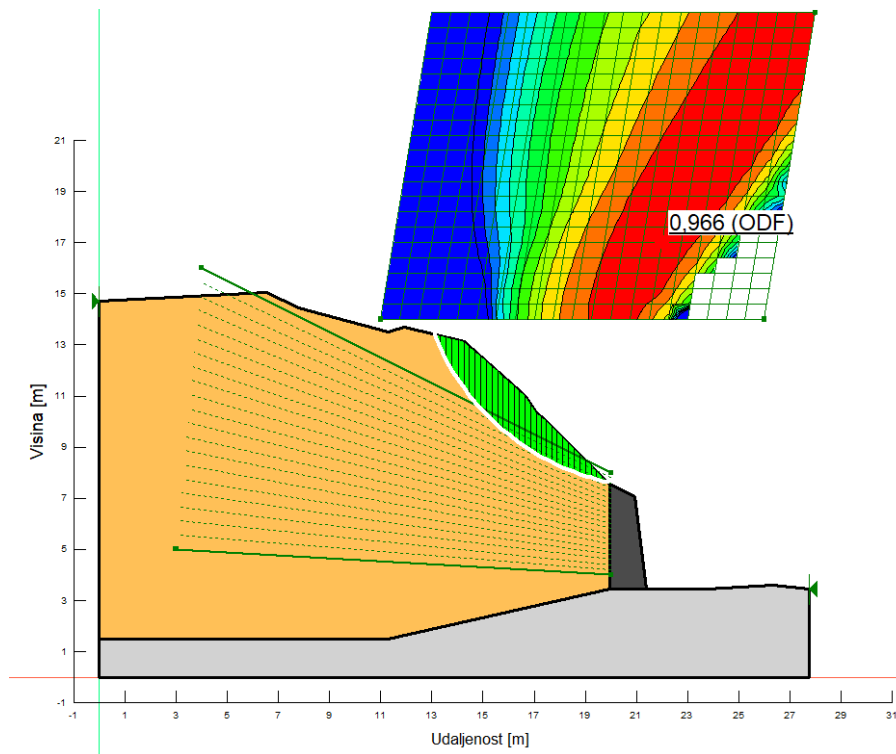
Tablica 12: Metode granične ravnoteže [2]

| Naziv varijante                                    | Oblik klizne plohe | Jednadžbe ravnoteže |                | Sile među lamelama |                   | Funkcija nagiba sila među lamelama $f(x)$    |
|--|--------------------|---------------------|----------------|--------------------|-------------------|--|
|  |                    | $\Sigma F = 0$      | $\Sigma M = 0$ | $\Delta X$         | $\Delta Y$        |  |
| Obična ili Fellenius-ova (Fellenius, 1936.)        | Kružna             | NE                  | DA             | $\Delta X = 0$     | $\Delta Y = 0$    | $X = 0$<br>$Y = 0$                           |
| Janbu-ova pojednostavljena (Janbu, 1954.)          | Opća               | DA                  | NE             | $\Delta X \neq 0$  | $\Delta Y = 0$    | $f(x) = 0$                                   |
| Bishop-ova pojednostavljena (Bishop, 1955.)        | Kružna             | NE                  | DA             | $\Delta X \neq 0$  | $\Delta Y = 0$    | $f(x) = 0$                                   |
| Lowe-Karafath-ova (Lowe i Karafath, 1960.)         | Opća               | DA                  | NE             | $\Delta X \neq 0$  | $\Delta Y \neq 0$ | Prosječni nagib površine terena i dna lamele |
| Morgenstern-Price-ova (Morgenstern i Price, 1965.) | Opća               | DA                  | DA             | $\Delta X \neq 0$  | $\Delta Y \neq 0$ | Promjenjiva, zadaje korisnik                 |
| Spencer-ova (Spencer, 1967.)                       | Opća               | DA                  | DA             | $\Delta X \neq 0$  | $\Delta Y \neq 0$ | $f(x) = \text{const.}$                       |
| Sarma-ina (Sarma, 1973.)                           | Opća               | DA                  | DA             | $\Delta X \neq 0$  | $\Delta Y \neq 0$ | $Y = C + X \cdot \tan \phi$                  |

Napomene:  $\Sigma F = 0$  – jednadžba ravnoteže sila  
 $\Sigma M = 0$  – jednadžba ravnoteže momenata sila

Za odabir kritične klizne plohe u ovom slučaju koristit će se Morgenstern – Price-ova metoda. Skup kliznih ploha dobiven je metodom „grid and radius“ kod koje se zadaje mreža središta rotacije kružnih ploha te mreža tangenata.

Kao rezultat svake analize dobiva se faktor sigurnosti koji mora biti veći od jedan kako bi kosina bila stabilna ( $F_s > 1$ ). Ako je faktor sigurnosti manji od jedan dolazi do sloma ( $F_s < 1$ ). Prvo su analizirane situacije sa niskom razinom podzemne vode pošto tijekom istražnog bušenja nije zabilježena razina podzemne vode.

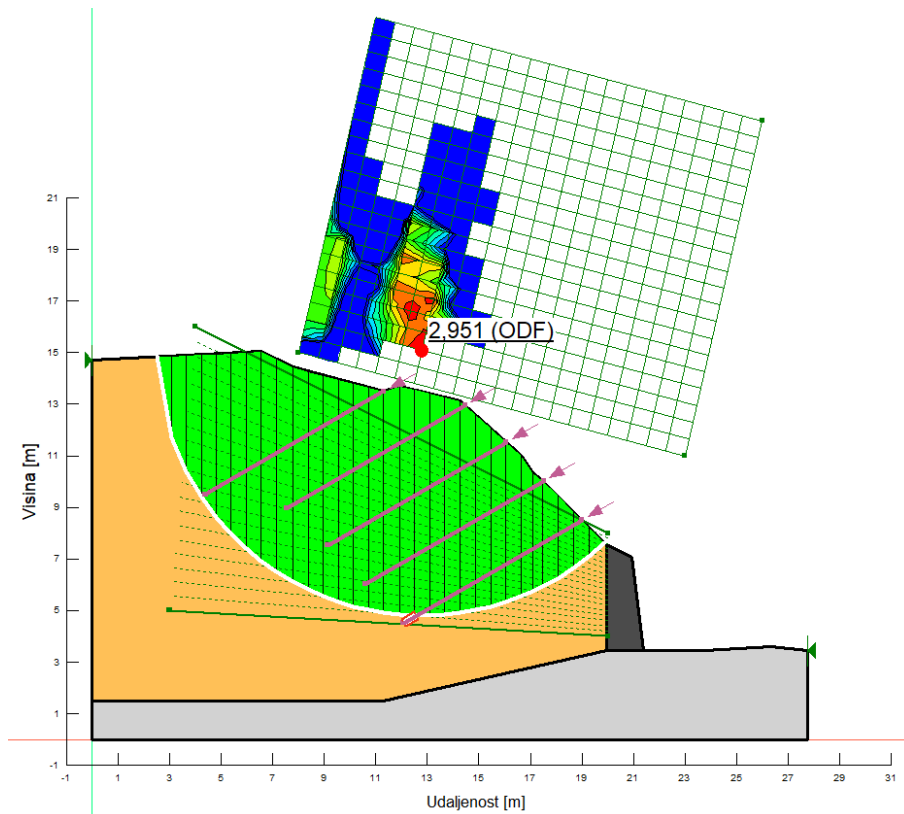


Slika 19: Faktor sigurnosti bez stabilizacije s niskom razinom podzemne vode

Na Slici 19 prikazano je stanje zausjeka prije ugradnje bilo kakve stabilizacije te je vidljivo da faktor sigurnosti iznosi 0,966 što znači da je kosina nestabilna. Kako bi se postigao faktor sigurnosti veći od 1 ugrađena su pasiva sidra (čavli) duž kosine. Detaljne informacije o ugrađenim sidrima dane su u sljedećoj tablici.

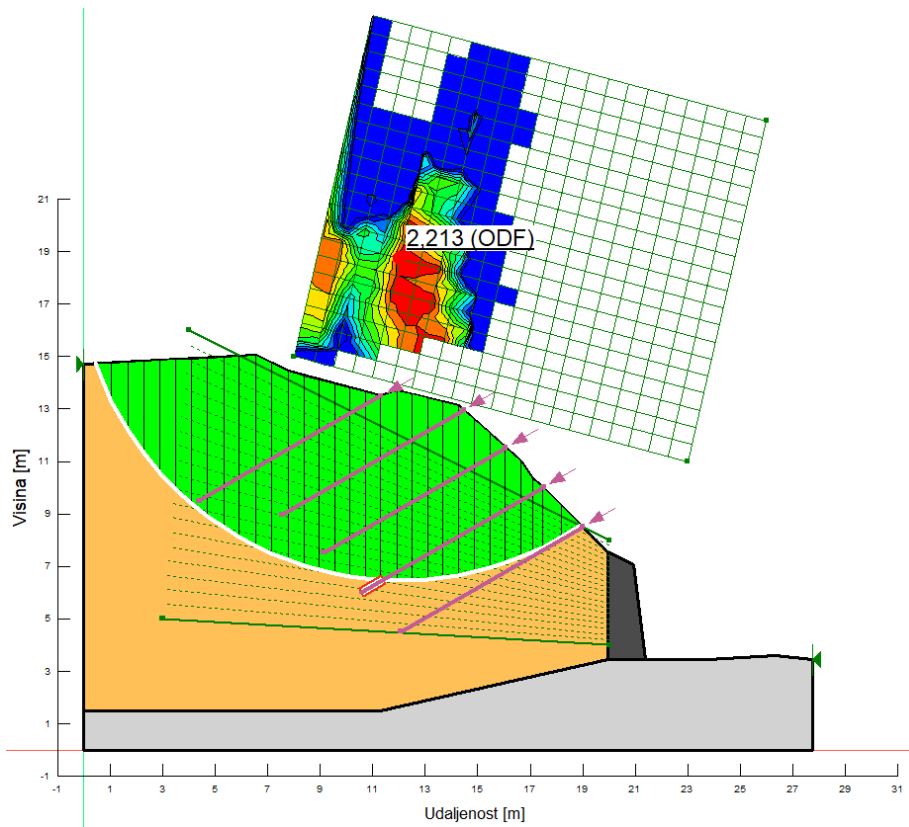
Tablica 13: Karakteristike ugrađenih sidara

| Promjer sidra | Duljina sidra | Kut otklona od horizontalne ravnine | Uzdužni razmak sidara | Broj sidara u poprečnom presjeku |
|---------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 0,2 m         | 8 m           | 30°                                 | 2 m                   | 5                                |

