

# Proračun stabilnosti kosina predusjeka tunela "Podgrađe" na brzoj cesti Kašina - Zlatar Bistrica

---

**Bilonić, Danko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:100007>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-22**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Danko Bilonić**

**Split, 2023**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Danko Bilonić**

**Proračun stabilnosti kosina predusjeka tunela „Podgrađe“ na brzjoj cesti  
Kašina - Zlatar Bistrica**

**Diplomski rad**

**Split, 2023**

## **Proračun stabilnosti kosina predusjeka tunela „Podgrađe“ na brzjoj cesti Kašina - Zlatar Bistrica**

Sažetak: Iz geotehničke perspektive, statička i seizmička stabilnost predusjeka tunela temeljni je projektni problem. Proračun stabilnosti složen je postupak koji zahtijeva temeljito razumijevanje parametara koji se koriste u analizi stabilnosti. Ovaj se rad bavi općim konceptima stabilnosti i sloma kosina, s fokusom na numeričku metodu (Bishopovu metodu) za proračun stabilnosti kosina. Za proračun stabilnosti i parametarsku analizu koristi se program GEO5. Cilj ovog rada je prikazati rezultate analize stabilnosti kosine bez stabilizacije sa sidrima, te stabilizacije sa sidrima te izrada glavnog projekta stabilizacije predusjeka tunela.

Ključne riječi: stabilnost kosina, geotehnička sidra, nagib kosine, svojstva tla, podzemna voda.

### **Calculation of the stability of the slopes of the pre-section of the tunnel "Podgrađe" on the highway Kašina - Zlatar Bistrica**

Abstract: From a geotechnical perspective, the static and seismic stability of the tunnel section is a fundamental design problem. Stability calculation is a complex procedure that requires a thorough understanding of the parameters used in the stability analysis. This paper deals with the general concepts of slope stability and failure, with a focus on the numerical method (Bishop's method) for calculating slope stability. The GEO5 program is used for stability calculation and parametric analysis. The aim of this paper is to present the results of the analysis of slope stability without stabilization with anchors and stabilization with anchors, as well as the preparation of the main project for stabilization of the tunnel section.

Key words: slope stability, ground anchors, slope inclination, soil properties, ground water.



*Zahvaljujem se mentoru Doc. dr. sc. Goranu Vlastelici na pomoći pri izradi ovog diplomskog rada. Posebna zahvala obitelji na podršci tijekom studiranja.*

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

**KANDIDAT: Danko Bilonić**

**MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083217715**

**KATEDRA: Katedra za geotehniku**

**PREDMET: Geotehničko inženjerstvo**

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Proračun stabilnosti kosina predusjeka tunela „Podgrađe“ na brzjoj cesti Kašina - Zlatar Bistrica

Opis zadatka: Svojstva slojeva tla na lokaciji su određena istražnim radovima prikazanim u geotehničkom elaboratu izrađenim za predmetnu lokaciju. Dubina iskopa i tlocrtni položaj tunela „Podgrađe“ određeni su idejnim projektom trase brze ceste. Za tako definirane uvjete, potrebno je odabrati odgovarajuće stabilne nagibe pokosa na kosinama predusjeka. Ukoliko su potrebni strmiji nagibi pokosa, potrebno je odabrati i dimenzionirati zaštitnu konstrukciju za formiranje stabilnog pokosa na kosinama predusjeka tunela, te izraditi odgovarajući glavni geotehnički projekt predusjeka za oba portala tunela „Podgrađe“.

Prilozi:

- Geotehnički elaborat za zadanu lokaciju.
- Idejni projekt predmetnog objekta.

U Splitu, 28. veljače 2022.

Voditelj Diplomskog rada:

Doc. dr. sc. Goran Vlastelica

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:

Izv. prof. dr. sc. Ivo Andrić

## Sadržaj

1.	UVOD.....	1
1.1	Općenito.....	1
2.	GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI.....	2
2.1	Geomehanički istražni radovi .....	2
2.2	Geofizička istraživanja .....	5
3.	GEOLOŠKE, INŽENJERSKOGEOLOŠKE I HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE TERENA.....	7
3.1	Inženjerskogeološke karakteristike terena .....	7
3.2	Hidrogeološke karakteristike terena .....	9
3.3	Seizmičke karakteristike terena.....	10
4.	SASTAV I KARAKTERISTIKE TEMELJNOG TLA .....	11
4.1	Općenito.....	11
5.	METODE ANALIZE STABILNOSTI KOSINA .....	15
5.1	Općenito o metodama analize stabilnosti kosina .....	15
5.2	Elementi i vrste nestabilnosti na kosini .....	15
5.3	Načela granične ravnoteže .....	18
5.4	Pojednostavljena Bishopova metoda .....	19
6.	PRORAČUN STABILNOSTI KOSINA .....	21
6.1	Projektiranje prema EN 1997-1.....	21
6.2	Stabilizacija kosine geotehničkim štapnim sidrima.....	23
7.	PRORAČUN STABILNIH KOSINA PREDUSJEKA TUNELA .....	27
7.1	Uvodni parametri za proračun stabilnosti u programu GEO 5.....	27
7.2	Zadavanje geometrije ulaznog i izlaznog predusjeka tunela.....	29
7.3	Klasifikacija i adaptacija parametara Geotehničkih sredina .....	33
7.4	Projektna opterećenja i seizmička analiza .....	34
7.5	Podgradni sustav zasjeka .....	35
8.	REZULTATI ANALIZE U PROGRAMU GEO5 .....	40
8.1	Geometrija ulaznih modela .....	40
8.2	Definiranje kritične klizne plohe za analizu stabilnosti kosine .....	42
8.3	Ulazni predusjek tunela -Model 1 .....	43
8.4	Izlazni predusjek tunela-Model 2 .....	50
9.	ZAKLJUČAK .....	54
10.	LITERATURA.....	55



## 1. UVOD

### 1.1 Općenito

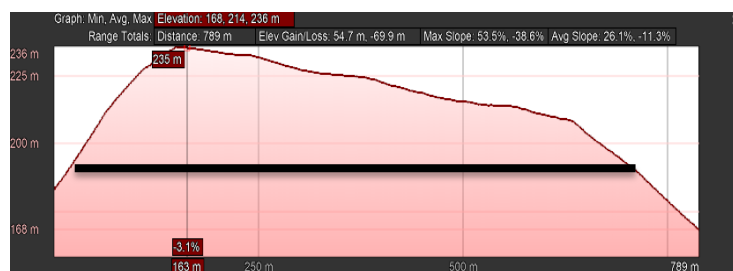
U okviru ovog projekta, primarni cilj je rješavanje kritičnog pitanja stabilizacije prethodno usječenih kosina, što je sastavni dio uspješne izgradnje tunela "Podgrađe". Detaljnom analizom nalaza geotehničkog elaborata i razmatranjem projektnih parametara trase brze ceste identificirane su odgovarajuće konfiguracije padina koje osiguravaju potrebnu stabilnost ulaznog i izlaznog predusjeka tunela Podgrađe. Projekt obuhvaća sveobuhvatnu procjenu geotehničkih aspekata, uzimajući u obzir čimbenike kao što su svojstva tla, kutovi nagiba, dubine iskopa i specifični uvjeti projekta tunela "Podgrađe". Sintetizirajući ove informacije, razvijen je glavni geotehnički projekt, te izvršen proračun stabilizacije kosina predusjeka.

Navedena trasa, slika 1, proteže se od cca km 20+340.00, počevši od planiranog čvora Marija Bistrica, do izlaza iz tunela „Podgrađe“, spajajući se na sljedeću dionicu u selu Selnica na cca km 23+000.00. Visinski profil terena, slika 2., iskorišten je svrhu izrade normalnog poprečnog presjeka ulazne i izlazne portalne građevine.



Slika 1. Prikaz tunela Podgrađe u programu Google Earth

Tunel će se izgraditi kroz prirodni greben čija nadmorska visina seže do 235 m n.v., kao što je vidljivo na slici 2. Tunel se nalazi u sklopu brze ceste Kašina Zlatar Bistrica, s početkom tunela u km cca 20+915.00, gdje se nalazi ulazni portal tunela, a završetak u km cca 21+602.00, gdje je lociran izlazni portal tunela Podgrađe.



Slika 2. Niveleta tunela „Podgrađe“ i visinski profil

## 2. GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI

### 2.1 Geomehanički istražni radovi

Geotehnički istražni radovi predstavljaju skup svih istraživanja i ispitivanja koja se provode za potrebe utvrđivanja uvjeta u tlu, stijeni i podzemnoj vodi, a rezultati se obrađuju i sintezno prikazuju u dokumentu koji se naziva geotehnički elaborat.

U okviru geomehaničkih istražnih radova na području tunela Podgrađe izvedene su dvije istražne bušotine, GP-22 i GP-23, čije su dubine 15 i 10 metara. Najbitniji rezultat istražnog bušenja je bušača jezgra koja predstavlja dubinski profil podloge istraživane pozicije. Bušenje je izvedeno metodom rotacijskog bušenja. Bušači alat se strojno rotira i hidraulički utiskuje s površine terena pomoću šupljih bušačkih šipki, kao što je prikazano na slikama 3 i 4.



*Slika 3. Bušača garnitura na lokaciji bušotine GP-22 [3]*



*Slika 4. Bušača garnitura na lokaciji bušotine GP-23 [3]*

Profil bušotine sadržava oznake dubina, vrste tla, promjene slojeva, iscrpan opis vrste i obilježja pojedinih slojeva i standardne oznake prema jedinstvenoj razredbi, a uzorci bušotina prikazani su na slikama 5 i 6. Osim toga u profil se unose podaci o ispitivanjima u bušotini, kao što su ispitivanja standardnim i statičkim prodiranjem i ispitivanja krilnom sondom, ali i ispitivanja u laboratoriju poput granice konzistencije, prirodne vlažnosti, zapreminske težine i sl. Tako složeni rezultati omogućuju precizan uvid u slijed i svojstva pojedinih slojeva tla na različitim dubinama koji će se kasnije iskoristiti za definiranje geotehničkih sredina.



*Slika 5. Fotodokumentacija jezgre bušotine GP-22 [3]*



Slika 6. Fotodokumentacija jezgre bušotine GP-23 [3]

Kada se u tlu prilikom bušenja pojave vodonosni slojevi, u njih se mogu ugraditi piezometri. Piezometri su uređaji koji omogućuju dugotrajno mjerenje razine podzemne vode odnosno pritiske u vodonosnim slojevima i njihove promjene u vremenu. Istražnim bušenjem je registrirana pojava vode, a nakon bušenja je izmjerena razina podzemne vode koja je iščitana iz sondažnog profila istražne bušotine GP-22 i GP-23 kao što je prikazano na tablici 1. [1]

Tablica 1. Pojava i razina podzemne vode

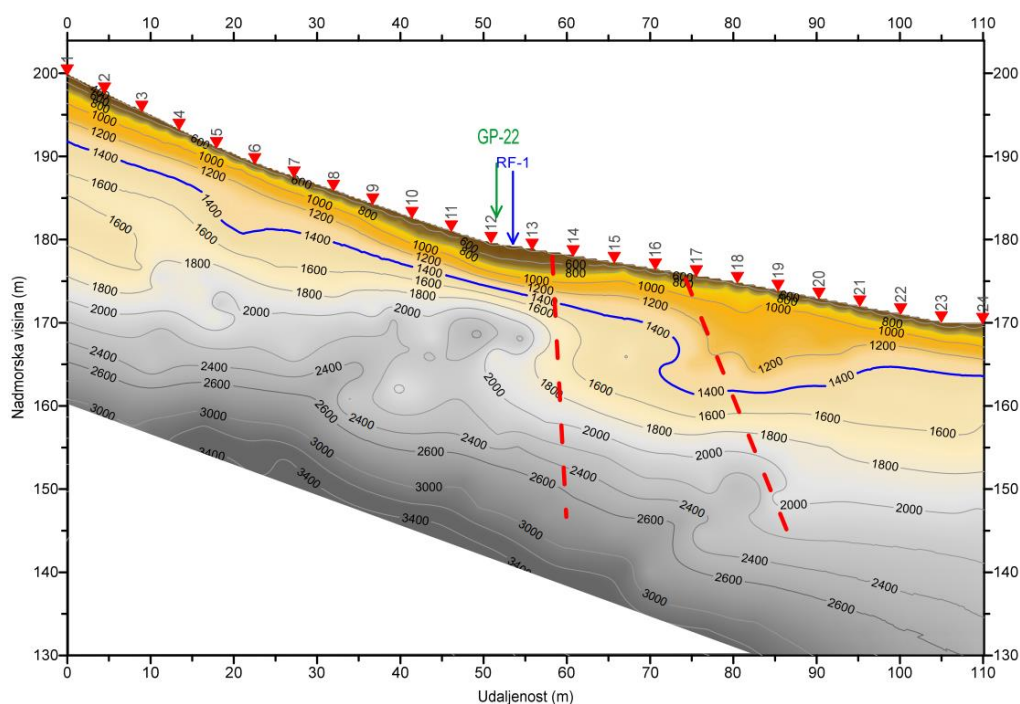
BUŠOTINA	PPV (m/m n.v.)	RPV (m/m n.v.)
GP-22	5,5/171,5	4,7/172,3
GP-23	2,0/162,2	1,8/162,6