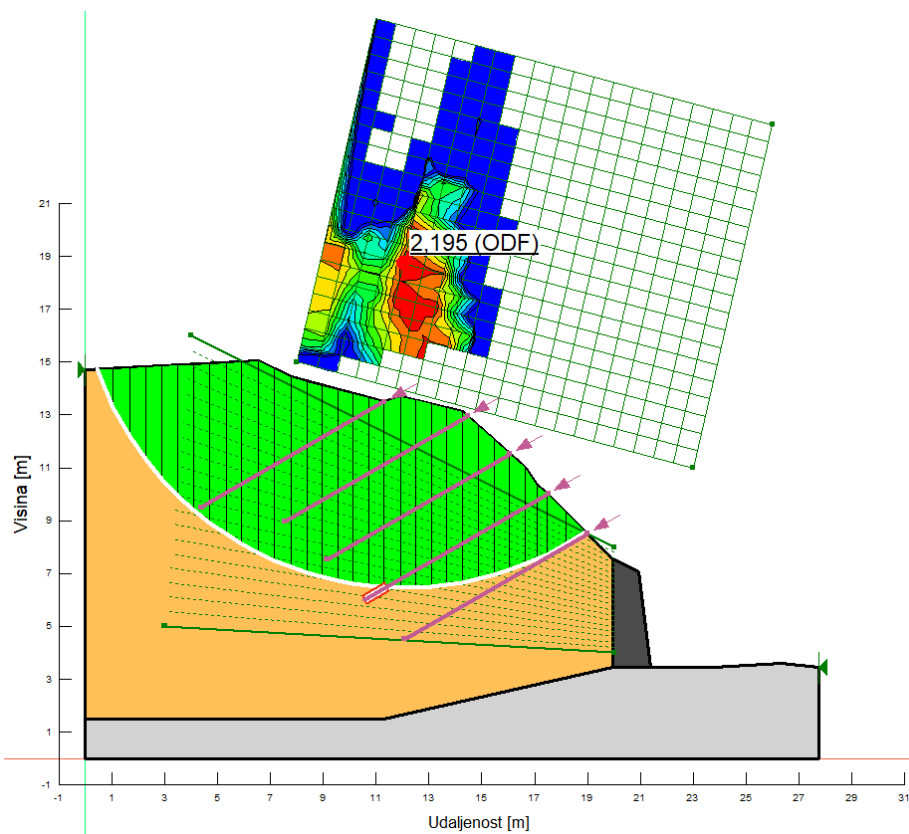


Slika 20: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom i niskom razinom podzemne vode

Nakon ugradnje pet redova pasivnih sidara znatno raste faktor sigurnosti i iznosi 2,951 što čini kosinu stabilnom (Slika 20). Potrebno je još provjeriti hoće li ojačana kosina ostati stabilna nakon nametanja potresnog opterećenja zadavanjem horizontalnog i vertikalnog seizmičkog koeficijenta za povratni period od 475 godina. Promatrane su dvije analize s potresnim opterećenjem zbog zadavanja pozitivne i negativne vrijednosti vertikalnog seizmičkog koeficijenta. Rezultati su prikazani na Slici 21 i Slici 22.



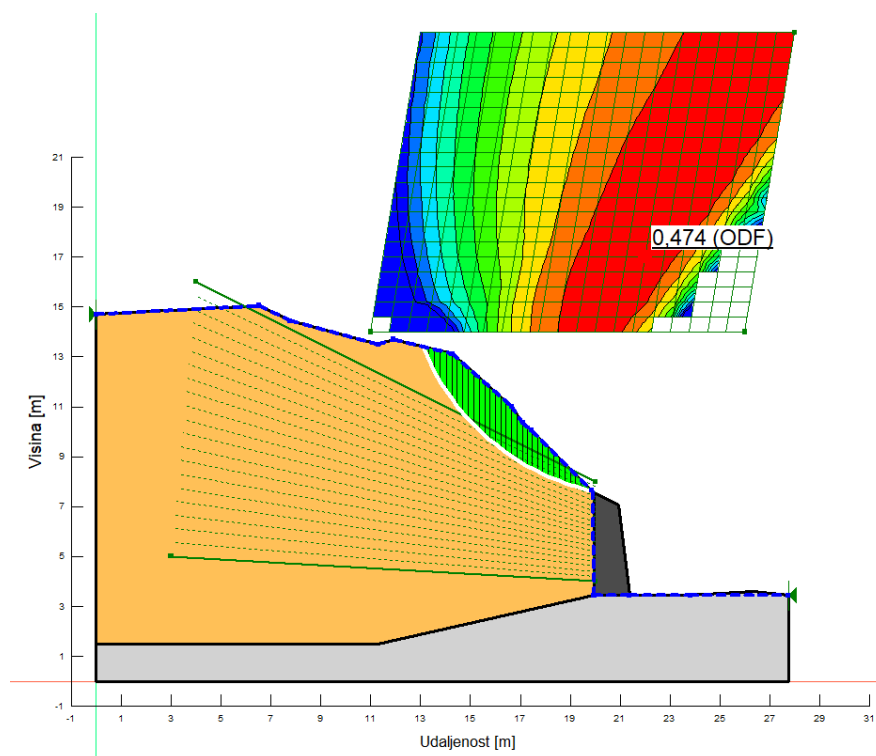
Slika 21: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, niskom razinom podzemne vode i potresom (+)



Slika 22: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, niskom razinom podzemne vode i potresom (-)

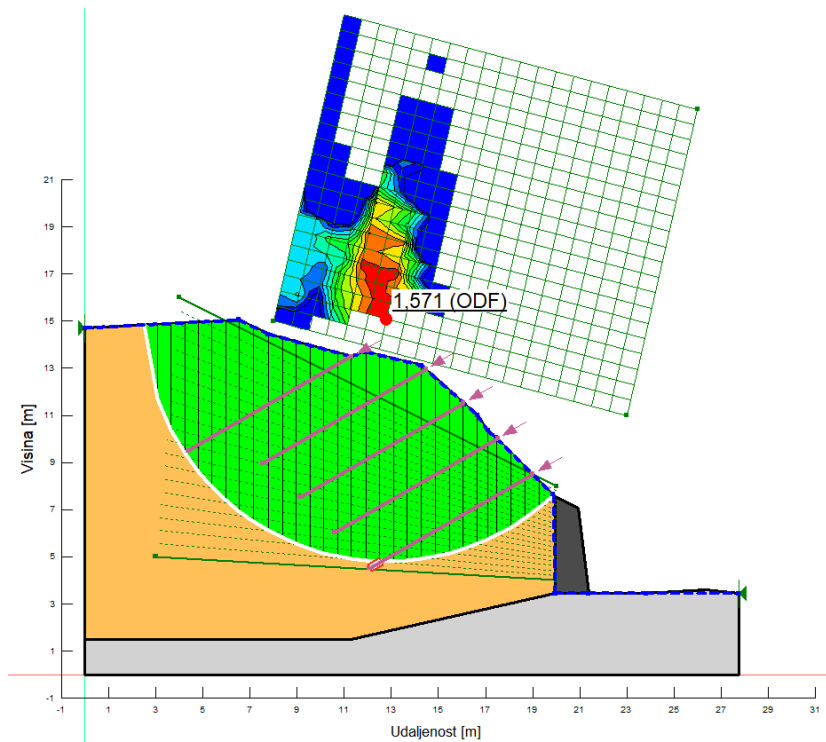
Na Slici 21 prikazan je faktor sigurnosti u iznosu od 2,213 dobiven prilikom djelovanja potresnog opterećenja uz korištenje pozitivnog vertikalnog seizmičkog koeficijenta. Slično je dobiveno i na Slici 22 gdje je korištena negativna vrijednost vertikalnog seizmičkog koeficijenta, a faktor sigurnosti iznosi 2,195. Vidljivo je da su vrijednosti faktora sigurnosti približno iste, ali ipak negativna vrijednost vertikalnog seizmičkog koeficijenta daje nepovoljniji rezultat. Usporedbom ovih rezultata s rezultatom dobivenim bez uzimanja potresnog opterećenja u obzir može se zaključiti da potres dosta utječe na stabilnost kosine i smanjuje faktor sigurnosti, ali nedovoljno da dođe do nestabilnosti.

Kako bi se provjerile najnepovoljnije moguće situacije provele su se iste analize, ali s visokom razinom podzemne vode do koje može doći zbog nepovoljne morfologije terena te nepostojećeg sustava dreniranja. Zbog visoke razine vode dolazi do povećanja pornih pritisaka u tlu i smanjenja posmične čvrstoće pa se očekuju niži faktori sigurnosti.



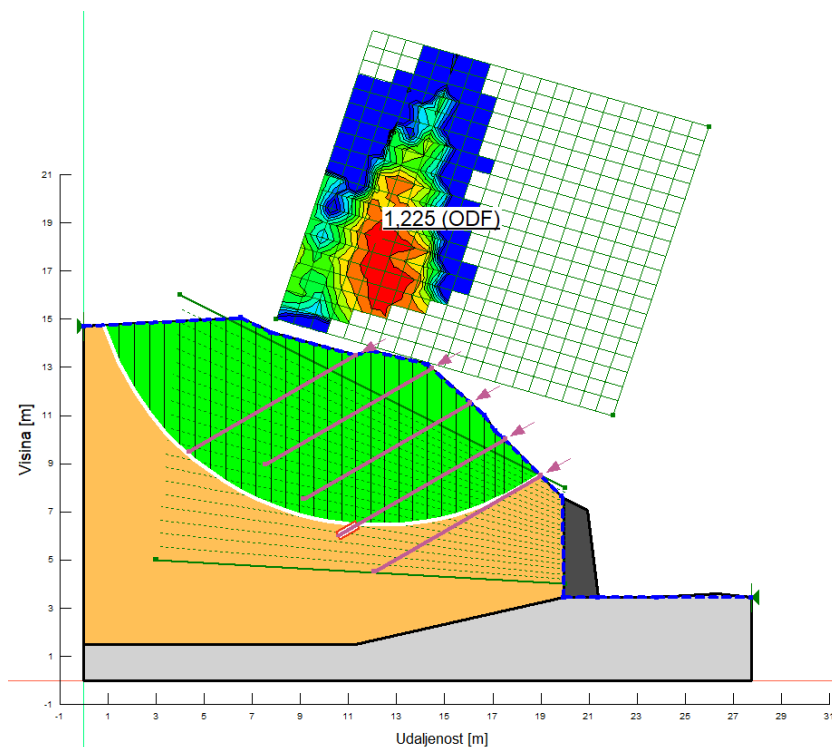
Slika 23: Faktor sigurnosti bez stabilizacije s visokom razinom podzemne vode

Faktor sigurnosti neojačanog zausjeka s visokom razinom podzemne vode iznosi 0,474 (Slika 23), puno manje i nepovoljnije od situacije s niskom razinom podzemne vode.