## 2.2 Geofizička istraživanja

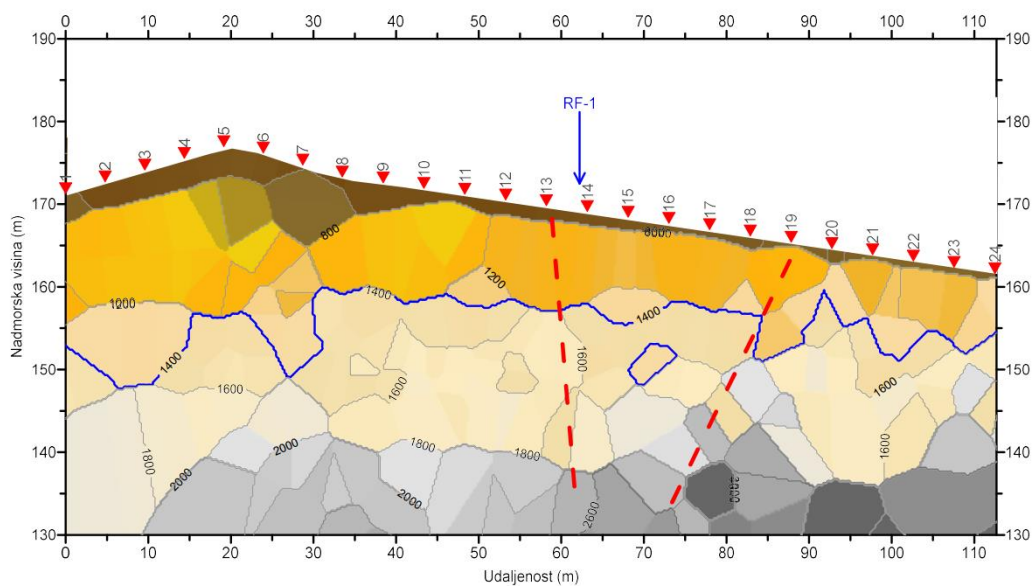
Prikupljeni podaci terenskih istražnih geofizičko-seizmičkih radova obrađeni su prema Delta t-v metodi, a za prikaz rezultata korištena je Nearest neighbour metoda interpolacije, te su rezultati obrade prikazani u obliku dubinskih seizmičkih presjeka kao što je prikazano na slikama 7 i 8. Slika 9 podrobnije opisuje podjelu tla i stijena u korištenoj Nearest neighbour metodi. Na interpoliranim 2D profilima prikazana je promjena brzine P-vala po dubini te sukladno vrijednostima brzine P-vala u tablici 2 prikazana je klasifikacija tla i stjenovite mase.

Tablica 2. Klasifikacija tla i stjenovite mase ovisno o brzini P-valova

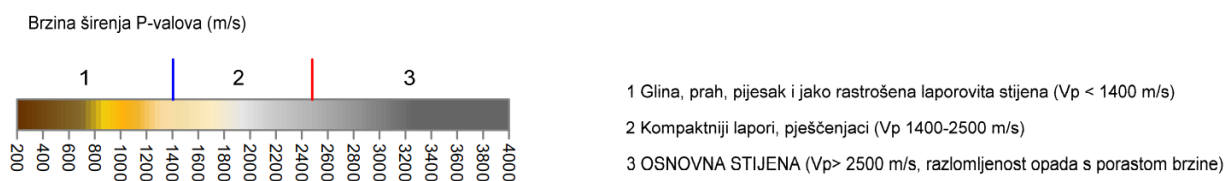
BRZINA ŠIRENJA UZDUŽNOG P-VALA (m/s)	VRSTA I STANJE STIJENE
$V_P < 500$	<i>Nasip</i>
$500 < V_P < 700$	<i>Pijesak, šljunak i glina</i>
$V_P < 1.400$	<i>Glina, prah, pijesak, jako rastrošena laporovita stijena</i>
$1.400 < V_P < 2.500$	<i>Kompaktniji lapori, pješčenjaci</i>
$V_p < 2.500$	<i>Osnovna stijena lapori, pješčenjaci</i>



Slika 7. Dubinski seizmički presjek profila RF-2 (ulaz u tune) [3]



Slika 8. Dubinski seizmički presjek profila RF-4 (izlaz iz tunela) [3]



Slika 9. Klasifikacija tla i stijenovite mase ovisno o brzini P-valova (Nearest neighbour interpolacija) [3]

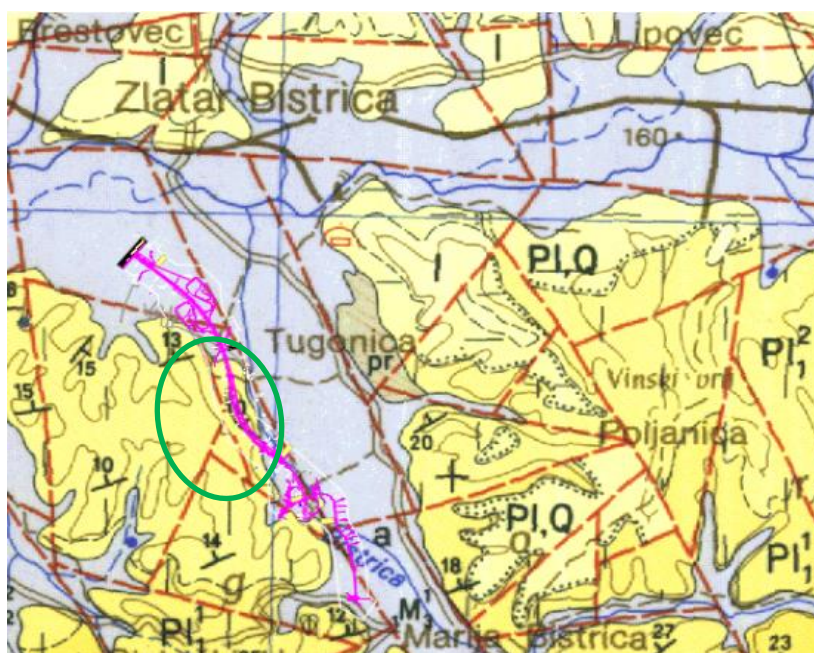
### 3. GEOLOŠKE, INŽENJERSKOGEOLOŠKE I HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE TERENA

#### 3.1 Inženjerskogeološke karakteristike terena







Geološka prospekcija terena na predmetnoj lokaciji buduće izgradnje tunela omogućila je uvid u sastav donjeg ustroja koji prolazi kroz morfološki prirodno uzdignuti teren. Izgrađen je od naslaga donjeg pontu koje se sastoje od pješčenjaka, lapora, prašinstog pijeska, praha i gline.

Naslage donjeg pontu taložene su kontinuirano i paralelno s gornjim pontom, a karakteriziraju ih žuta i plavkasta boja, poluslojna struktura i visok postotak  $\text{CaCO}_3$ . Gornji dijelovi donjeg pontu sastoje se od tankih slojeva praškasto žutog pijeska, kao i dobro uslojenih pjeskovitih lapora i slabo vezanih siltova s međuslojevima pijeska i pješčenjaka.

Boja ovih sedimenata je žuto-siva, siva i smeđa, kao što je prikazano na slikama 5 i 6 koje prikazuju uzorke iz bušotine. Padine terena formirane su od deluvijalnih naslaga nastalih raspadanjem temeljne stijene donjeg pontu, kao i djelovanjem gravitacije. Ove informacije su izvedene iz prethodno provedenih geotehničkih istražnih radova i osnovne geološke karte prikazane na slici 10. [3]



Slika 10. Izvadak iz Osnovne Geološke karte Republike Hrvatske [3]

	Aluvij rijeka i potoka: siltovi, pijesci, šljunci		Les: glinovito-pjeskoviti siltovi		Pijesci, podređeno pješčenjaci, lapori i ugljen (g. pont)
	Proluvij: blokovi stijena, pijesci		Šljunci i pijesci		Lapori, podređeno pijesci, pješčenjaci (d. pont)

Slika 11. Izvadak iz tumača za Osnovnu Geološku kartu Republike Hrvatske [3]

Oviso o inženjerskogeološkim karakteristikama na dubini istraživanja u strukturi terena na području izgradnje tunela i prirodno povišenom terenu identificirana su dva inženjerskogeološka člana. Karakteristike ovih elemenata opisane su u tablicama 3 i 4. Ove karakteristike daju vrijedne informacije o sastavu i strukturi terena, što može pomoći u donošenju odluka o projektiranju i izgradnji tunela.

### Prvi IG član

Prvi inženjerskogeološki član oznaka SM, SC, CL, CH, CL/ML, ML, ML/MI i MH uočen je u bušotinama GP-22 i GP-23. Prostire se od površine tla do dubina od 1,5 m do 5,1 m, a najveće debljine deluvijalnih naslaga uočene su u zoni izlaznog portala tunela. Sastoji se od deluvijalnih naslaga, koje nastaju raspadanjem stijene donjeg pontona i gravitacijskim transportom niz padinu.

U tablici 3 prikazana su svojstva materijala koji čine prvi IG član.

Tablica 3. Svojstva materijala prvog IG člana

MATERIJAL	KONZISTENCIJA	PLASTIČNOST	BOJA
<b>Praškasti pijesak</b>	<i>Vrlo rastresita do rastresita</i>	<i>Niska</i>	<i>Smeđa-siva</i>
<b>Praškasti prah i glina</b>	<i>Meka do srednje</i>	<i>Niska do visoka</i>	<i>Smeđa do siva</i>

### Drugi IG član

Drugi IG član je sloj naslaga koji čini temeljnu stijenu gornjopontske starosti. Uočen je u svim bušotinama u podlozi mlađih kvartalnih naslaga aluvijalnog ili deluvijalnog tipa. Iz litološke perspektive mogu se razlikovati dvije vrste materijala opisane u tablici 4.