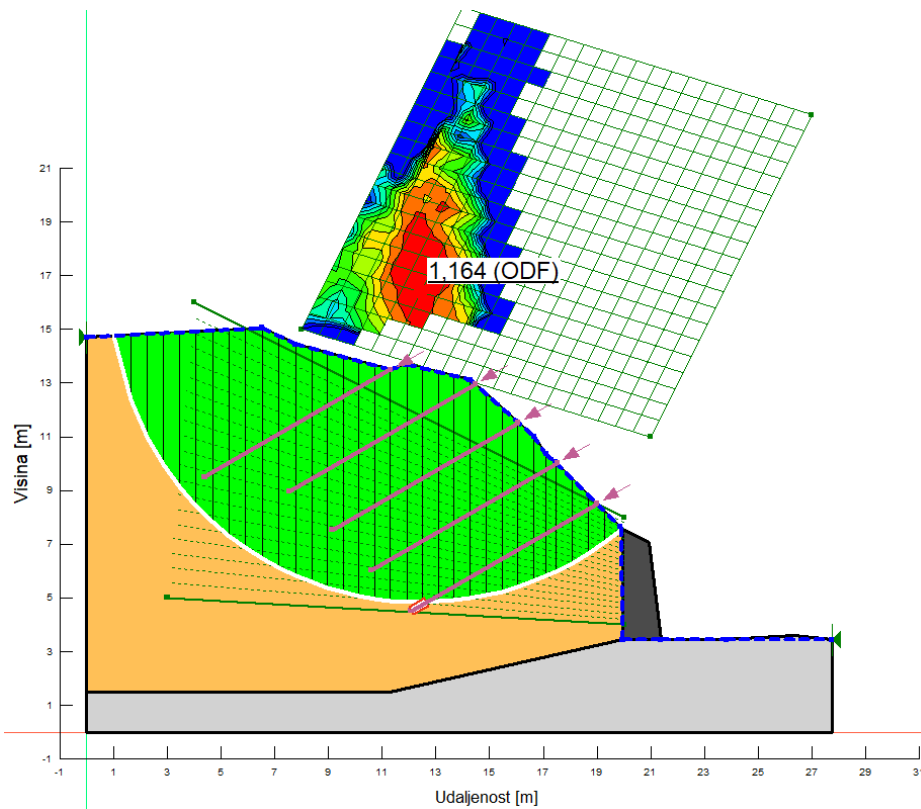
Slika 24: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom i visokom razinom podzemne vode

Ponovno, ugradnjom sidara faktor sigurnosti raste na 1,571 te zadovoljava uvjet stabilnosti. Također, provjeriti će se i situacije s potresnim opterećenjem, a rezultati su prikazani na Slici 25 i Slici 26.



Slika 25: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, visokom razinom podzemne vode i potresom (+)

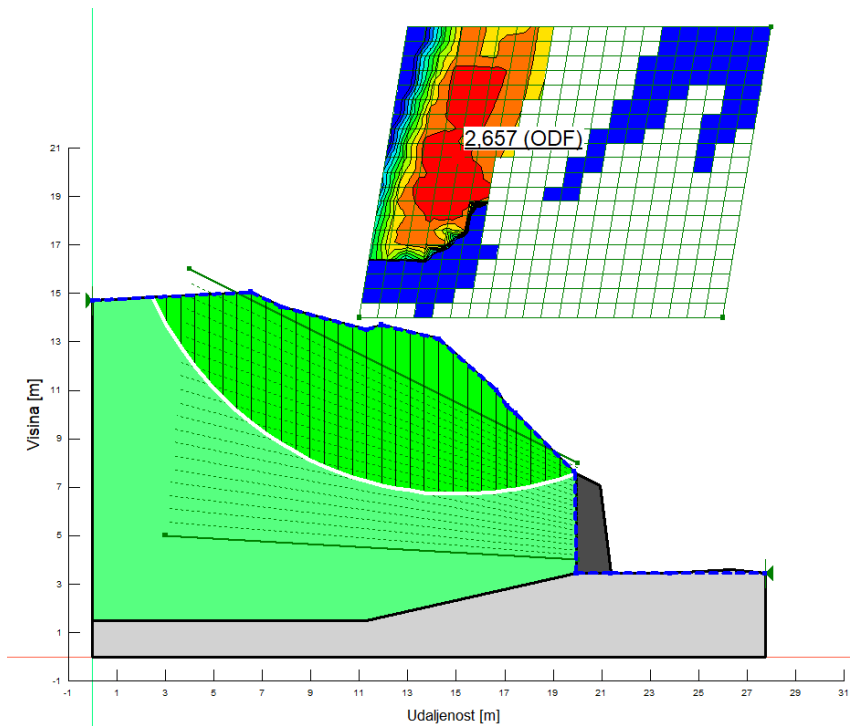




Slika 26: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, visokom razinom podzemne vode i potresom (-)

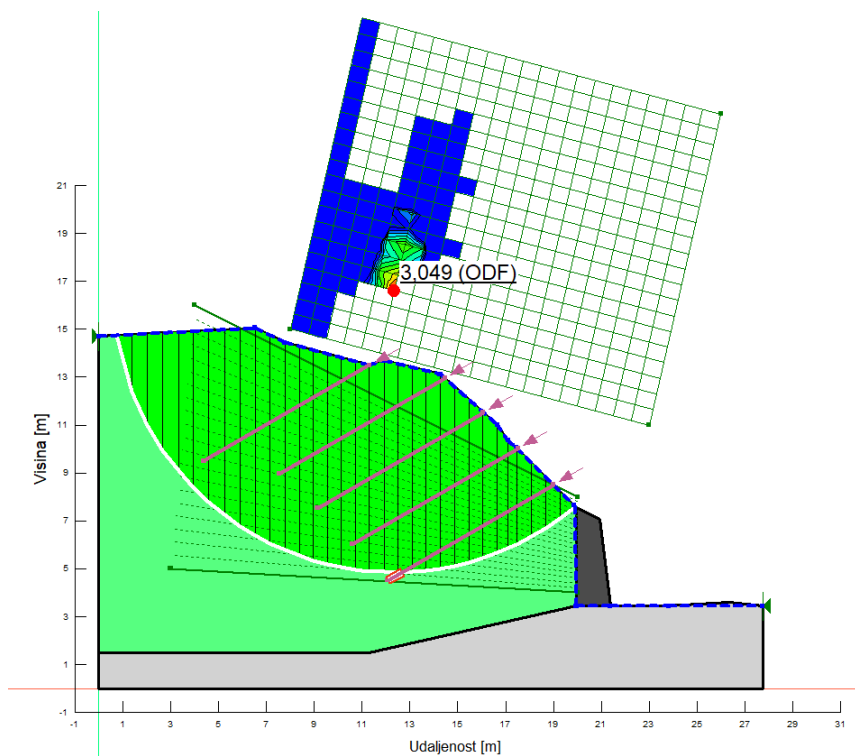
Potresnim opterećenjem ponovno je smanjen faktor sigurnosti, za situaciju s pozitivnim vertikalnim seizmičkim koeficijentom on iznosi 1,225, a s negativnim faktor sigurnosti je 1,164 što i dalje zadovoljava uvjet  $F_s > 1$ .

Za sljedeće analize koristio se nedrenirani model materijala kod sloja gline, dok se do sad koristio Mohr – Coulombov model. Kod nedreniranog modela unosi se samo vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće koja u ovom slučaju za glinu iznosi 83 kPa.



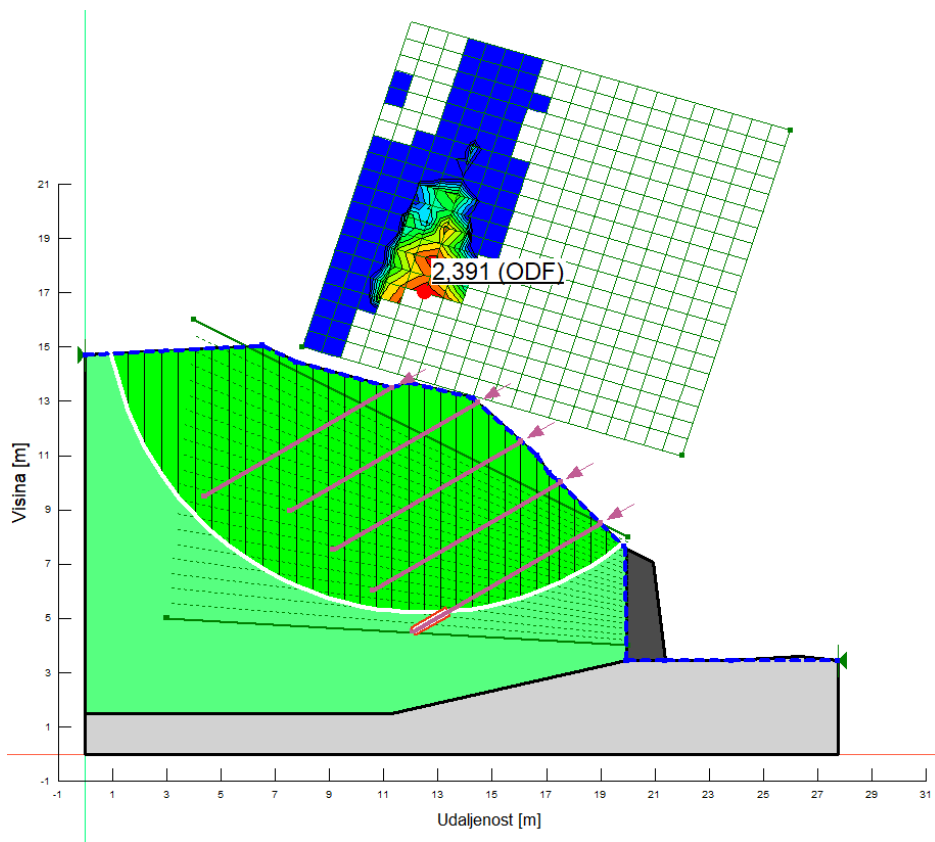
Slika 27: Faktor sigurnosti bez stabilizacije s visokom razinom podzemne vode u nedreniranim uvjetima

Za neojačanu kosinu faktor sigurnosti u nedreniranim uvjetima iznosi 2,657 (Slika 27) što je već i bez ugradnje pasivnih sidara zadovoljavajuće.



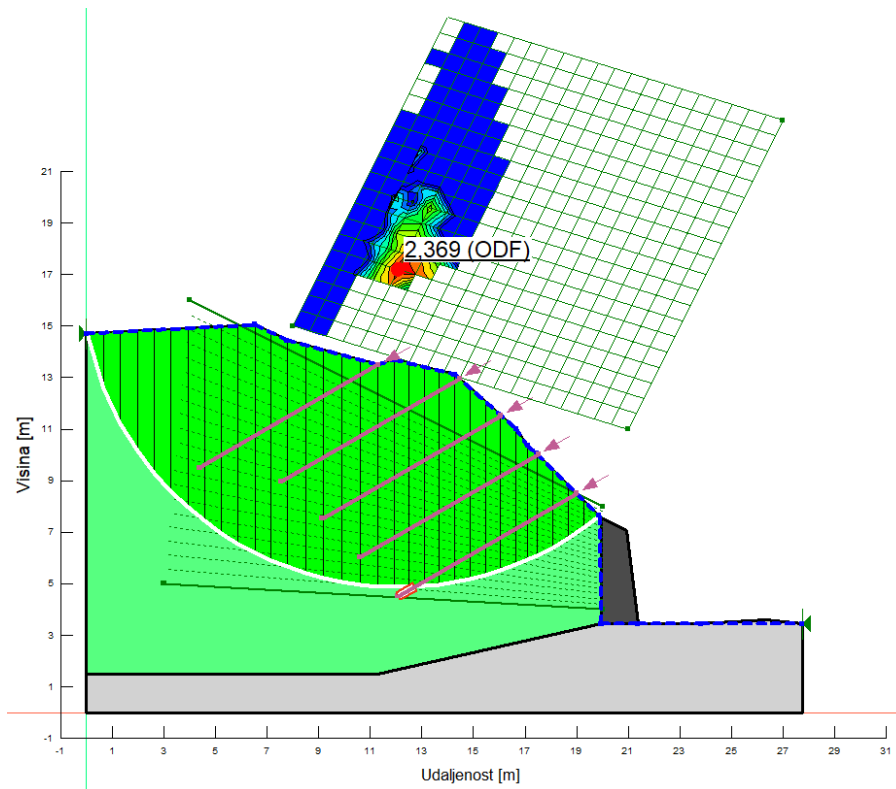
Slika 28: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom i visokom razinom podzemne vode u nedreniranim uvjetima

Na Slici 28 faktor sigurnosti je povećan zbog ugradnje pasivnih sidara te on iznosi 3,049.



Slika 29: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, visokom razinom podzemne vode i potresom (+) u nedreniranim uvjetima

Djelovanjem potresa, s pozitivnom vrijednošću vertikalnog seizmičkog koeficijenta, faktor sigurnosti pada na 2,391 što je i dalje vrlo povoljna situacija (Slika 29).



Slika 30: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, visokom razinom podzemne vode i potresom (-) u nedreniranim uvjetima

Na Slici 30 prikazan je rezultat analize s potresnim opterećenjem uz korištenje negativnog vertikalnog seizmičkog koeficijenta, faktor sigurnosti je nešto manji nego kod prethodne analize te on iznosi 2,369.

U sljedećim tablicama dan je pregled svih dobivenih rezultata za odabrane projektne situacije u sklopu analiza stabilnosti.

Tablica 14: Faktori sigurnosti za nisku razinu podzemne vode

| Projektna situacija              | Faktor sigurnosti |
|----------------------------------|-------------------|
| Bez stabilizacije                | 0,966             |
| Sa stabilizacijom                | 2,951             |
| Sa stabilizacijom i potresom (+) | 2,213             |
| Sa stabilizacijom i potresom (-) | 2,195             |

Tablica 15: Faktori sigurnosti za visoku razinu podzemne vode

| Projektna situacija              | Faktor sigurnosti |
|----------------------------------|-------------------|
| Bez stabilizacije                | 0,474             |
| Sa stabilizacijom                | 1,571             |
| Sa stabilizacijom i potresom (+) | 1,225             |
| Sa stabilizacijom i potresom (-) | 1,164             |

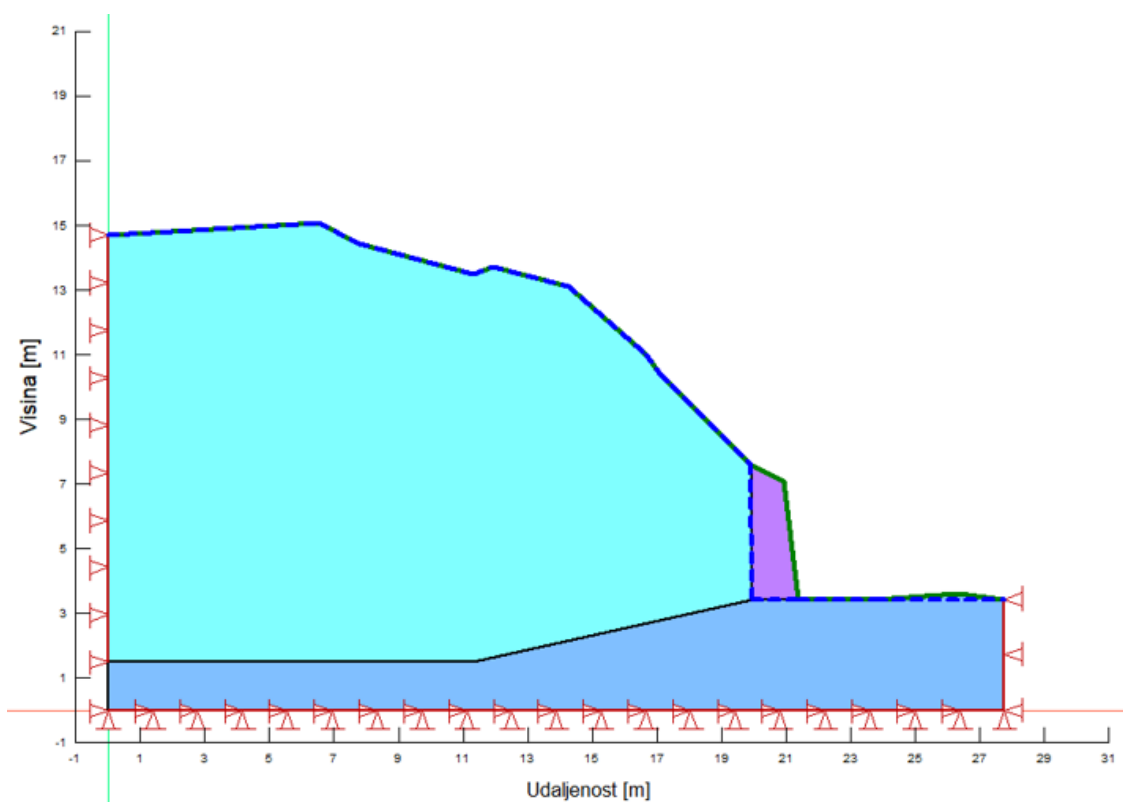
Tablica 16: Faktori sigurnosti za nedrenirane uvjete

| Projektna situacija              | Faktor sigurnosti |
|----------------------------------|-------------------|
| Bez stabilizacije                | 2,657             |
| Sa stabilizacijom                | 3,049             |
| Sa stabilizacijom i potresom (+) | 2,391             |
| Sa stabilizacijom i potresom (-) | 2,369             |

## 4.2. Naponsko deformacijske analize

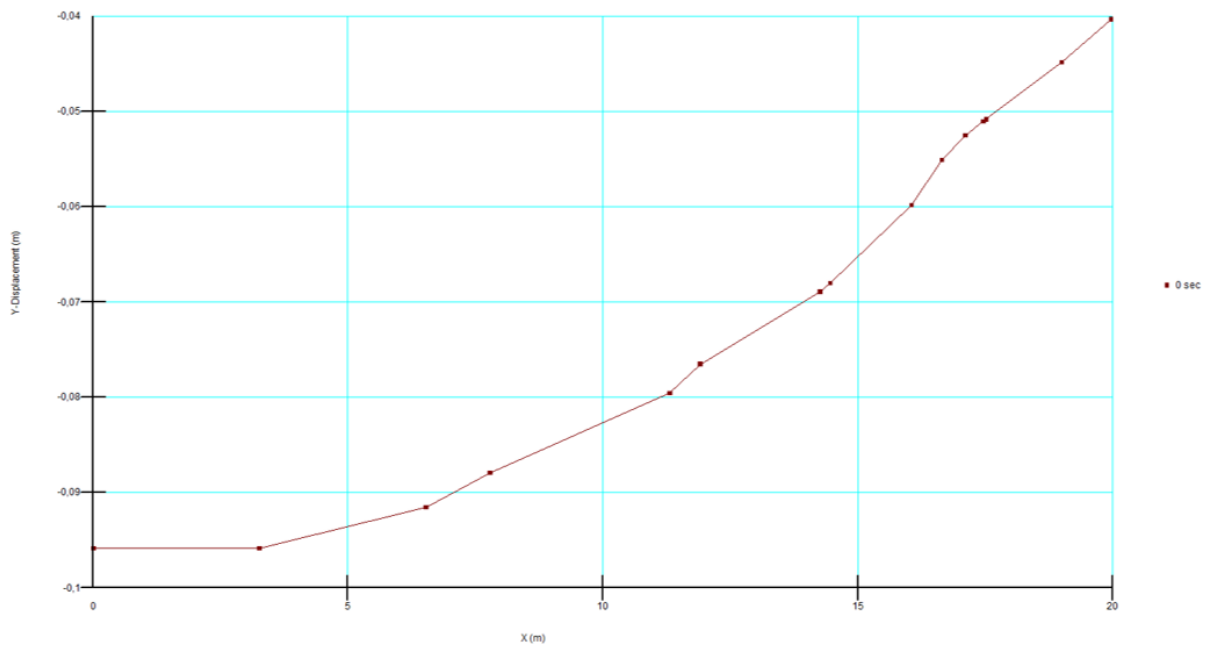
Kroz modul SIGMA/W određuju se sile u ugrađenim elementima te slijeganja i pomaci u tlu. Razmatrane su dvije faze kod naponsko deformacijskih analiza, prva je in situ analiza početnog stanja naprezanja odnosno situacija bez ugrađenih pasivnih sidara, a druga podrazumijeva ugradnju pasivnih sidara.

Iako istražnim bušenjem nije detektirana razina podzemne vode u tlu, ona se u naponsko deformacijskim analizama ipak uzima u obzir na isti način kao i kod analiza stabilnosti.



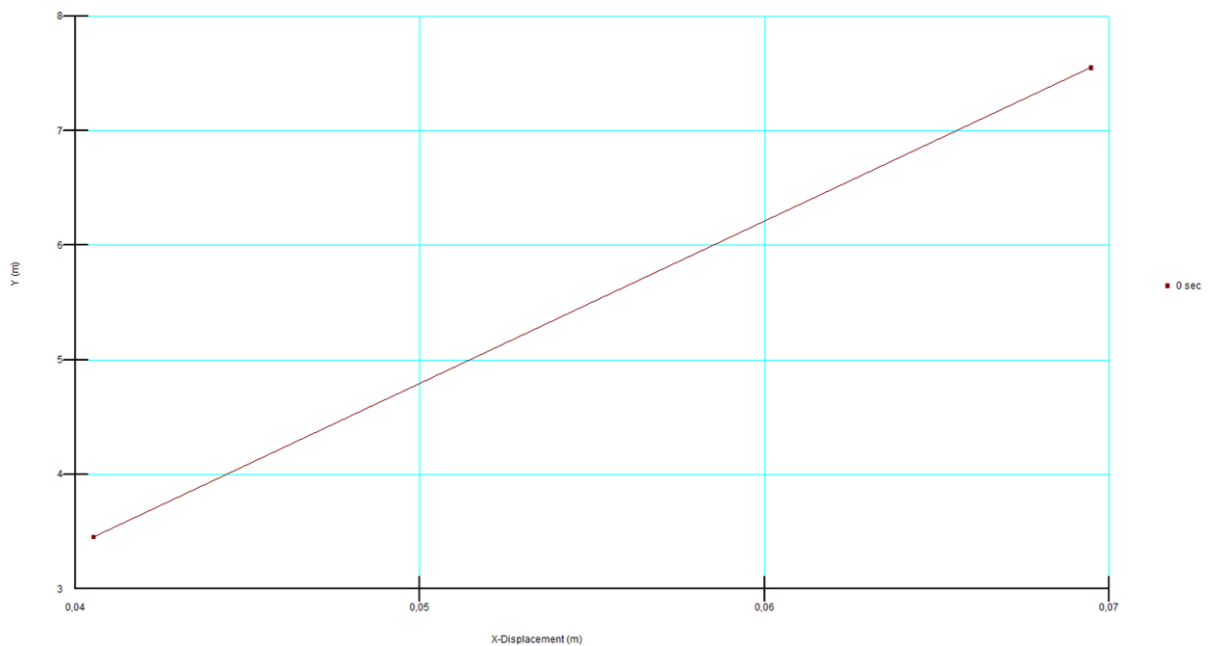
Slika 31: Početno stanje naprezanja

Na Slici 31 prikazan je model tla u početnom stanju naprezanja simulirajući stvarno stanje na terenu s visokom razinom podzemne vode, prije poduzimanja bilo kakvih mjera sanacije.