Tablica 4. Svojstva materijala drugog IG člana

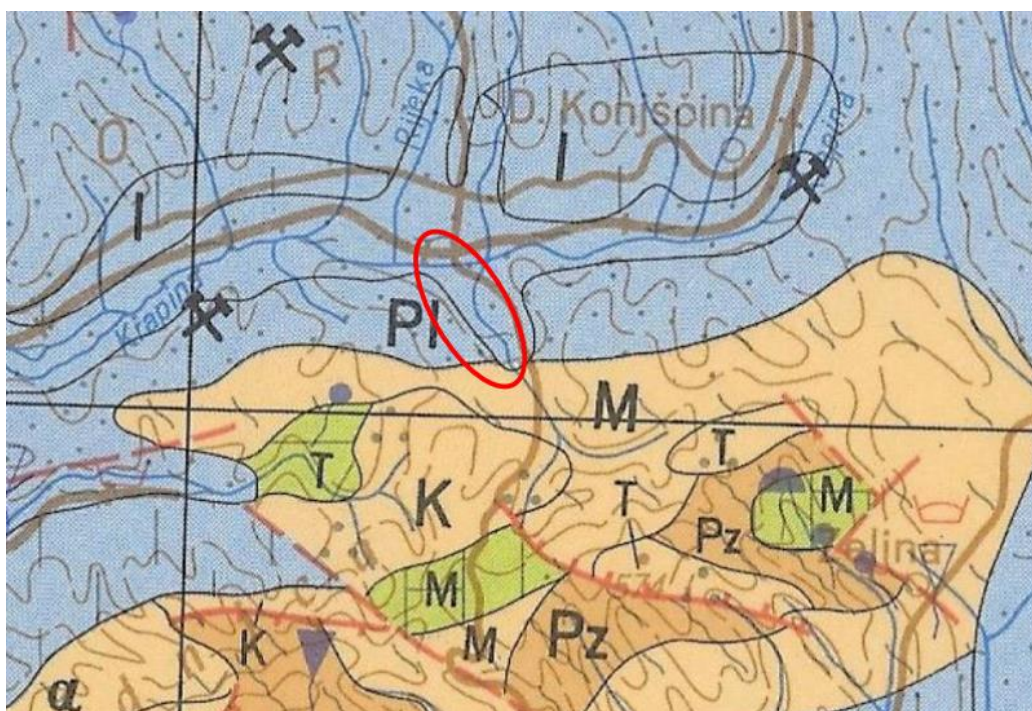
TIP	MATERIJAL	KONZISTENCIJA	PLASTIČNOST	BOJA
<b>A</b>	<i>Praškasti pijesak i prah, povremeno glina s pijeskom (SM, ML, MI, MH, CL)</i>	<i>Jako zbijeno</i>	<i>Niska do srednja, ponekad visoka</i>	<i>Uglavnom siva, povremeno sivozelena</i>
<b>B</b>	<i>Gline i prah (ML, MI, MH, CH)</i>	<i>Čvrsto ili polučvrsto</i>	<i>Od niske prema visokoj</i>	<i>Siva</i>



### 3.2 Hidrogeološke karakteristike terena

Hidrogeološki uvjeti područja kroz koje prolazi trasa tunela važan su faktor pri projektiranju i izgradnji tunela. Prema hidrogeološkoj karti prikazanoj na slici 12. Područje karakteriziraju pretežno slabo do srednje propusne naslage, a prisutne su i djelomično slabo propusne naslage. Ove naslage sastoje se od gline, pjeskovite ilovače i prašnjavog šljunka i pijeska, te mogu imati značajne implikacije na stabilnost i cjelovitost tunela. Slabo propusni mediji kao što su gline i pjeskovite ilovače mogu predstavljati izazov za protok podzemne vode kroz tunel, dok slabo do srednje propusni sedimenti kao što su prašnjava šljunka i pijesak mogu utjecati na stabilnost zidova i krova tunela. Ovi čimbenici moraju se uzeti u obzir pri projektiranju i izgradnji tunela kako bi se osigurala njegova stabilnost i sigurnost.

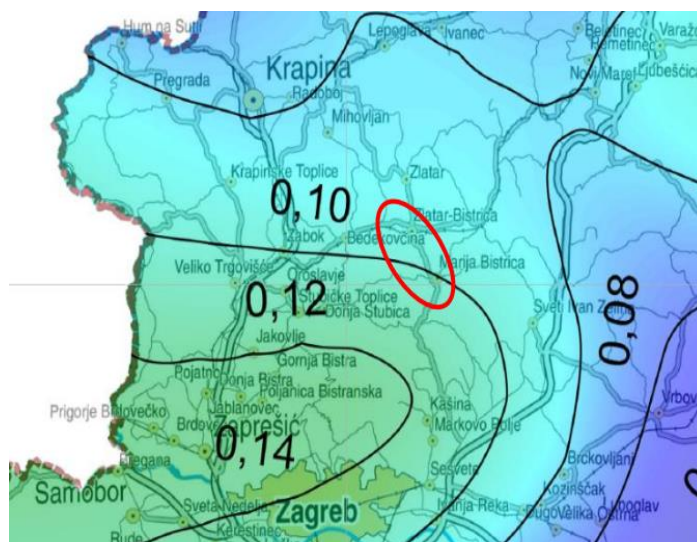
Teren na izlaznom portalu tunela Podgrađe najvećim je dijelom sastavljen od naplavina recentnih tokova Bistrice i Krapine. Ovaj aluvij nalazi se u gornjem dijelu terena i sastoji se od gline i prašine s visokim postotkom pijeska i muljevito pijeska. Ovi materijali većinom se sastoje od slabo vezanih pliocenskih i pleistocenskih sedimenata koji su ponovno taloženi u tom području. U donjem dijelu terena aluvijalni sedimenti sastoje se uglavnom od praškastih šljunka i pijeska, koji su sitni do srednje zrnati i slabo sortirani. Ovi sedimenti nastali su trošenjem mezozojskih i tercijarnih naslaga i ponovnim taloženjem pliokvartarnih materijala. Debljina nanosa na ovom području varira između 8 i 11 metara. [3]



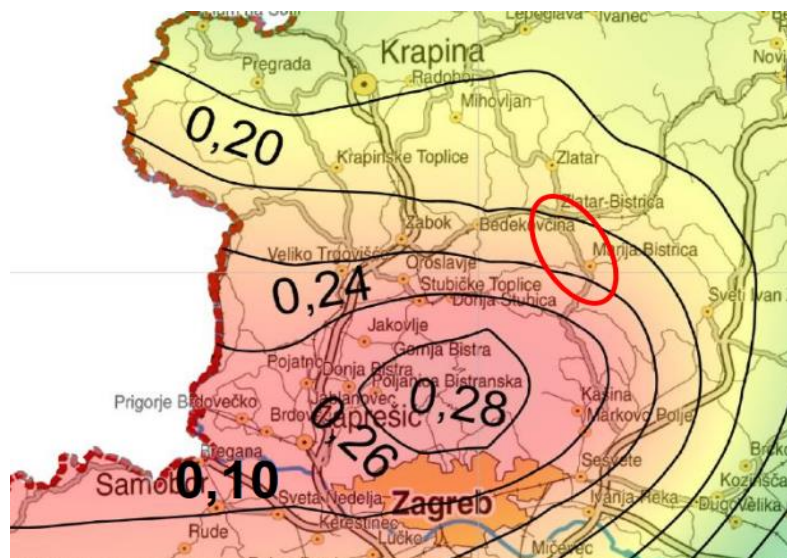
Slika 12. Isječak iz hidrogeološke karte [3]

### 3.3 Seizmičke karakteristike terena

Korišteni podaci dobiveni su iz seizmoloških karata, pomoću kojih je procijenjen maksimalni intenzitet potresa na ljestvici MSK-64 za različita povratna razdoblja od 50, 100, 200, 500 i 1000 godina. Na slikama 13 i 14 prikazana su potresom izazvana horizontalna vršna ubrzanja ( $a_{gR}$ ) temeljnog tla tipa A, izražena u jedinicama gravitacijskog ubrzanja  $g$ , za povratna razdoblja od 95 odnosno 475 godina. Slika 14 prikazuje  $a_{gR}$  vrijednost od 0,11  $g$  za povratni period od 95 godina, a slika 15 prikazuje vrijednost  $a_{gR}$  od 0,22  $g$  za povratni period od 475 godina. [3]



Slika 13. Isječak iz Karte potresnih područja za povratni period od 95 godina [11]



Slika 14. Isječak iz Karte potresnih područja za povratni period od 475 godina [11]

#### 4. SASTAV I KARAKTERISTIKE TEMELJNOG TLA

##### 4.1 Općenito

Provedena geomehanička istraživanja dala su vrijedne uvide u litološku strukturu, slojevitost i fizikalno-mehanička svojstva tla na istraživanim lokacijama. Na temelju njihovih geomehaničkih karakteristika identificirana su ukupno tri geotehničke sredine u osnovnoj strukturi terena: geotehnička sredina 1 i geotehnička sredina 3 kako je prikazano u tablici 5 skupa s nekim osnovnim karakteristikama .

Tablica 5. Svojstva geotehničkih sredina

GEOTEHNIČKA SREDINA	DUBINA (m)	MATERIJA (% sastava)	PLASTIČNOST (T)	KONZISTENCIJA (A)	BOJA
<b>Geotehnička sredina 1</b>	0-7	<i>Glina i mulj (CL, CI, CH, ML, MI, MH) Pijesak i mulj (SM)</i>	<i>Niska do visoka (low to high)</i>	<i>Zrnato do srednje</i>	<i>Smeđa (gornji dijelovi)  Siva (dublji dijelovi)</i>
<b>Geotehnička sredina 3</b>	7-9	<i>Muljeviti pijesak (SM), muljeviti (ML, MI, MH, CL)</i>	<i>Niska do srednja (low to intermediate)</i>	<i>Polučvrsto do čvrsto</i>	<i>Siva do sivo-zelena</i>

Geotehnička sredina 1 prisutna je na svim bušotinama i proteže se od površine do dubina u rasponu od 1,5 do 11,8 metara. Materijali koji čine ovu geotehničku sredinu sastoje se uglavnom od gline i mulja (CL, CI, CH, ML, MI, MH), koji sadrže od 0 do 40% pijeska i mulja (SM). Ove gline i siltovi pokazuju nisku do visoku plastičnost i imaju zrnatu do srednju konzistenciju, pri čemu je kruta konzistencija rjeđa. Muljeviti pijesak je vrlo rastresit do rastresit, sitnozrnate teksture, a rjeđe srednje do krupnozrnate. Sadrže do 48% mulja i gline, a obično sadrže <10% finog šljunka. Boje su smeđe i sive. Rezultati provedenih laboratorijskih ispitivanja prikazani su na slici 15.

Geotehnička sredina 3 prisutna je kao podloga za mlađe aluvijalne i deluvijalne naslage, te rezultati laboratorijskih ispitivanja su prikazani na slici 16. Nalazi se duž cijele trase autoceste. U zoni tunela "Podgrađe" geotehnička sredina 3 proteže se ispod geotehničke sredine 1 do najveće dubine istraživanja, osim u zoni bušotina GP-22, gdje leži na geotehničkoj sredini 4 i proteže se do dubine od 9,0 odnosno 13,0 metara. Nakon tunela "Podgrađe" geotehnička sredina 3 proteže se ispod geotehničke sredine 1 do najveće dubine istraživanja. Materijali koji čine ovu geotehničku sredinu predstavljeni su silt pijescima (SM) i siltovima (rjeđe glinama) s pijeskom (ML, MI, MH, CL). Muljeviti pijesak je sitnozrnat i vrlo kompaktan, a srednje kompaktna do kompaktna konzistencija je rjeđa. Uglavnom su sive boje, a rjeđe su sivozelene boje. Sadrže 25 do 45% mulja i gline, a mogu sadržavati i vapnene konkrecije. Siltovi i gline s pijeskom pokazuju nisku do

srednju plastičnost, dok je visoka plastičnost rijetka. Imaju polučvrstu do čvrstu konzistenciju, s tim da je čvrsta konzistencija rjeđa u gornjim dijelovima. Uglavnom su sive boje, a rjeđe su smeđe. Mogu sadržavati 15 do 40% pijeska. [3]

ISPITIVANJE		VRIJEDNOST
prirodna vlaga $w_0$ (%)		23,8-60,9
granica tečenja $w_L$ (%)		33-110
granica plastičnosti $w_p$ (%)		25-45
indeks plastičnosti $I_p$ (%)		9-65
indeks konzistencije $I_c$ (1)		0,76-1,12
zapreminska težina $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )		15,7-18,8
zapreminska težina suha $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )		9,8-15,2
specifična težina $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )		26,5
granulacija	udio gline <b>C</b> (%)	10,2-22,18
	udio praha <b>M</b> (%)	43,1-62,7
	udio pijeska <b>S</b> (%)	18,5-43,0
ISPITIVANJE		VRIJEDNOST
udio šljunka <b>G</b> (%)		0,0-0,35
jednoosna čvrstoća $q_u$ (kPa)		43-72
nedrenirana posmična čvrstoća ( $q_u/2$ ), $c_u$ (kPa)		21-36
kohezija (direktno smicanje) $c$ (kPa)		2,4-6,2
kut unutarnjeg trenja (direktno smicanje) $\phi$ (°)		24,1-29,3
edometerski modul stišljivosti, $E_{oED}$ (MPa)	25 (kPa)	2,64
	50 (kPa)	4,45
	100 (kPa)	4,29
	200 (kPa)	5,17
	400 (kPa)	8,01

Slika 15. Rezultati laboratorijskih ispitivanja koji grade geotehničku sredinu 1 [11]

ISPITIVANJE		VRIJEDNOST
prirodna vlaga $w_0$ (%)		26,8-28,4
granica tečenja $w_L$ (%)		42,7-61,0
granica plastičnosti $w_P$ (%)		25,8-39,2
indeks plastičnosti $I_P$ (%)		12,0-26,0
indeks konzistencije $I_c$ (1)		1,31-1,42
zapreminska težina $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )		19,6
zapreminska težina suha $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )		15,3-15,5
specifična težina $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )		27,2
granulacija	udio gline <b>C</b> (%)	4,9-14,7
	udio praha <b>M</b> (%)	30,9-82,4
	udio pijeska <b>S</b> (%)	10,1-61,8
	udio šljunka <b>G</b> (%)	0,0
jednoosna čvrstoća $q_u$ (kPa)		59-215
nedrenirana posmična čvrstoća ( $q_u/2$ ), $c_u$ (kPa)		30-108
kohezija (direktno smicanje) $c$ (kPa)		8,1-19,4
kut unutarnjeg trenja (direktno smicanje) $\phi$ (°)		21,7-34,4
edometerski modul stišljivosti, $E_{oed}$ [MPa]	25 (kPa)	5,12
	50 (kPa)	6,03
	100 (kPa)	6,78
	200 (kPa)	9,70
	400 (kPa)	15,92

Slika 16. Rezultati laboratorijskih ispitivanja koji grade geotehničku sredinu 3 [11]

U tablici 6 prikazane vrijednosti zapreminske suhe težine  $\gamma_d$ , zasićene jedinične težine  $\gamma_{sat}$ , te parametri kohezije  $c_k$  i kut unutarnjeg trenja  $\phi_k$  za obje geotehničke sredine.

Tablica 6. Svojstva geotehničkih sredina

GEOTEHNIČKA SREDINA	VRIJEDNOSTI PARAMETARA	
<b>GS1</b>	$\gamma_d = 15.2 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 19.2 \text{ kN/m}^3$	$c_k = 2.4 \text{ kPa}$ $\phi_k = 29.3^\circ$
<b>GS3</b>	$\gamma_d = 15.5 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 19.7 \text{ kN/m}^3$	$c_k = 8.1 \text{ kPa}$ $\phi_k = 34.4^\circ$

Zbog nedostatka podataka saturirana jedinična težina određena je prema formuli (1) koja je u korelaciji s zapreminskom suhom težinom i prirodnom vlažnosti. [18]

$$\gamma_{sat} = \gamma_d * (1 + w) \quad (1)$$

Vrijednost saturirane jedinične težine za geotehničku sredinu 1

$$\gamma_{sat} = 15.2 * \left(1 + \frac{23.8}{100}\right) = 19.2 \text{ kN/m}^3$$

Vrijednost saturirane jedinične težine za geotehničku sredinu 3

$$\gamma_{sat} = 15.5 * \left(1 + \frac{26.8}{100}\right) = 19.7 \text{ kN/m}^3$$

Gdje je:

- $\gamma_{sat}$  zasičena jednična težina
- $\gamma_d$  zapreminska suha težina
- $w$  prirodna vlaga

## 5. METODE ANALIZE STABILNOSTI KOSINA

### 5.1 Općenito o metodama analize stabilnosti kosina

Analiza stabilnosti padina kritična je komponenta geotehničkog inženjerstva, jer se koristi za procjenu stabilnosti prirodnih i umjetnih padina. Ova vrsta analize važna je u projektiranju i izgradnji raznih vrsta građevina, uključujući ceste, mostove i zgrade. Postoji nekoliko različitih metoda koje se mogu koristiti za analizu stabilnosti padina, od kojih svaka ima svoje prednosti i nedostatke.

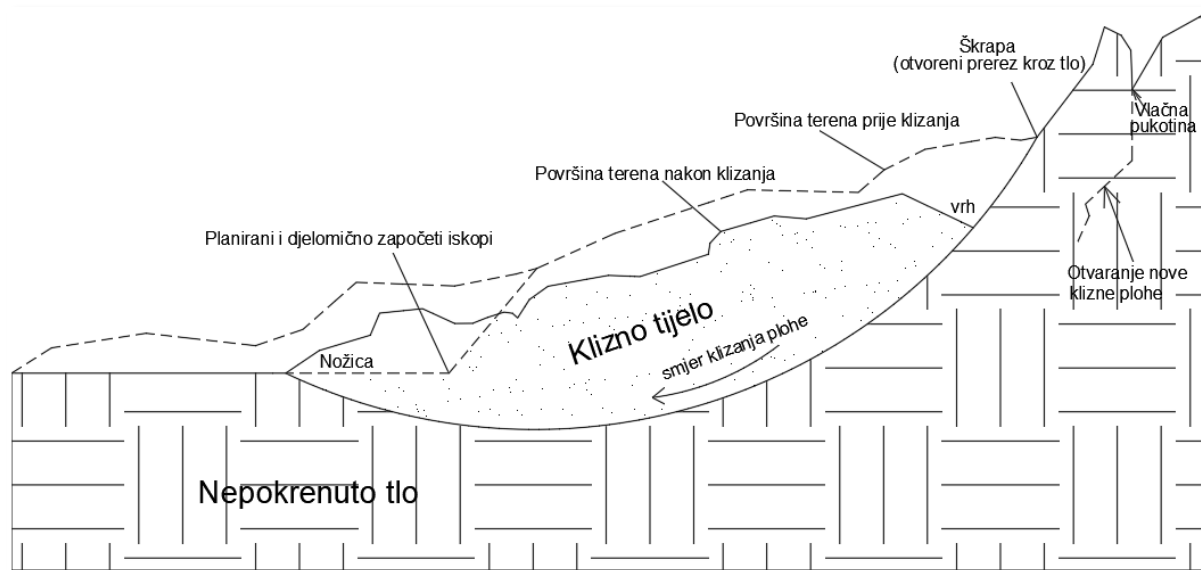
Najčešće korištena metoda za analizu stabilnosti kosina je metoda granične ravnoteže. Ova metoda uključuje pretpostavku da je tlo ili stijenska masa na kosini u stanju ravnoteže, a zatim izračunavanje sila koje djeluju na kosinu kako bi se utvrdilo je li stabilna. Metoda granične ravnoteže može se koristiti i za homogene i za nehomogene padine, a relativno je jednostavna za provedbu.

Još jedna često korištena metoda za analizu stabilnosti kosina je metoda konačnih elemenata. Ova metoda uključuje dijeljenje nagiba u niz međusobno povezanih elemenata, a zatim korištenje matematičkih jednadžbi za modeliranje ponašanja svakog elementa. Metoda konačnih elemenata složenija je od metode granične ravnoteže, ali može dati detaljnije i točnije rezultate.

Općenito, izbor metode za analizu stabilnosti padine ovisit će o specifičnim karakteristikama padine i vrsti građevine koja se na njoj gradi. Niti jedna metoda nije univerzalno primjenjiva, a najbolji pristup često uključuje korištenje više metoda u kombinaciji kako bi se pružila sveobuhvatna analiza stabilnosti padine. [12]

### 5.2 Elementi i vrste nestabilnosti na kosini

Iskustvo i zapažanja govore da se nestabilnost padina u većini slučajeva manifestira klizanjem mase tla, koju nazivamo klizno tijelo, na ravnoj ili zakrivljenoj kliznoj podlozi ilustrirano na slici 17. Ujedno u donjem dijelu kliznog tijela, takozvanom podnožju, tlo se zbija guranjem, dok se u gornjem dijelu, na vrhu, to popušta. Zbog vlačnih naprezanja u tjemenu i zanemarive vlačne čvrstoće tla, obično posebno kod sitnozrnatih tala otvara se vlačna pukotina koja zbog smjera gibanja se može otkriti kao otvoreni prerez kroz tlo. Pojava takve pukotine je jasan znak nestabilnosti padine već u ranoj fazi svog nastanka. Pojava vlačne pukotine ukazuje na to da se ona može nastaviti u novu kliznu plohu. Područje samog kliznog tijela kao i neposrednog okruženja oko njega naziva se klizištem. [6]

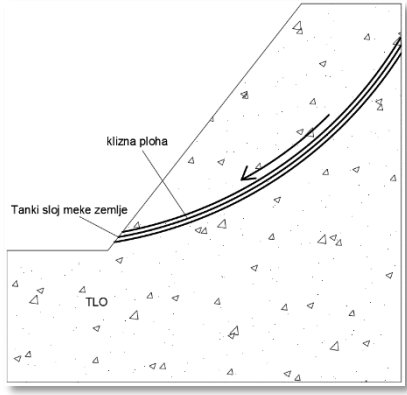
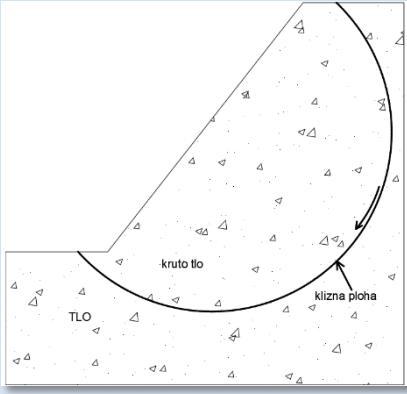
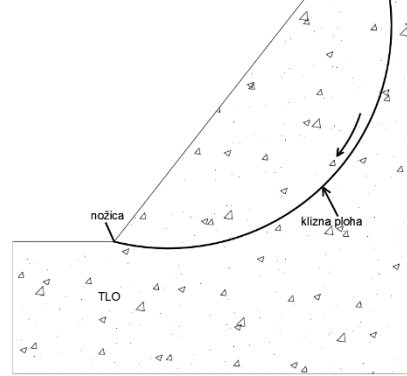
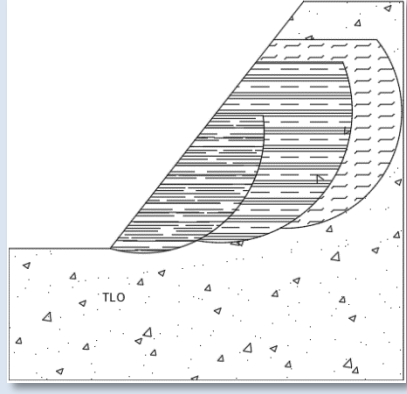


Slika 17. Elementi nestabilnosti na kosini [6]

Postoji nekoliko čimbenika koji mogu uzrokovati takvu nestabilnost. Prekomjerna strmina padine, što može uzrokovati da tlo ili stijena koja čini padinu postane nestabilna i podložna rušenju. Prisutnost vode, koja može povećati težinu tla ili stijene koja čini kosinu i uzrokovati da ona postane nestabilna. Potresi, koji mogu uzrokovati podrhtavanje tla i prouzročiti lomljenje padina. Ljudska aktivnost, kao što je gradnja ili iskopavanje, može oslabiti tlo ili stijenu koja čini kosinu i prouzročiti njeno urušavanje. Vegetacija, koja može dodati težinu tlu ili stijenama koje čine kosinu i uzrokovati njihovo propadanje. U tablici 7 grafički su prikazani neki od primjera klizanja u tlu.



Tablica 7. Primjeri različitih oblika klizanja kosina u tlu

<p><b>Translacijsko klizanje</b></p>	 <p>Diagram illustrating translational sliding. A failure surface is shown as a nearly straight line. A thin layer of soft soil, labeled "TANKI SLOJ MEKE ZEMLJE", is located directly beneath the failure surface. The failure surface is labeled "KLIZNA PLOHA". The ground surface is labeled "TLO". Arrows indicate the direction of sliding.</p>
<p><b>Duboko i plitko rotacijsko klizanje</b></p>	 <p>Diagram illustrating deep and shallow rotational sliding. A curved failure surface is shown. The failure surface is labeled "KLIZNA PLOHA". The rigid body above the failure surface is labeled "KRUTO TLO". The ground surface is labeled "TLO". Arrows indicate the direction of sliding.</p>
<p><b>Podnožično rotacijsko klizanje</b></p>	 <p>Diagram illustrating toe rotational sliding. A curved failure surface is shown. The failure surface is labeled "KLIZNA PLOHA". The toe of the failure surface is labeled "NOŽICA". The ground surface is labeled "TLO". Arrows indicate the direction of sliding.</p>
<p><b>Složeno klizanje</b></p>	 <p>Diagram illustrating complex sliding. A rigid body is shown above a failure surface. The failure surface is labeled "KLIZNA PLOHA". The ground surface is labeled "TLO". Arrows indicate the direction of sliding.</p>

### 5.3 Načela granične ravnoteže

Uobičajene metode analize stabilnosti kosina mogu se podijeliti u dvije skupine, a to su kinematička analiza i analiza granične ravnoteže.