Slika 32: Slijeganje površine terena u početnom stanju napreznja

Slijeganje površine terena u početnom stanju napreznja (Slika 32) kreće se između 4 i 10 cm, a na Slici 33 prikazan je bočni pomak potpornog zida koji ima najveću vrijednost na vrhu zida i iznosi oko 7 cm.



Slika 33: Bočni pomak potpornog zida

U drugoj fazi ugrađuju se pasivna sidra pa je potrebno odrediti neke dodatne karakteristike kao što su modul elastičnosti, površina poprečnog presjeka i moment inercije. Modul elastičnosti čelika iznosi  $2 \cdot 10^8$  kPa. Površina poprečnog presjeka i moment inercije mogu se izračunati pomoću formula na temelju promjera sidra koje iznosi 0,2 m.

Površina poprečnog presjeka:

$$A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = \frac{0,2^2 \cdot \pi}{4} = 0,0314 \text{ m}^2$$

Moment inercije:

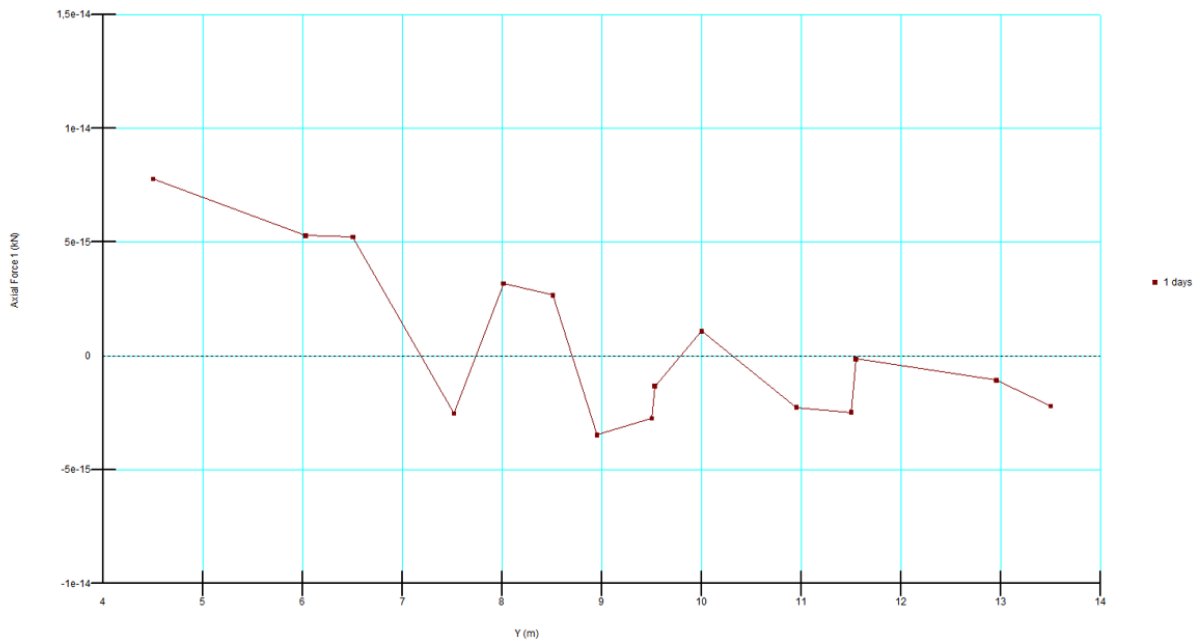
$$I = \frac{D^4 \cdot \pi}{64} = \frac{0,2^4 \cdot \pi}{64} = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Vrijednosti potrebne za zadavanje pasivnih sidara prikazane su u Tablici 17.

Tablica 17: Karakteristike pasivnih sidara

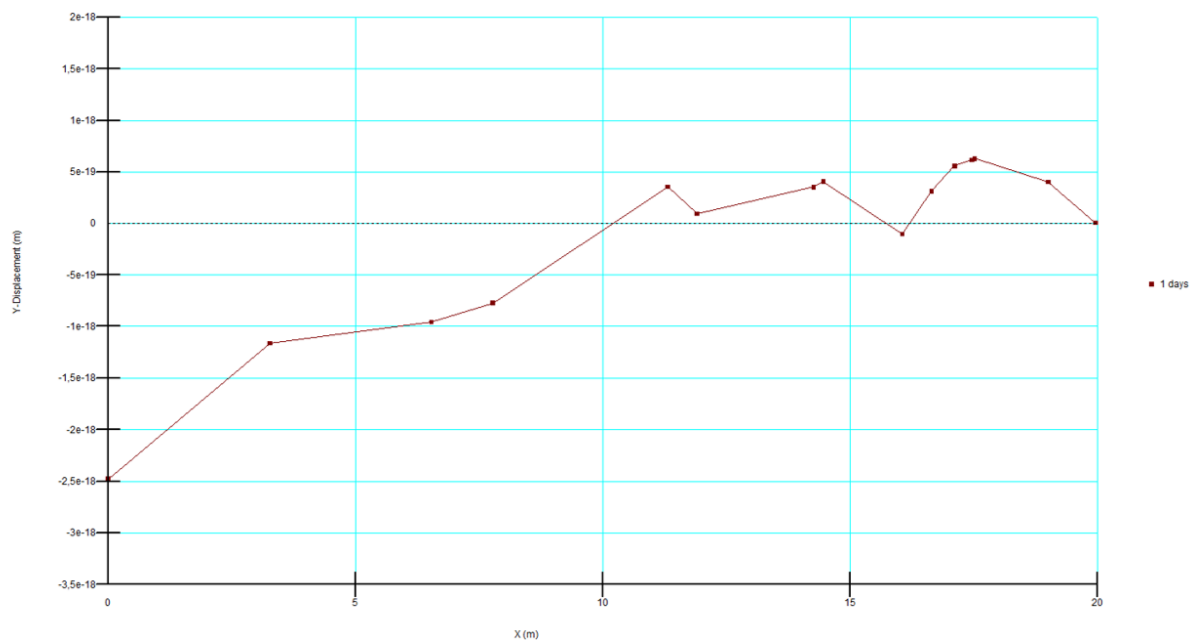
|                             |                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Modul elastičnosti          | $2 \cdot 10^8$ kPa                  |
| Površina poprečnog presjeka | 0,0314 m <sup>2</sup>               |
| Moment inercije             | $7,85 \cdot 10^{-5}$ m <sup>4</sup> |
| Uzdužni razmak sidara       | 2 m                                 |



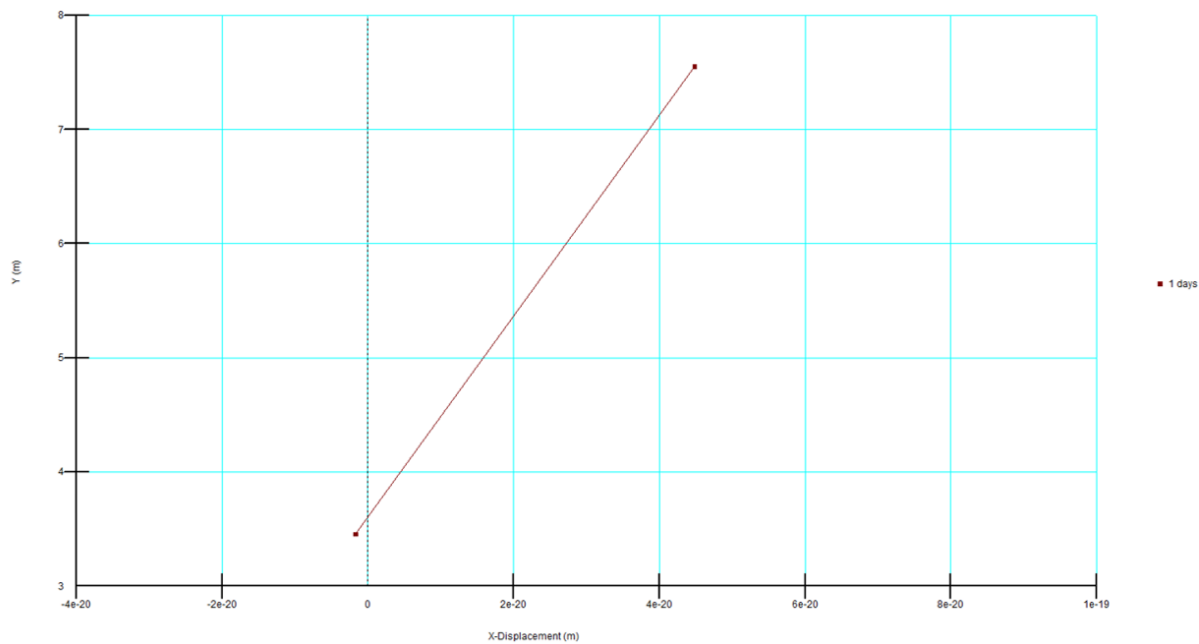


Slika 34: Sile u pasivnim sidrima

Na Slici 34 prikazane su sile koje se javljaju u ugrađenim sidrima te se može vidjeti da su vrijednosti vrlo malene što ima smisla jer pasivna sidra počinju apsorbirati silu tek kod pomaka temeljnog tla.



Slika 35: Slijeganje površine terena nakon ugradnje pasivnih sidara



Slika 36: Bočni pomak potpornog zida nakon ugradnje pasivnih sidara

Sa Slike 35 i Slike 36 vidljivo je da su se slijeganje površine terena i bočni pomak potpornog zida nakon ugradnje pasivnih sidara smanjili i vrte se oko nule.