Većina računalnih programa za analizu stabilnosti kosina temelji se na konceptu granične ravnoteže za dvodimenzionalni ili trodimenzionalni model. Dvodimenzionalni presjeci se analiziraju uz pretpostavku ravnih uvjeta deformacije. Analize stabilnosti dvodimenzionalnih geometrija kosina korištenjem jednostavnih analitičkih pristupa mogu pružiti važne uvide u dizajn i procjenu rizika kosina.

Metode granične ravnoteže istražuju ravnotežu mase tla koja ima tendenciju da sklizne prema dolje pod utjecajem gravitacije. Translatorsko ili rotacijsko kretanje razmatra se na pretpostavljenoj ili poznatoj potencijalnoj površini klizanja ispod tla ili stijenske mase. Sve te metode temelje se na usporedbi sila, momenata ili naprezanja koja se odupiru gibanju mase s onima koji mogu uzrokovati nestabilno gibanje. Metode granične ravnoteže uključuju izračunavanje faktora sigurnosti nagiba dijeljenjem zbroja sila koje djeluju na stabilizaciju nagiba sa zbrojem sila koje djeluju na destabiliziranje nagiba. Rezultirajući faktor sigurnosne vrijednosti tada se može koristiti za određivanje vjerojatnosti sloma nagiba. Ako je vrijednost koeficijenta sigurnosti manja od 1.0, kosina je nestabilna. [6]

Sve metode granične ravnoteže koriste Mohr-Columbov izraz za određivanje čvrstoće smicanja  $\tau_f$  duž klizne plohe. Posmično naprezanje pri kojem se tlo lomi pri smicanju definira se kao posmična čvrstoća tla. Stanje granične ravnoteže postoji kada se posmični napon  $\tau$  izražava kao dio posmične čvrstoće. U trenutku sloma, posmična čvrstoća je u potpunosti mobilizirana duž površine sloma kada su dostignuti uvjeti kritičnog stanja (2). Posmična čvrstoća obično se izražava Mohr-Columbovom linearnom vezom, odnosno gdje su  $\tau$  i  $\tau_f$  definirani sljedećim izrazom:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \theta' \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\tau_f}{F} = \frac{c' + \sigma' \tan \theta'}{F} \quad \rightarrow \quad F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (3)$$

Gdje je:

- $\tau_f$  posmična čvrstoća
- $\sigma'$  efektivno naprezanje
- $c'$  kohezija
- $\theta'$  kut trenja u terminima efektivnog naprezanja
- $F$  faktor sigurnosti

Dostupna posmična čvrstoća ovisi o vrsti tla i efektivnom normalnom naprezanju, dok mobilizirano posmično naprezanje ovisi o vanjskim silama koje djeluju na masu tla. Ovo definira faktor sigurnosti kao omjer  $\tau_f$  i  $\tau$  (3) u analizi granične ravnoteže kako je definirano u prethodnoj jednadžbi. Iz ove definicije faktora sigurnosti slijedi da na kliznoj plohi nije došlo do sloma tla, ako je  $F > 1$ , dok slom nastupa za slučaj kada je  $F < 1$ . [6]

## 5.4 Pojednostavljena Bishopova metoda

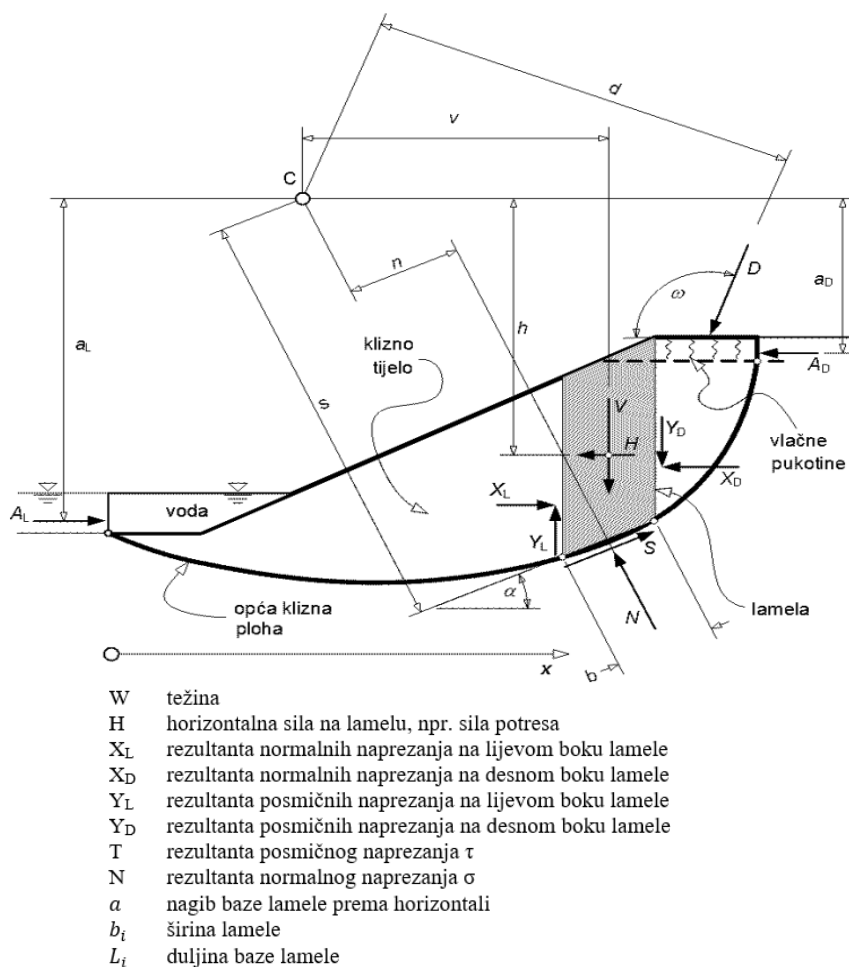
Bishopova metoda je često korištena metoda za analizu stabilnosti padina u mehanici tla. Temelji se na konceptu efektivnog naprezanja, što je ukupno naprezanje ( $\sigma$ ) na česticu tla umanjeno za tlak vode u porama ( $u$ ). Metoda uključuje izračunavanje faktora sigurnosti nagiba dijeljenjem zbroja sila koje djeluju na stabilizaciju nagiba sa zbrojem sila koje djeluju na destabiliziranje nagiba, slika 18. Rezultirajući faktor sigurnosne vrijednosti tada se može koristiti za određivanje vjerojatnosti sloma nagiba. Ova metoda ima široku primjenu u području geotehničkog inženjerstva za ocjenu stabilnosti kosina.

Metoda se temelji na nekoliko pretpostavki:

Podrazumijeva se slom tla duž klizne plohe kružnoga oblika, te se ne može primijeniti za dobivanje faktora sigurnosti plohe drugoga oblika.

Pretpostavlja se da su sile između lamela u  $y$  (vertikalnome) smjeru jednake 0, dok u  $X$  (horizontalnome) smjeru, sile između lamela postoje.

Ukupna normalna sila djeluje u središtu svake lamele, te se dobiva zbrajanjem sila koje djeluju u vertikalnome smjeru.



Slika 18. Ravnoteža sila u Bishopovoj metodi [6]

Za računanje faktora sigurnosti koristi se iteracijski postupak na način da se početni faktor sigurnosti proizvoljno zada,  $F_i$  (najčešće se kao početna vrijednost postavlja 1), te se pomoću njega dobiva izračunati faktor sigurnosti,  $F_{i-1}$ . Postupak se ponavlja sve dok razlika  $F_i - F_{i-1}$  ne postane dovoljno mala (maksimalna razlika definira se na početku procesa iteracije), gdje i označava redni broj iteracije.

Rezultanta normalnog naprezanja je jednaka:

$$P = \frac{W - \frac{1}{F}(c' l \sin \alpha - ul \tan \theta' \sin \alpha)}{m_a} \quad (4)$$

Pri čemu je:

$$m_a = \cos \alpha + \frac{(\sin \alpha \tan \theta')}{F} \quad (5)$$

Faktor sigurnosti dobiven je na način:

$$F = \frac{\sum \left[ \frac{c' l \cos \alpha + (W - ul \cos \alpha \tan \theta')}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \theta')/F} \right]}{\sum W \sin \alpha} \quad (6)$$

Ili

$$F = \frac{\sum \left[ \frac{c' b + (W + P \cos \beta - \mu b) \tan \theta'}{m_a} \right]}{\sum W \sin \alpha - \frac{\sum M_p}{R}} \quad (7)$$

Gdje je:

- $c'$            efektivna kohezija
- $\varphi'$            efektivne kut unutrašnjeg trenja
- $b$              širina lamele
- $W$             težina lamele
- $P$             vanjska sila vode na površinu kosine
- $\beta$             nagiv lamele
- $u$             porni tlak vode
- $M_p$          moment površinske vode
- $R$             radijus kružnog loma

Jedna od prednosti Bishopove metode je njezina jednostavnost i laka uporaba. Zahtijeva samo nekoliko osnovnih ulaznih parametara, kao što su kohezija i kut unutarnjeg trenja tla, i može se primijeniti na širok raspon geometrija padina. Još jedna prednost je njegoa fleksibilnost, jer se može lako modificirati kako bi se uzela u obzir složenija ponašanja tla i uvjeti nagiba.

Unatoč svojim prednostima, Bishopova metoda ipak ima neka ograničenja. Jedno ograničenje je to što se temelji na pretpostavci ravninske deformacije, koja možda nije važeća za određene vrste padina ili uvjete tla. Drugo ograničenje je to što ne uzima u obzir učinke anizotropije ili nehomogenosti tla, što može imati značajan utjecaj na stabilnost padine. [6]

## 6. PRORAČUN STABILNOSTI KOSINA

### 6.1 Projektiranje prema EN 1997-1

EN 1997 uvodi klasifikaciju od tri geotehničke kategorije kako bi se racionalizirao opseg istražnih radova i složenost postupka dokazivanja stabilnosti i uporabivosti za građevine, bitno različitih stupnjeva složenosti i različitih stupnjeva izloženosti visokom riziku.

*Geotehnička kategorija 1:* Odnosi se na najjednostavnije konstrukcije (npr. temelji jednokatnica, niski zidovi, nasipi i sl.) gdje istražni radovi mogu obuhvaćati najjednostavnije radnje (pregled terena, primjena iskustva sa susjednih objekata i sl.), a dokazi se stabilnosti mogu zamijeniti usporedivim iskustvom.

*Geotehnička kategorija 2:* Obuhvaća rutinske geotehničke zahvate i čini pretežni sadržaj većine geotehničkih projekata.

*Geotehnička kategorija 3:* Čine vrlo složeni zahvati i zahvati velikog rizika (npr. temeljenje na mekom tlu, složene građevne jame u blizini postojećih objekata, klizišta, tuneli, visoke nasute brane, nuklearne elektrane i sl.), norma ne daje posebne upute, već traži rigoroznije kriterije i postupke istražnih radova, projektiranja, opažanja i nadziranja pod vodstvom geotehničkog specijalista s odgovarajućim (dokazanim) iskustvom, a normiranje prepušta potrebama.

Prema normi HRN EN 1997-1:2012/Na:2016 za svrhu analize korišten je proračunski pristup PP3. Proračunske vrijednosti materijala za analizu graničnog stanja ravnoteže izvode se iz karakterističnih vrijednosti uz primjenu parcijalnih koeficijenata koji su preuzeti iz sustava eurokodova kako je prikazano na slici 19.

Kombinacije skupina parcijalnih koeficijenata za proračunski pristup 3: A2+M2+R3, dok za seizmičku kombinaciju, svi parcijalni koeficijenti djelovanja iznose  $\gamma_{Fi(A2)} = 1$  . [4]

(1) Parcijalni faktori djelovanja ( $\gamma_F$ ) i učinka djelovanja ( $\gamma_E$ )						
Djelovanja		simbol	A1	A2		
trajna	nepovoljna	$\gamma_G$	1.35	1.0		
	povoljna	$\gamma_G$	1.0	1.0		
promjenjiva	nepovoljna	$\gamma_Q$	1.5	1.3		
	povoljna	$\gamma_Q$	0	0		
(2) Parcijalni faktori svojstva materijala (tlo, stijena) ( $\gamma_M$ )						
Svojstvo		simbol	M1	M2		
tangens efektivnog kuta trenja		$\gamma_{\varphi'}$	1.0	1.25		
efektivna kohezija		$\gamma_{c'}$	1.0	1.25		
nedrenirana i jednoosna čvrstoća		$\gamma_{cu}$ ili $\gamma_{qu}$	1.0	1.4		
težinska gustoća		$\gamma_\gamma$	1.0	1.0		
(3) Parcijalni faktori otpora ( $\gamma_R$ ):						
Otpornost <sup>†</sup>		simbol	R1	R2	R3	R4
<u>Plitki temelji</u>	nosivost	$R_v$	1.0	1.4	1.0	-
	klizanje	$R_h$	1.0	1.1	1.0	-
<u>Zabijeni piloti</u>	stopa	$\gamma_b$	1.0	1.1	1.0	1.3
	plašt (tlak)	$\gamma_s$	1.0	1.1	1.0	1.3
	stopa+plašt (tlak)	$\gamma_t$	1.0	1.1	1.0	1.3
	plašt (vlak)	$\gamma_{s;t}$	1.25	1.15	1.1	1.6
<u>Bušeni piloti</u>	stopa	$\gamma_b$	1.25	1.1	1.0	1.6
	plašt (tlak)	$\gamma_s$	1.0	1.1	1.0	1.3
	stopa+plašt (tlak)	$\gamma_t$	1.15	1.1	1.0	1.5
	plašt (vlak)	$\gamma_{s;t}$	1.25	1.15	1.1	1.6
<u>Prednapeta sidra</u>	privremena	$\gamma_{a;t}$	1.1	1.1	1.0	1.1
	trajna	$\gamma_{a;p}$	1.1	1.1	1.0	1.1
<u>Potporne konstrukcije</u>	nosivost	$\gamma_{R;v}$	1.0	1.4	1.0	-
	klizanje	$\gamma_{R;h}$	1.0	1.1	1.0	-
	otpor tla	$\gamma_{R;e}$	1.0	1.4	1.0	-
<u>Kosine i opća stabilnost</u>	otpor tla	$\gamma_{R;e}$	1.0	1.1	1.0	-

<sup>†</sup> EN 1997-1 još navodi posebne parcijalne faktore za uvrtnane pilote koji su ovdje izostavljeni

Slika 19. Parcijalni faktori po skupinama za granična stanja STR i GEO [13]

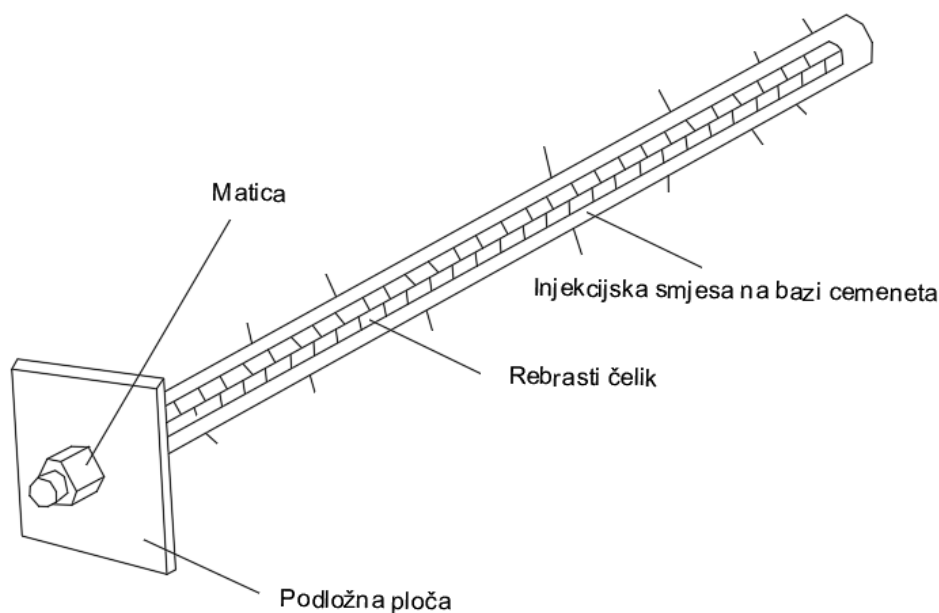
## 6.2 Stabilizacija kosine geotehničkim štapnim sidrima

Štapno sidro je dugačka čelična šipka s navojem koja se koristi za stabilizaciju padina za pojačavanje i učvršćivanje stijenskih masa, slika 20. Sastoji se od dva glavna dijela: čelične šipke i mehanizma za sidrenje.

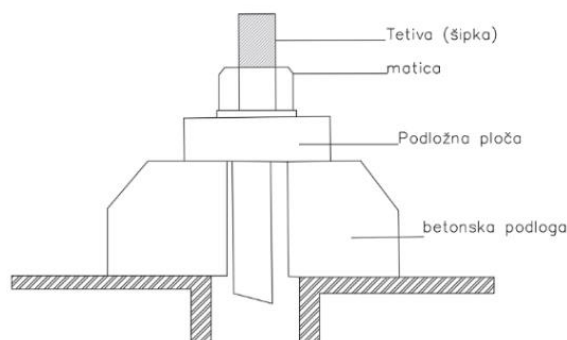
Čelična šipka je cilindrična komponenta visoke čvrstoće obično izrađena od čelika. Ima navojnu površinu po svojoj dužini, što omogućuje jednostavno umetanje u izbušenu rupu u stijenskoj masi. Šipka je dizajnirana da izdrži sile zatezanja i pruži stabilnost stijenskoj strukturi.

Mehanizam za sidrenje je dio sidra za stijenu koji ga pričvršćuje za stijenu ili okolno tlo. Obično se izrađuje od injekcijske smjese na bazi cementa ili smole koja se ubrizgava u izbušenu rupu oko šipke. Injekcijska smjesa na bazi cementa ili smola se stvrdne i stvara čvrstu vezu s okolnom stijenom, stvarajući snažnu vezu između sidra i stijenske mase.

Sidro se izvodi bušenjem rupe u tlu pod određenim kutom i dubinom. Rupa se zatim čisti kako bi se uklonili labavi ostaci, a klin se umeće u rupu. Jednom kada je na mjestu, materijal za sidrenje, kao što je injekcijska smjesa na bazi cementa ili smola, ubrizgava se u rupu kako bi se ispunile praznine i spojio klin za tlo ili stijenu. Ovaj proces ojačava stijensku masu, pružajući dodatnu stabilnost i sprječavajući potencijalno lomljenje padine. [16]



Slika 20. Osnovni elementi štapnog sidra [7]



Slika 21. Elementi glave (sidrenog bloka) sidra [7]

#### *SIDRIŠNA DIONICA* (sidrišna duljina, tijelo sidra)

Projektna duljina duž koje se sila preko ispune prenosi na okolno tlo ili stijenu (trenjem po plaštu ili proširenjem sidrišnog tijela). Najčešće se proizvodi injektiranjem cementne smjese pod pritiskom. Smjesa ujedno i štiti od korozije. Za trajna sidra čelična zatega se smješta u naboranu cijev (ovojnicu), pa se provodi dvostruko injektiranje.

#### *SLOBODNA DIONICA* (slobodna duljina, duljina zatege)

Duljina zatege između glave sidra i početka sidrišne dionice. Namjerno izolirana od okolnog tla i ostaje slobodna za produljenje pod opterećenjem. Kod trajnih sidara je potrebna zaštita od korozije (naknadno injektiranje). “Čavli” i većina krutih, pasivnih sidara nema izraženu ovu dionicu, nego cijelom duljinom tvore sidrišno tijelo.

#### *GLAVA SIDRA* (sidrište, kraj sidra)

Završni dio sidra (često vidljiv) koji prenosi vlačnu silu na površinu tla ili u konstrukciju, detalj elementa glave sidra prikazan je na slici 21. Pomoću jednostavnih mehaničkih uklještenja, glava učvršćuje sidro na konstruktivnu poduporu, ali i omogućuje uvođenje sile prednapinjanja. Zavisno o proizvođaču postoje razni tipovi glava. [17]



Postupak izvedbe geotehničkih sidra provodi se u sljedećim fazama:

### 1. Identifikacija potencijalnih ravnina sloma

Prvi korak u ugradnji štapnih sidara je identifikacija potencijalnih ravnina sloma unutar kosine. Potencijalna ravnina sloma je ravnina duž koje će se tlo ili stijenska masa najvjerojatnije srušiti ili skliznuti.

### 2. Bušenje rupa

Nakon što se identificira potencijalna ravnina sloma, rupe se buše u kosini pod blagim kutom, s gornjim krajem rupe smještenim iznad kosine, a donjim krajem ispod kosine. Kut pod kojim se buše rupe obično je između 45 i 75 stupnjeva, ovisno o uvjetima tla i geometriji padine. Bušenje se najčešće izvodi pomoću strojeva, jer su učinkoviti, konzistentni, sigurni i brzi.

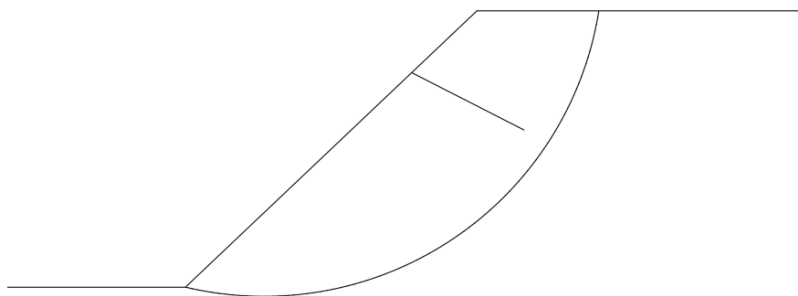
### 3. Ugradnja sidara

Sidra se zatim umetnu u rupe i pričvrste na mjestu pomoću sidrene ploče i fugirne mase. Sidra se obično postavljaju tako da sijeku potencijalnu ravninu sloma pod pravim kutom. Ovo je učinjeno kako bi se osiguralo da pružaju odgovarajuće pojačanje kosini sprječavajući klizanje tla ili stijenske mase duž potencijalne ravnine sloma.

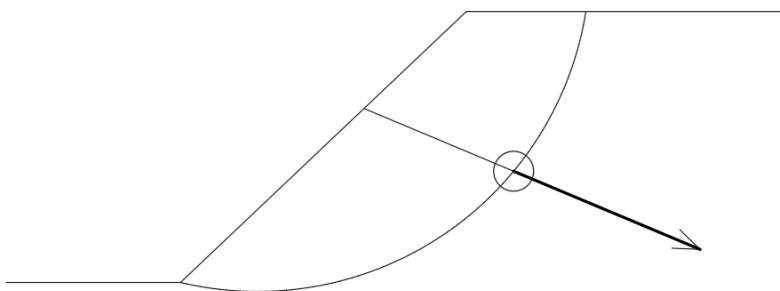
### 4. Zatezanje sidara i ispuna injekcijskom smjesom

Sidra se zatim zatežu kako bi se dodatno učvrstila kosina. Zatezanje se obično vrši pomoću mehaničkog ili hidrauličkog uređaja koji primjenjuje napetost na čavle i drži ih na mjestu. Nakon što su sidra zategnuta, rupa oko sidara se puni ispunom. Masa se koristi za lijepljenje sidara i sidrenih ploča za tlo ili stijenu i za sprječavanje ulaska vode i drugih onečišćenja u rupu. [16]

Utjecaj štapnih sidra na stabilizaciju kosine i princip rada skiciran je na slikama 22 i 23. Prije svega, da bi sidro moglo djelovati na datu kliznu plohu, ono mora presijecati kliznu plohu. Ako sidro ne siječe kliznu površinu, tada se nikakva sila sidra neće primijeniti na kliznu površinu, a sidro neće imati utjecaja na faktor sigurnosti te klizne površine.