### 4.3. Dimenzioniranje elemenata pasivnih sidara

Dimenzioniranje podrazumijeva određivanje najmanjih dimenzija pojedinih elemenata konstrukcija, a da ne dođe do sloma ili deformacija. Na temelju zadanih parametara prikazanih u Tablici 18 izračunata je najmanja potrebna duljina pasivnih sidara koja se može ugraditi, a da ne dođe do sloma. Na taj način smanjuje se korištenje nepotrebnih količina materijala, a time i cijena same izgradnje.

Tablica 18: Zadani parametri pasivnih sidara

| Vlačna nosivost sidra | Otpornost na čupanje | Promjer sidra | Uzdužni razmak sidara |
|-----------------------|----------------------|---------------|-----------------------|
| 400 kN                | 150 kPa              | 0,2 m         | 2 m                   |

Izračun potrebne duljine sidara:

$$R_a = 400 \text{ kN}; q = 150 \text{ kPa}$$

$$R_{as} = \frac{R_a}{s} = \frac{400}{2} = 200 \text{ kN/m}$$

$$R_{bs} = \frac{q \cdot D \cdot \pi \cdot L_0}{s} = \frac{150 \cdot 0,2 \cdot \pi \cdot 8}{2} = 376,99 \text{ kN/m}$$

$$R = \min \{R_{as}; R_{bs}\} = \{200; 376,99\} \text{ kN/m}$$

$R_{as}$  (vlačna nosivost po dužnom metru) <  $R_{bs}$  (sila izvlačenja po dužnom metru)

Mjerodavnija je manja vrijednost pa će se izračunati potrebna duljina sidra s obzirom na zadanu vlačnu nosivost:

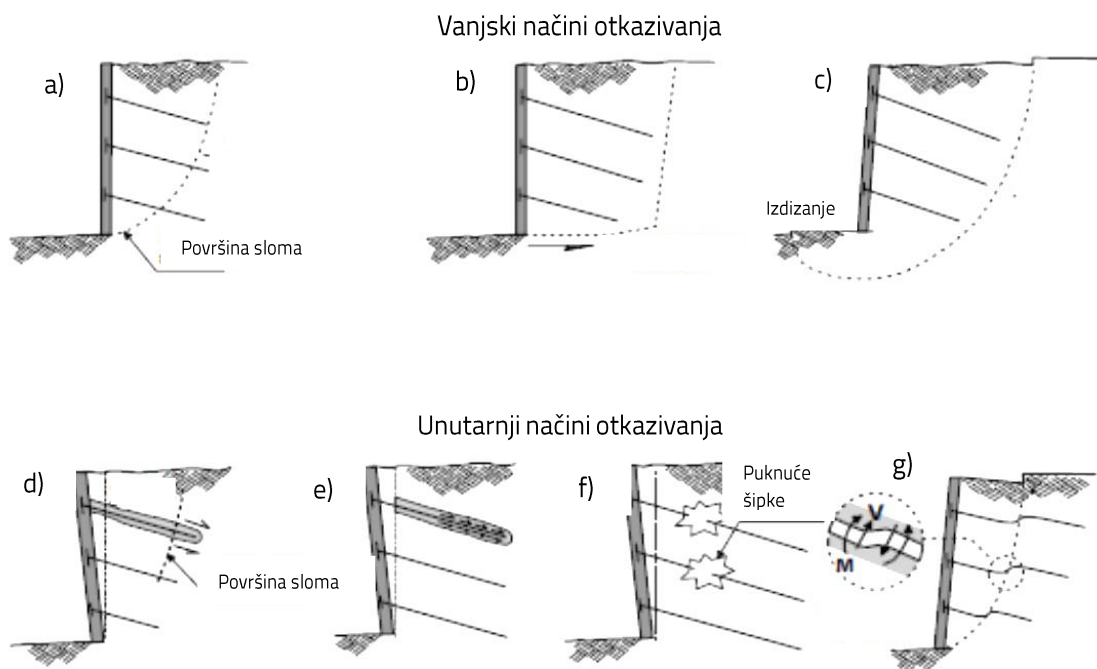
$$\frac{R_a}{s} < \frac{q \cdot D \cdot \pi \cdot L_p}{s}$$

$$L_p = \frac{R_a}{q \cdot D \cdot \pi} = \frac{400}{150 \cdot 0,2 \cdot \pi} = 4,24 \text{ m}$$

Prilikom modeliranja odabrana je duljina sidara od  $L_0 = 8 \text{ m}$ , ali na temelju provedenog dimenzioniranja vidljivo je da najmanja potrebna duljina sidara iznosi  $L_p = 4,24 \text{ m}$ .

## 5. PROGRAM KONTROLE I OSIGURANJA KVALITETE

Prilikom projektiranja čavlanog tla potrebno je osigurati zadovoljavajuću razinu sigurnosti s obzirom na krajnja granična stanja koja su povezana sa globalnim slomom, stabilnošću na klizanje, slomom zbog nosivosti, popuštanjem sustava tlo/sidro, popuštanjem prednjeg dijela zida i korozijom [6]. Navedeni načini otkazivanja mogu se ugrubo podijeliti na vanjske i unutarnje načine otkazivanja (Slika 37). Vanjske analize stabilnosti provode se kako bi se provjerilo može li čavlasto tlo izdržati destabilizirajuće sile izazvane iskopom, privremenim opterećenjima te ekstremnim opterećenjima. Unutarnji načini otkazivanja odnose se na otkazivanje u mehanizmima prijenosa opterećenja između tla, čavla i injekcijske smjese [10].



Slika 37: Principi otkazivanja kod čavlanog tla [10]

Na slici su redom prikazani:

- a) Globalni slom
- b) Slom zbog klizanja
- c) Slom zbog nosivosti (izdizanje baze)
- d) Slom izvlačenjem čavla iz tla
- e) Slom izvlačenjem šipke iz injekcijske smjese
- f) Vlačni slom čavla
- g) Popuštanje čavla i/ili posmični slom

Ispitivanja sidara, ako se pravilno izvode, igraju veliku ulogu u izgradnji kvalitetnog čavlanog tla pa se provode u cilju:

- Dobivanja parametara nužnih za projektiranje – kako bi se dobio što bolji model ponekad se sidro ispituje i prije projektiranja, takvo sidro se naziva probnim sidrom i izvodi se na probnom polju
- Verifikacije projektnog rješenja – prilikom modeliranja sidara koriste se rezultati istražnih radova i podaci o parametrima injekcijske smjese i čelične dionice te se zbog određene doze nesigurnosti tijekom modeliranja takvih sidara provode njihova ispitivanja da bi se vidjelo ponaša li se sidro u skladu s pretpostavljenim
- Kontrole kvalitete izvedenih radova [11]

Kontrola kvalitete mora se provoditi tijekom izvedbe kako bi se dokazalo sljedeće:

- Gradnja se izvodi u skladu s propisima
- Dopuštene visine iskopa nisu prekoračene
- Izvedene bušotine nisu se urušile tijekom ugradnje čavla
- Čelične šipke su odgovarajuće veličine i tipa
- Sustavi zaštite od korozije su u skladu s propisima
- Injektiranje, postavljanje armaturne mreže i nanošenje mlaznog betona se provodi u skladu s propisima
- Test čupanja čavla potvrđuje projektirane vrijednosti propisane specifikacijama
- Potrebna drenaža ispravno je postavljena [10]

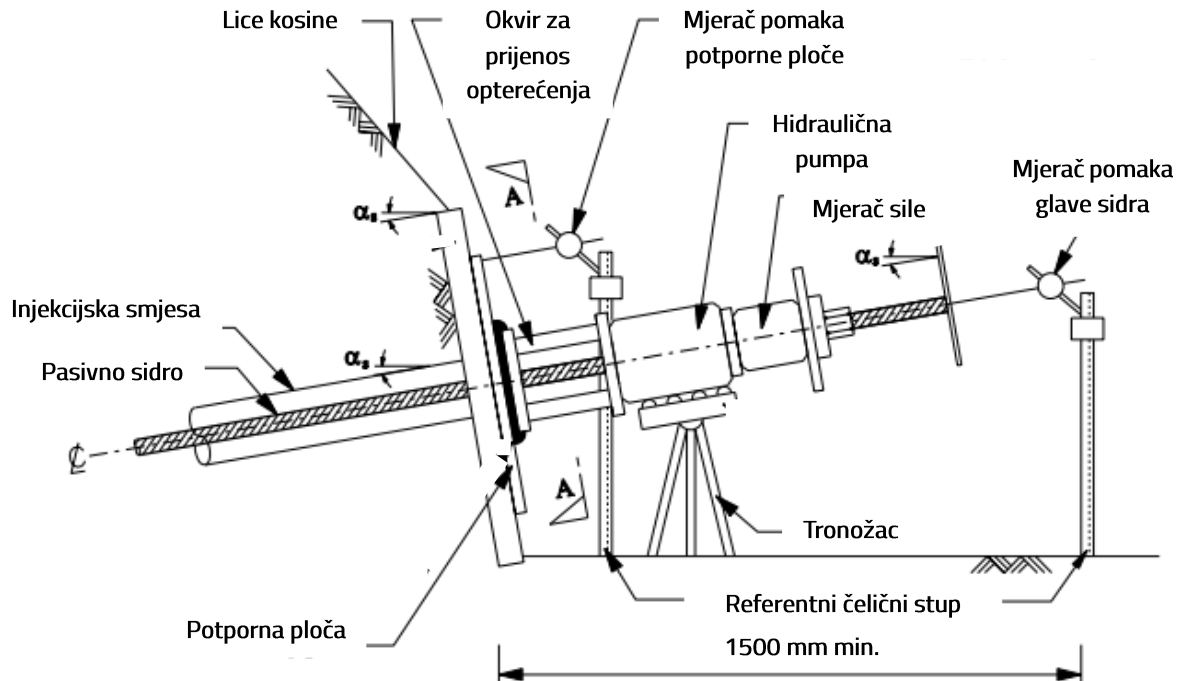
## 5.1. Ispitivanje pasivnih sidara

Općenito ispitivanja pasivnih sidara mogu se podijeliti na ispitivanja nosivosti sidra/sila u sidru i ispitivanja kvalitete injektiranosti sidra. Neka od ispitivanja nosivosti sidra/sila u sidru su test čupanja sidra i tehnika akustične emisije, a najčešće korišteno ispitivanje kvalitete injektiranosti sidra je ispitivanje Boltometrom [11].

### 5.1.1. Test čupanja sidra

Najčešće korištena metoda ispitivanja sidara je test čupanja sidra (eng. pull – out test). Postoje dvije vrste ispitivanja. Kod prve vrste tijekom ispitivanja dolazi do sloma čeličnog dijela ili izvlačenja sidra iz okolnog tla, a služi za provjeru stvarne nosivosti sidra. Drugom vrstom ispitivanja provjerava se može li sidro preuzeti nametnutu radnu silu predviđenu projektom [12]. Ispitivanje bi se trebalo provesti prije planirane izvedbe sidara kako bi se prikupljene informacije mogle pregledati i po potrebi promijeniti projektom predviđeni parametri [9]. Metoda se sastoji od postupnog nanošenja vlačne sile na glavu sidra, nametnuta sila mjeri se pomoću ugrađenih mjernih ćelija, a mjerači pomaka mjere vrijednosti ostvarenog pomaka. Sva mjerna oprema prikazana je na Slici 38. Kao rezultat ispitivanja dobiva se dijagram sila čupanja – pomak [12].