Slika 22. Sidro ne presjeca kliznu plohu [2]



*Slika 23. Sidro presjeca kliznu plohu [2]*

Kada oslonac presijeca kliznu površinu, sila se primjenjuje na točku presjeka klizne površine s osloncem (tj. na bazu jedne kriške). Primijenjena sila jednostavno je linijski teret, s jedinicama sile po jedinici širine nagiba. Ugradnja štapnih sidara za tlo tako da sijeku potencijalnu ravninu sloma kritičan je korak u procesu stabilizacije tla, budući da njihova ugradnja osigurava odgovarajuću potporu kosini. Stabilna padina je ona na kojoj ne postoji klizno tijelo s faktorom sigurnosti nižim od kritičnog praga, a on iznosi  $F_s=1$ . Ovo kritično klizno tijelo definira odgovarajuću kritičnu kliznu površinu. Za točno mjerenje stabilnosti padine koristimo faktor sigurnosti povezan s kritičnom kliznom površinom. U praksi, pronalaženje kritične klizne površine uključuje procjenu faktora sigurnosti više ispitnih kliznih tijela i odabir onog s najnižom vrijednošću. Međutim, ovaj postupak ne jamči da će identificirana klizna površina točno odgovarati kritičnoj kliznoj površini. U stvarnosti postoji beskonačno mnogo potencijalnih kliznih površina za bilo koji nagib, što čini nemogućim izračunavanje beskonačnog broja faktora sigurnosti. [6]

## 7. PRORAČUN STABILNIH KOSINA PREDUSJEKA TUNELA

### 7.1 Uvodni parametri za proračun stabilnosti u programu GEO 5

Pokretanjem programa GEO5 "Slope stability" otvara nam se početni prozor koji omogućuje odabir postavke koja će diktirati izračun i analizu provjere odabranog zadatka. Postavke analize igraju ključnu ulogu u programu GEO5, jer određuju izračune koji se izvode za različite zadatke. Te se postavke sastoje od različitih komponenti, uključujući metode i teorije koje se koriste za analizu, metodologiju verifikacije i stvarne vrijednosti parcijalnih faktora i stupnjeva sigurnosti za specifične projektne situacije.

Popis je primjenjiv na sve GEO5 programe, iako neke postavke mogu biti ograničene na određene programe. U svrhu analize stabilnosti kosine u ovom diplomskom radu korištena je osnovna postavka proračunskog pristupa 3. Na slici 24 prikazani su korišteni parametri i standardi gdje je jasno vidljivo da je korištena euronorma. [8]

Add current settings to the Administrator

Name:  Valid for:

Materials and standards | Wall analysis | Pressure analysis | Stability analysis | Settlement | Anchors | Spread Footing | Pile | Pile CPT | Micropiles | Pile Group

Concrete structures:

Abutment:

Coefficients EN 1992-1-1:

Param. of CrSection determination:  [-]

Wall jump:

Reinforced masonry:

Masonry (stone) wall:

Steel structures:

Partial factor on bearing capacity of steel cross section:  $\gamma_{M0} =$   [-]

Timber structures:

Partial factor for timber property:  $\gamma_M =$   [-]

Modif. factor of load duration and moisture content:  $k_{mod} =$   [-]

Coeff. of effective width for shear stress:  $k_{cr} =$   [-]

Loads and combinations:

AASHTO - reduce parameters of friction soil/soil by 2/3  $\phi$

SNiP - input coefficients according to SNIP standards

Slika 24. Parametri i standardi korišteni u programu GEO5

Idući korak zadavanja postavki prikazan je na slici 25. Parametri proračunskog pristupa 3, te parametri seizmičke projektne situacije prema normi Eurokoda HRN EN 1997-1:2012/NA:2016 za svrhu analize stabilnosti kosine. Proračunske vrijednosti za analizu graničnog stanja ravnoteže izvode se iz karakterističnih vrijednosti uz primjenu parcijalnih koeficijenata koji su preuzeti sa slike 19.

Add current settings to the Administrator

Name:  Valid for:

Materials and standards | Wall analysis | Pressure analysis | Stability analysis | Settlement | Anchors | Spread Footing | Pile | Pile CPT | Micropiles | Pile Group

Earthquake analysis:

Verification methodology:

Design approach:

Permanent design situation | Transient design situation | Accidental design situation | Seismic design situation

— Partial factors on actions (A) —

	State STR		State GEO	
	Unfavourable	Favourable	Unfavourable	Favourable
Permanent actions :	$\gamma_G = 1.00$ [-]	$1.00$ [-]	$1.00$ [-]	$1.00$ [-]
Variable actions :	$\gamma_Q = 1.30$ [-]	$0.00$ [-]	$1.30$ [-]	$0.00$ [-]
Water load :	$\gamma_w =$		$1.00$ [-]	

— Partial factors for soil parameters (M) —

Partial factor on internal friction :  $\gamma_\phi = 1.25$  [-]

Partial factor on effective cohesion :  $\gamma_c = 1.25$  [-]

Partial factor on undrained shear strength :  $\gamma_{cu} = 1.40$  [-]

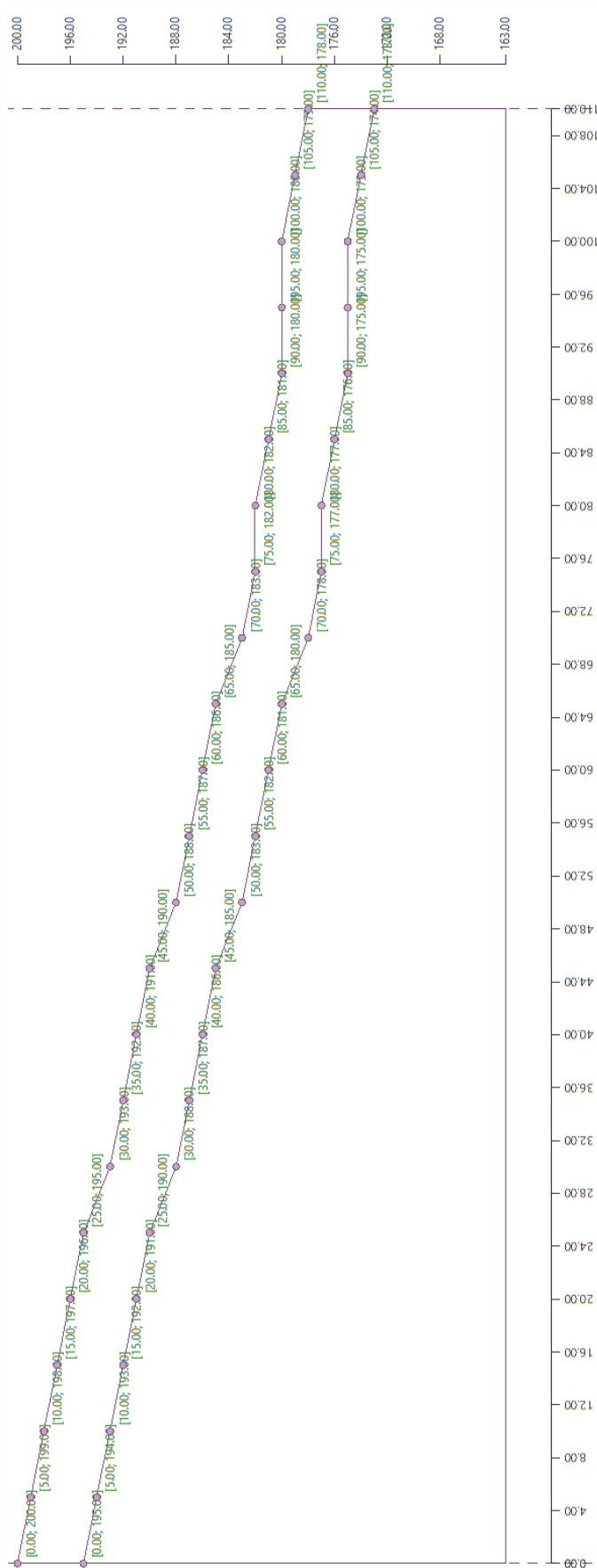
Slika 25. Parcijalni faktori STR i GEO korišteni za seizmički proračun u programu GEO5

## 7.2 Zadavanje geometrije ulaznog i izlaznog predusjeka tunela

Postoje dvije dostupne opcije za određivanje koordinata pojedinačnih točaka terena. Prva opcija je korištenje tablice, gdje se točke terena unose u tablicu "Nove točke sučelja". Gumb "Dodaj" otvara prozor "Nova točka", koji omogućuje određivanje koordinata nove točke. Svaka promjena u geometriji sučelja odmah se odražava na radnoj površini. Druga opcija za određivanje koordinata je korištenje miša, te ova opcija unosa putem miša omogućuje intuitivnij, interaktivniji i slobodniji unos točaka terena. U tablicama 8 i 9 su prikazane koordinate točaka koje čine pojedine slojeve terena na ulaznom i izlaznom predusjeku tunela u programu, te su iste prikazane na slikama 26 i 27.

Tablica 8. Koordinate točaka slojeva na stacionaži 20+915.00, ulazni predusjek tunela

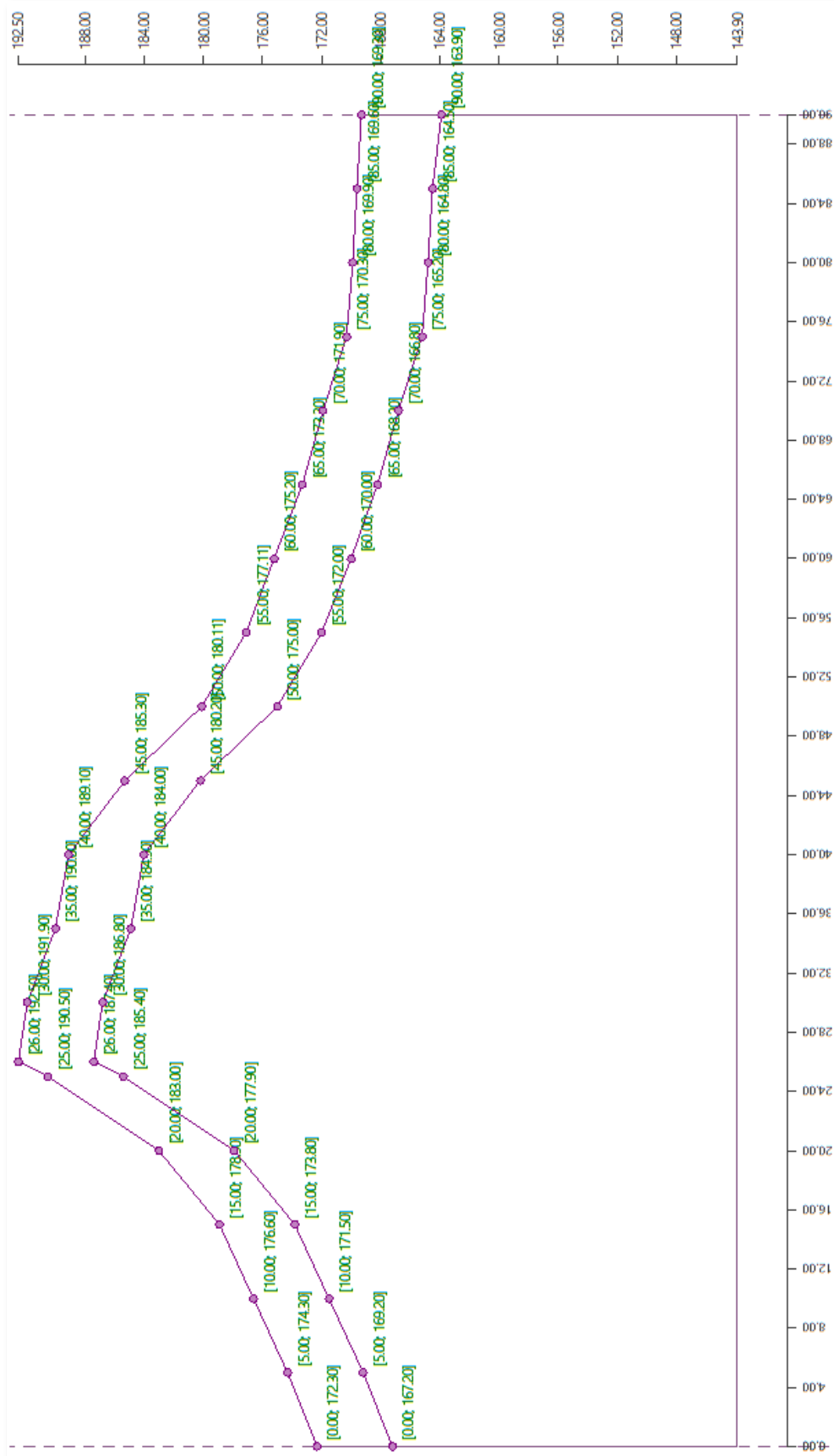
X [m]	Z [m]	X [m]	Z [m]
0	200	0	195
5	199	5	194
10	198	10	193
15	197	15	192
20	196	20	191
25	195	25	190
30	193	30	188
35	192	35	187
40	191	40	186
45	190	45	185
50	188	50	183
55	187	55	182
60	186	60	181
65	185	65	180
70	183	70	178
75	182	75	177
80	182	80	177
85	181	85	176
90	180	90	175
95	180	95	175
100	180	100	175
105	179	105	174
110	178	110	173
<i>Koordinate prvog sloja tla</i>		<i>Koordinate drugog sloja tla</i>	