Test čupanja sidra je razorna metoda što znači da iščupana sidra više nisu funkcionalna, a ISMR (Međunarodno društvo za mehaniku stijena) preporučuje ispitivanje barem 5% ugrađenih sidara. Također, metoda je relativno skupa i spora pa se razvijaju nove metode koje nastoje na nerazoran način, brzo i jeftino odrediti silu u sidru. Jedna od tih metoda je i tehnika akustične emisije [11].

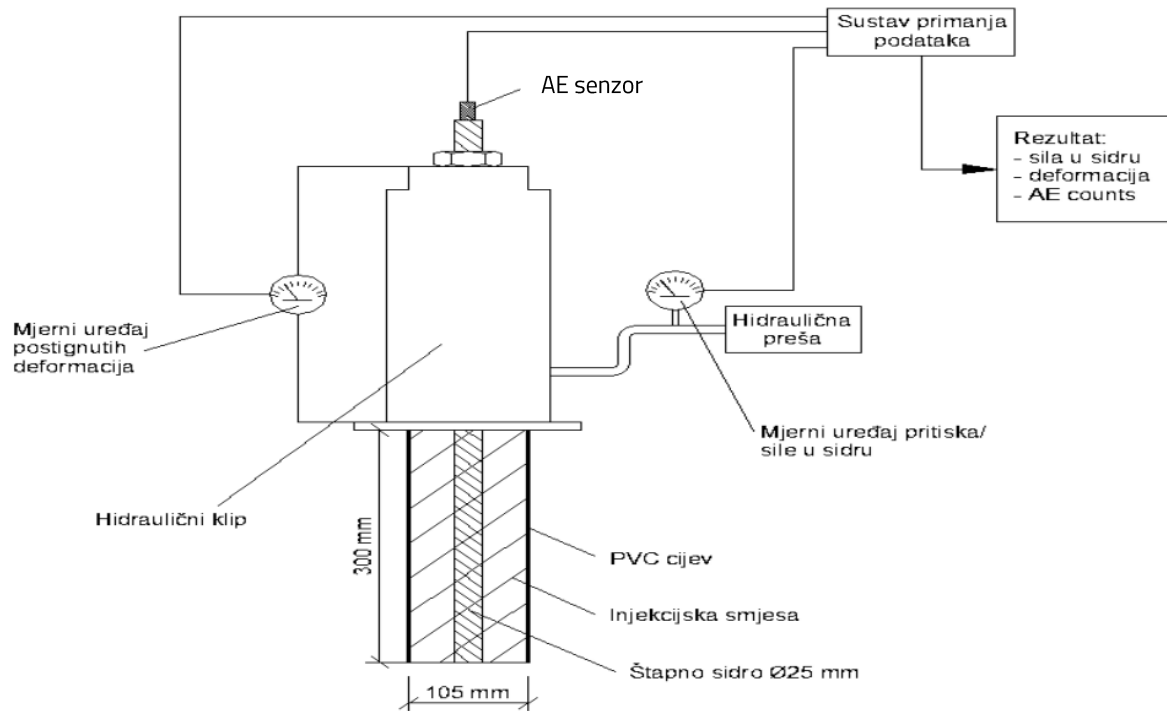


Slika 38: Mjerna oprema za test čupanja sidra [9]

### 5.1.2. Tehnika akustične emisije

Postupak ispitivanja sličan je testu čupanja, nanosi se vlačna sila pomoću hidraulične pumpe te se kontinuirano mjeri. Povećanjem opterećenja nastaju pukotine u injekcijskoj smjesi i na kontaktu šipke – injekcijska smjesa pri čemu se naglo oslobađa energija koja se kroz uzorak širi u obliku valova. Akustičnom emisijom (AE) mjeri se broj vrhova dolaznih valova odnosno impulsa jer se energija vala pomoću senzora pretvara u električni napon. Ako mjereni broj impulsa akustične emisije naglo poraste može se zaključiti da se sila u sidru približava sili sloma te se ispitivanje može prekinuti, na taj način ne dolazi do čupanja šipke. Rezultat mjerenja akustične emisije prikazuje se kao odnos sile čupanja i izmjerenog broja impulsa. Tehnika akustične emisije ima prednost nad ostalim nerazornim metodama u tome što je izvor signala u samom materijalu, a ne izvan njega. Također, akustičnom emisijom prate se pomaci u materijalu, dok se kod ostalih nerazornih metoda otkrivaju geometrijski diskontinuiteti. Glavna prednost ove metode je ispitivanje cijelog uzorka tijekom jednokratnog opterećenja bez postavljanja uređaja za ispitivanje u sam uzorak [13]. Na Slici 39 prikazana je oprema za provođenje mjerenja akustičnom emisijom.

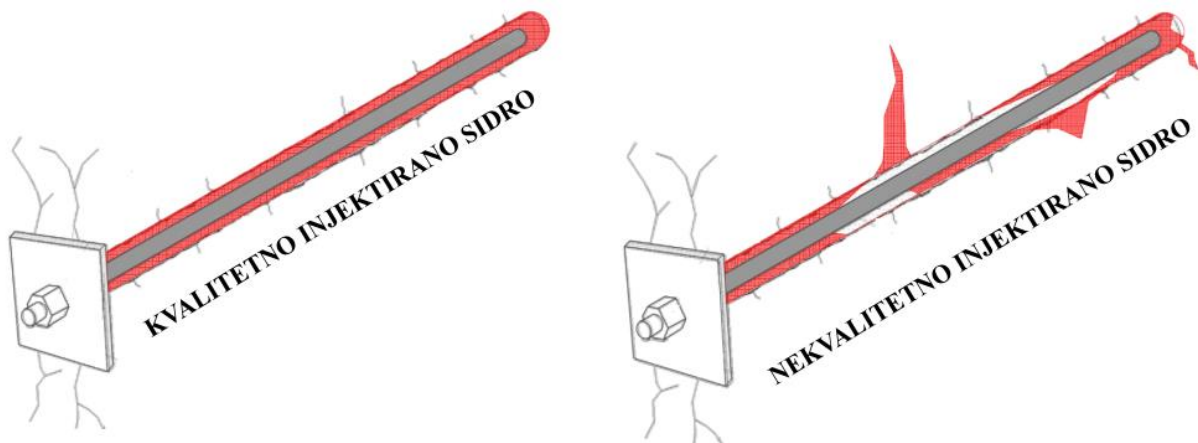




Slika 39: Oprema za provođenje tehnike akustične emisije [11]

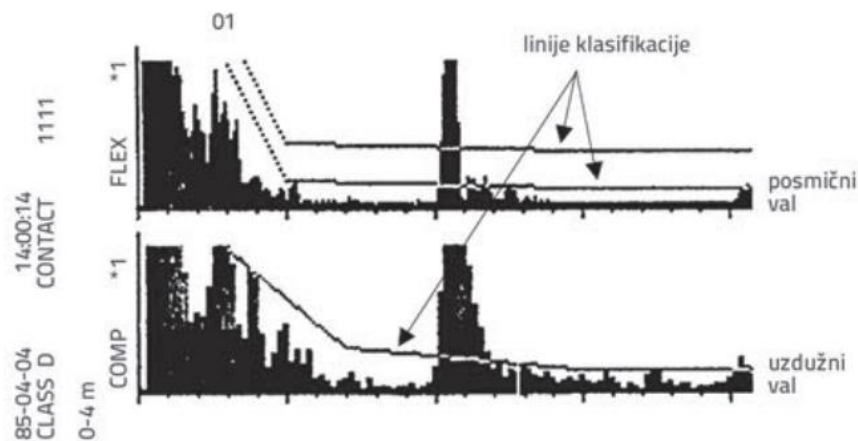
### 5.1.3. Ispitivanje Boltometrom

Najveći problem prilikom injektiranja sidra je postizanje potrebne kvalitete injektiranja, a glavni uzrok nekvalitetnog injektiranja su terenske prilike u kojima se injektiranje izvodi kao što su krški tereni. Na Slici 40 prikazan je primjer kvalitetno injektiranog i nekvalitetno injektiranog sidra kojem je posljedica reducirana nosivost sidra [11].



Slika 40: Kvalitetno i nekvalitetno injektirano sidro [11]

Kako bi se provjerila kvaliteta injektiranja sidra provodi se ispitivanje Boltometrom. To je uređaj koji koristi piezoelektrični senzor koji ujedno generira i registrira valove na glavi sidra. Generirani valovi putuju kroz ugrađeno sidro te se registriju nakon refleksije. Ako je sidro dobro injektirano povrat energije ostvariti će se jedino od kraja sidra, a ako je sidro loše injektirano i postoje određene anomalije doći će do refleksije određene količine energije od anomalije i kao takva će se registrirati na glavi sidra. Boltometar koristi i uzdužne i posmične valove te piezoelektrični senzor prepoznaje pojedinu vrstu vala. Kod posmičnih valova javlja se manja prigušenost, u odnosu na uzdužne, što osigurava kvalitetnije rezultate ispitivanja. Također, posmični valovi se izravno koriste za određivanje kvalitete injektiranja zbog visoke osjetljivosti na anomalije, dok se uzdužni valovi koriste kako bi se odredila efektivna duljina sidra [12]. Na temelju razine povratne energije Boltometar klasificira injektirana sidra u četiri skupine: A (optimalno), B (reducirano), C (manjkavo) i D (vrlo loše). Primjer rezultata ispitivanja Boltometrom prikazan je na Slici 41. Postoji nekoliko velikih nedostataka kod ispitivanja kvalitete injektiranja Boltometrom kao što je problem pri ispitivanju u raspucanim stijenskim masama zbog gubitka energije te potreba pripreme glave sidra kako bi se osigurao kvalitetan kontakt između čelika i generatora valova [11].



Slika 41: Primjer rezultata ispitivanja Boltometrom [12]

## 6. ISKAZ TROŠKOVA STABILIZACIJE ZAUSJEKA

Sanacija zausjeka izvršena je sa pet setova po pet sidara na uzdužnim razmacima od 2 m pa je tako ugrađeno 25 pasivnih sidara. Kako bi se prikazala ukupna cijena izvođenja stabilizacije zausjeka u nastavku je izrađen troškovnik sa pretpostavljenim cijenama pojedinih radova.

Tablica 19: Troškovnik izvedenih radova

| Opis stavke   | Jedinica mjere | Količina | Jedinična cijena | Ukupna cijena      |
|---|----------------|----------|------------------|--------------------|
| Nabava, transport i ugradnja čeličnih šipki za izvedbu pasivnih sidara.   | kg             | 494,00   | 10,50            | 5.187,00           |
| Priprema gradilišta koja obuhvaća dopremu i instalaciju opreme za bušenje i injektiranje za ugradnju pasivnih sidara te po završenim radovima raspremanje gradilišta odvoz opreme i dovođenje lokacije u prvobitno stanje. Obračun se vrši po kompletu. | kompl.         | 1,00     | 15.000,00        | 15.000,00          |
| Bušenje u glini za ugradnju pasivnih sidara koje obuhvaća sav potreban materijal, sredstva i rad na bušenju.  | m'             | 200,00   | 90,00            | 18.000,00          |
| Mlazno injektiranje pasivnih sidara obuhvaća dobavu, dopremu i ugradnju injekcijske smjese vodocementnog faktora 0,45.  | m <sup>3</sup> | 32,00    | 180,00           | 5.760,00           |
| <b>UKUPNO</b>   |                |          |                  | <b>43.947,00 €</b> |

## 7. ZAKLJUČAK

Zbog gubitka posmične čvrstoće uzrokovanog površinskim i podzemnim dotokom vode došlo je do klizanja koherentnog materijala na zausjeku tunela Rukavac. Kako bi se nastala nestabilnost što bolje sanirala provedena su terenska i laboratorijska ispitivanja. Terenskom identifikacijom i klasifikacijom te laboratorijskim ispitivanjima utvrđeno je da se na području zahvata profil tla sastoji od gline niske plastičnosti (gornji sloj) i vapnenačke stijene (donji sloj). Na temelju saznanja o uvjetima na terenu odabrana je najoptimalnija mjera sanacije zausjeka. Ugradnjom pasivnih štapnih sidara povećati će se stabilnost zausjeka te će se spriječiti moguća klizanja materijala. Kao dodatne mjere ugraditi će se i procjednica za dreniranje vode iz tijela kosine, mreže za zaštitu od erozije te će se izvesti drenažni jarak na dnu zausjeka. S odabranim rješenjem ugradnje pasivnih sidara provedene su analize stabilnosti i naponsko deformacijske analize u programu GeoStudio 2021.4. Za sve projektne situacije, čak i one najkritičnije s visokom razinom podzemne vode i djelovanjem potresa, dobiveni su zadovoljavajući faktori sigurnosti ( $F_s > 1$ ) te je time potvrđena stabilnost zausjeka ugradnjom odabranih stabilizacijskih elemenata. Naponsko deformacijskim analizama ustanovljeno je smanjenje slijeganja terena i bočnog pomaka potpornog zida ugradnjom pasivnih sidara. Kako bi se osigurala potrebna kvaliteta izvedbe radova provode se ispitivanja sidara, a neka od najčešćih su test čupanja sidra, tehnika akustične emisije i ispitivanje Boltometrom. S obzirom na sve do sada rečeno može se zaključiti da je izvedba pasivnih sidara bila najbolja opcija. Jednostavna je ugradnja, nema poteškoća kod izvedbe na teško dostupnim terenima i troškovi građenja puno su manji u odnosu na druge metode stabilizacije.

## POPIS LITERATURE

- [1] Kovačević M. S., Bačić M., Rossi N., Matić S. *Zausjek tunela Rukavac u km 43+820 do km 43+900, M203 Rijeka – Šapjane – Državna Granica* - Izvedbeni projekt, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2018.
- [2] Bačić M., Car M., Cvetković M., Pušić L., Rossi N., Matić S. *Zausjek tunela Rukavac u km 43+820 do km 43+900, M203 Rijeka – Šapjane – Državna Granica* – Geotehnički elaborat, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2018.
- [3] Kovačević M. S. *Geofizička ispitivanja*, predavanje iz kolegija Terenska ispitivanja i opažanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2024.
- [4] Geofizički odsjek Prirodoslovno – matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, *Karte potresnih područja Republike Hrvatske*. Dostupno: <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php> [Pristupljeno: 24. kolovoza 2024.]
- [5] Kovačević M. S. *Odabir potporne građevine*, predavanje iz kolegija Potporne građevine, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2024.
- [6] Kovačević M. S. *Sidreni sustavi*, predavanje iz kolegija Potporne građevine, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2024.
- [7] Kovačević M. S. *Stabilnost kosina u stijenskoj masi*, predavanje iz kolegija Mehanika stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2020.
- [8] Keller Group, *Pasivna sidra*. Dostupno: <https://www.keller.hr/ekspertiza/tehnike/pasivna-sidra> [Pristupljeno: 24. kolovoza 2024.]
- [9] Geotechnical Engineering Office *Guide to soil nail design and construction*, Hong Kong; 2008.
- [10] Bodas Santa V. B.: *Quality Control of Soil Nailing and Ground Anchors*, *Universidade de Lisboa*. Dostupno: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142118556/Resumo%20Alargado%20-%20Ing.pdf> [Pristupljeno: 5. rujna 2024.]
- [11] Građevinski fakultet, *Ojačanje stijenske mase štapnim sidrima*. Dostupno: [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI\\_12\\_predavanje\\_Ojacanje\\_stijenske\\_mase\\_stapnim\\_sidrima\\_2014.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_12_predavanje_Ojacanje_stijenske_mase_stapnim_sidrima_2014.pdf) [Pristupljeno: 5. rujna 2024.]
- [12] Bačić M., Gavin K., Kovačević M. S.: Trendovi u nerazornom ispitivanju stijenskih sidara, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 10, 823-831

- [13] Arbanas Ž., Kovačević M. S., Szavits – Nossan V.: Kontrola kvalitete štapnih sidara, *GRAĐEVINAR*, 57 (2005) 11, 859-867

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1: Zone zausjeka [1].....   | 3  |
| Slika 2: Dopuna materijalom na mjestu otklizanog materijala [1].....  | 4  |
| Slika 3: Postavljanje geotekstila [1].....  | 4  |
| Slika 4: Položaj istražnih radova [2].....  | 5  |
| Slika 5: Geotehnički profili tla na mjestu bušotina B1 i B2.....  | 9  |
| Slika 6: Refleksija i refrakcija valova u dvoslojnoj sredini [3].....                                       | 10 |
| Slika 7: Shematski prikaz konfiguracije mjerne opreme za seizmičku refrakciju [3].....                      | 12 |
| Slika 8: Dijagram udaljenost – vrijeme [3].....   | 13 |
| Slika 9: Nizovi geofona postavljenih u refrakcijski profil [2].....   | 14 |
| Slika 10: Shematski prikaz konfiguracije mjerne opreme za ispitivanje metodom seizmičke refrakcije [2]..... | 15 |
| Slika 11: Rezultati ispitivanja dobiveni seizmičkom refrakcijom [2].....                                    | 15 |
| Slika 12: Geotehnički profil tla.....   | 18 |
| Slika 13: Potresna karta Republike Hrvatske [4].....  | 19 |
| Slika 14: Sidrišna dionica i glava pasivnog sidra [7].....  | 23 |
| Slika 15: Postupak ugradnje pasivnih sidara [6].....  | 24 |
| Slika 16: Izvođenje čavlanog tla [5].....   | 25 |
| Slika 17: Komponente pasivnih sidara [6].....   | 26 |
| Slika 18: Proračunski pristup 3 zadan u modulu SLOPE/W.....   | 27 |
| Slika 19: Faktor sigurnosti bez stabilizacije s niskom razinom podzemne vode.....                           | 29 |
| Slika 20: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom i niskom razinom podzemne vode.....                           | 30 |
| Slika 21: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, niskom razinom podzemne vode i potresom (+).....             | 31 |
| Slika 22: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, niskom razinom podzemne vode i potresom (-).....             | 31 |
| Slika 23: Faktor sigurnosti bez stabilizacije s visokom razinom podzemne vode.....                          | 32 |
| Slika 24: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom i visokom razinom podzemne vode.....                          | 33 |
| Slika 25: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, visokom razinom podzemne vode i potresom (+).....            | 33 |
| Slika 26: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, visokom razinom podzemne vode i potresom (-).....            | 34 |
| Slika 27: Faktor sigurnosti bez stabilizacije s visokom razinom podzemne vode u nedreniranim uvjetima.....  | 35 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 28: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom i visokom razinom podzemne vode u nedreniranim uvjetima.....                | 35 |
| Slika 29: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, visokom razinom podzemne vode i potresom (+) u nedreniranim uvjetima ..... | 36 |
| Slika 30: Faktor sigurnosti sa stabilizacijom, visokom razinom podzemne vode i potresom (-) u nedreniranim uvjetima.....  | 37 |
| Slika 31: Početno stanje naprezanja .....   | 39 |
| Slika 32: Slijeganje površine terena u početnom stanju naprezanja .....   | 40 |
| Slika 33: Bočni pomak potpornog zida.....   | 40 |
| Slika 34: Sile u pasivnim sidrima.....  | 42 |
| Slika 35: Slijeganje površine terena nakon ugradnje pasivnih sidara.....  | 42 |
| Slika 36: Bočni pomak potpornog zida nakon ugradnje pasivnih sidara.....  | 43 |
| Slika 37: Principi otkazivanja kod čavlanog tla [10] .....  | 46 |
| Slika 38: Mjerna oprema za test čupanja sidra [9] .....   | 49 |
| Slika 39: Oprema za provođenje tehnike akustične emisije [11].....  | 50 |
| Slika 40: Kvalitetno i nekvalitetno injektirano sidro [11] .....  | 50 |
| Slika 41: Primjer rezultata ispitivanja Boltometrom [12].....   | 51 |



---

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1: Karakteristične vrijednosti parametara materijala za bušotinu B1 [2].....                 | 6  |
| Tablica 2: Karakteristične vrijednosti parametara materijala za bušotinu B2 [2].....                 | 7  |
| Tablica 3: Brzine uzdužnih valova u različitim medijima [3].....                                     | 11 |
| Tablica 4: Karakteristične vrijednosti parametara materijala.....                                    | 17 |
| Tablica 5: Proračunske vrijednosti parametara materijala.....  | 17 |
| Tablica 6: Parcijalni faktori [2].....   | 17 |
| Tablica 7: Usvojene vrijednosti horizontalnih vršnih ubrzanja tla.....                               | 19 |
| Tablica 8: Tipovi tla.....   | 20 |
| Tablica 9: Parametri tla prema tipovima tla.....   | 20 |
| Tablica 10: Vrijednosti parametara konstrukcije r u ovisnosti o vrsti temeljne konstrukcije<br>..... | 21 |
| Tablica 11: Seizmički parametri tla.....   | 21 |
| Tablica 12: Metode granične ravnoteže [2].....   | 28 |
| Tablica 13: Karakteristike ugrađenih sidara.....   | 29 |
| Tablica 14: Faktori sigurnosti za nisku razinu podzemne vode.....                                    | 38 |
| Tablica 15: Faktori sigurnosti za visoku razinu podzemne vode.....                                   | 38 |
| Tablica 16: Faktori sigurnosti za nedrenirane uvjete.....  | 38 |
| Tablica 17: Karakteristike pasivnih sidara.....  | 41 |
| Tablica 18: Zadani parametri pasivnih sidara.....  | 44 |
| Tablica 19: Troškovnik izvedenih radova.....   | 52 |