Slika 26. Geometrija poprečnog presjeka ulaznog predusjeka tunela na stacionaži 20+915.00

Tablica 9. Koordinate točaka slojeva na stacionaži 21+602.00, izlazni predusjek tunela

X [m]	Z [m]	X [m]	Z [m]
0	167.2	0	167.2
5	169.2	5	169.2
10	171.5	10	171.5
15	173.8	15	173.8
20	177.9	20	177.9
25	185.4	25	185.4
26	187.4	26	187.4
30	186.8	30	186.8
35	184.9	35	184.9
40	184	40	184
45	180.2	45	180.2
50	175	50	175
55	172	55	172
60	170	60	170
65	168.2	65	168.2
70	166.8	70	166.8
75	165.2	75	165.2
80	164.8	80	164.8
85	164.5	85	164.5
90	163.9	90	163.9
<i>Koordinate prvog sloja tla</i>		<i>Koordinate drugog sloja tla</i>	



Slika 27. Geometrija poprečnog presjeka izlaznog predusjeka tunela na stacionaži 21+602.00



### 7.3 Klasifikacija i adaptacija parametara Geotehničkih sredina

U prozoru "Add new soil" upisujemo naziv tla i njegove odgovarajuće parametre koji su preuzeti iz laboratorijskih mjerenja koji su prethodno obrađeni i prikazani u tablici 6. U programskom paketu GEO5 zadaju se karakteristične vrijednosti parametara, te se uz zadavanje proračunskog pristupa 3, proračunske vrijednosti parametara tla automatski izračunavaju.

Na slikama 28 i 29 prikazane su vrijednosti parametara za geotehničke sredine 1 i 3 koje su korištene za proračun u ulaznom i izlaznom predusjeku tunela.

The screenshot shows the 'Edit soil parameters' dialog box for 'Geotehnička sredina 1'. The 'Basic data' section includes: Unit weight  $\gamma = 15.20$  [kN/m<sup>3</sup>], Stress-state: effective, Angle of internal friction  $\varphi_{ef} = 29.30$  [°], Cohesion of soil  $c_{ef} = 2.40$  [kPa]. The 'Uplift pressure' section includes: Calc. mode of uplift: standard, Saturated unit weight  $\gamma_{sat} = 19.20$  [kN/m<sup>3</sup>]. The 'Foliation' section includes: Soil foliation: not considered. The 'Draw' section includes: Pattern category: GEO, Subcategory: Soils (1 - 16), Pattern: 10 Silty sand, Color: [brown], Background: automatic, Saturation <10 - 90>: 50 [%]. Buttons at the bottom include Classify, Clear, OK + ↓, OK, and Cancel.

Slika 28. Parametri kohezije i tla unutarnjeg trenja za geotehničku sredinu 1

The screenshot shows the 'Edit soil parameters' dialog box for 'Geotehnička sredina 3'. The 'Basic data' section includes: Unit weight  $\gamma = 15.50$  [kN/m<sup>3</sup>], Stress-state: effective, Angle of internal friction  $\varphi_{ef} = 34.40$  [°], Cohesion of soil  $c_{ef} = 8.10$  [kPa]. The 'Uplift pressure' section includes: Calc. mode of uplift: standard, Saturated unit weight  $\gamma_{sat} = 19.70$  [kN/m<sup>3</sup>]. The 'Foliation' section includes: Soil foliation: not considered. The 'Draw' section includes: Pattern category: GEO, Subcategory: Soils (1 - 16), Pattern: 5 Sandy clay, Color: [grey], Background: automatic, Saturation <10 - 90>: 50 [%]. Buttons at the bottom include Classify, Clear, OK + ↑, OK, and Cancel.

Slika 29. Parametri kohezije i tla unutarnjeg trenja za geotehničku sredinu 3

## 7.4 Projektna opterećenja i seizmička analiza

Potresi imaju značajan utjecaj na pritisak tla u nekom području. Podrhtavanje uzrokovano potresom povećava učinak aktivnog tlaka, a smanjuje učinak pasivnog tlaka. U programu je potrebno uključiti opciju “*Seismic design situation*“ u sučelju “*Stage setting*” kako bi utjecaj potresa bio primijenjen na analizu stabilnosti kosine. Moglo bi izgledati slično za slučajnu projektnu situaciju, ali za potres je potrebna veća sigurnost. Program proračunava stabilnosti kosine za kombinaciju opterećenja vlastita težina i potresno djelovanje.

Kao što je u prethodnom dijelu spomenuto, korišteni podaci dobiveni su iz seizmoloških karata, prikazana su potresom izazvana horizontalna vršna ubrzanja ( $a_{gR}$ ) temeljnog tla tipa A, izražena u jedinicama gravitacijskog ubrzanja  $g$ , za povratna razdoblja od 95 odnosno 475 godina,  $a_{gR}$  vrijednost od 0,11  $g$  za povratni period od 95 godina, a vrijednost  $a_{gR}$  od 0,22  $g$  za povratni period od 475 godina. Vrijednosti horizontalnog i vertikalnog seizmičkog koeficijenta određeni su prema seizmičkom proračunu prema HRN EN 1998-5:2011, te pomoću tablica 9 i 10 koje detaljno opisuju parametre potrebne za proračun. Vrijednosti horizontalnog i vertikalnog seizmičkog koeficijenta jasno su vidljivi na slici 30. [3]

$$k_h = 0.5 * \alpha * S = 0.5 * 0.22 * 1,0 = 0.22 \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{a_g}{g} = \frac{0.22 * 9.81}{9.81} = 0.22 \quad (9)$$

$$k_v = 0.33 * k_h = 0.0726 \quad \left(\text{za } \frac{a_{vg}}{a_g} < 0.06\right) \quad (10)$$

Pri čemu je:

- $k_h$  horizontalni seizmički koeficijent
- $k_v$  vertikalni seizmički koeficijent
- $a_g$  proračunska horizontalna akceleracija tla
- $S$  parametar tipa tla (tablica 9)
- $g$  ubrzanje sile teže
- $a_{vg}$  projektno ubzanje tla u vertikalnom smjeru
- $a_g$  projektno ubrzanje za tip tla A

Tablica 10. Parametri tipa tla [7]

TIP TLA	S
A	1.0
B	1.2
C	1.15
D	1.35
E	1.4

Horizontal seismic coefficient : $K_h =$	0.2200	[-]
Vertical seismic coefficient : $K_v =$	0.0760	[-]

Slika 30. Vrijednosti horizontalnog i vertikalnog seizmičkog koeficijenta

## 7.5 Podgradni sustav zasjeka

Za stabilizaciju usjeka koristi se sustav podloge od geotehničkih štapnih sidara u kombinaciji s armaturnim mlaznim betonom. Mlazni beton korišten u ovom scenariju ima ukupnu debljinu od 25 cm, sastoji se od tri sloja: 5 cm, 10 cm i 10 cm. Razred tlačne čvrstoće betona je C 25/30 i ojačan je s dvije Q-335 mreže između slojeva. Važno je napomenuti da su karakteristične vrijednosti parametara mlaznog betona  $c_k=50$  kPa i  $\varphi_k=45^\circ$ , što je znatno niže od parametara koji se tipično povezuju s armiranim betonom. Ovaj konzervativni pristup osigurava da se izračuni izvode s jakim naglaskom na sigurnost. Štapna sidra ne djeluju pojedinačno, već kao kompletan sustav za stabilizaciju. Za stabilizaciju lica padine, kosina lice mora biti povezana sa sidrima jamčeći vlačnu čvrstoću.

Armaturna mreža za ojačanje u stabilnosti kosina odnosi se na upotrebu materijala nalik mreži za pružanje dodatne čvrstoće i stabilnosti kosina ili nasipa kao na slici 31. Padine mogu biti podložne eroziji, klizištima ili drugim oblicima nestabilnosti zbog čimbenika kao što su obilne kiše, uvjeti tla ili strmina padina. Mreža za armiranje koristi se kao mjera za pojačanje za poboljšanje stabilnosti i cjelovitosti kosine.

Mreža za armiranje obično je izrađena od čelika ili sintetičkih materijala i sastoji se od međusobno povezanih žica ili vlakana raspoređenih u mrežasti uzorak. Ugrađuje se unutar kosine kako bi se povećala njegova vlačna čvrstoća i otpornost na deformaciju ili slom. Mreža je često ugrađena u materijal nagiba, kao što je tlo ili beton, kako bi se raspodijelili naprezanja i spriječilo lokalizirano lomljenje.

Primarne funkcije armaturne mreže u stabilnosti kosina uključuju:

Ojačanje: Mreža daje dodatnu čvrstoću kosini, poboljšavajući njegovu sposobnost da izdrži sile koje djeluju na nju, kao što su gravitacijske sile, hidraulički pritisak ili bočni pritisak zemlje.

Zatvaranje tla: Mreža djeluje kao sustav za zadržavanje, sprječavajući pretjerano pomicanje ili pomicanje čestica tla. Pomaže u održavanju cjelovitosti padine smanjujući eroziju tla i kontrolirajući kretanje slojeva tla.

Raspodjela opterećenja: Ravnomjernijom raspodjelom primijenjenih opterećenja po kosini, armaturna mreža pomaže minimizirati lokalne koncentracije naprezanja, smanjujući rizik od loma kosine.

Površinska zaštita: Mreža također može poslužiti kao zaštitni sloj za površinu padine, smanjujući površinsku eroziju uzrokovanu padalinama, vjetrom ili drugim vanjskim čimbenicima.  
[5]



Slika 31. Zaštita kosine armaturnim mržama na padinama. [14]

Geotehnička sidra se nude u katalogu DYWIDAG. Proizvodi za geotehniku gdje je ponuda sidra prikazana na slici 32. Odabiru su sidra GEWI Plus Soil Nail promjera šipke 22 mm, a promjer bušotine (tijela sidra) od 150 mm i proračunska nosivost od 304 kN. Sidra su pasivna, odnosno prednaprezanje ih ne aktivira. Sidra su pod kutem 18 ili 23 stupnjeva od horizontale. Sidra se postavljaju na raster 2,0 x 2,0 m. Kao što je prethodno objašnjeno, sustav "ojačanja tla" (obično se nazivaju "soil nail") koristi se u programu za analizu stabilnosti kosina. Dodatna stabilizacija računa se u programu kliznog tijela iz sile u sidru koja bi se mogla ostvariti trenjem na dijelu od kraja sidra do klizne plohe.

**GEWI® Plus Soil Nail / Rock Bolt, S670/800 Threadbar**

Nominal diameter $\varnothing$ [mm]	Yield strength / tensile strength $f_{0,2k}/f_{tk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Cross-sectional area <b>A</b> [mm <sup>2</sup> ]	Load at yield <b>F<sub>yk</sub></b> [kN]	Ultimate load <b>F<sub>tk</sub></b> [kN]	Weight [kg/m]	Weight DCP [kg/m]
18	670/800	254	170	204	2.00	5.4
22	670/800	380	255	304	2.98	6.5
25	670/800	491	329	393	3.85	7.0
28	670/800	616	413	493	4.83	8.6
30	670/800	707	474	565	5.55	9.0
35	670/800	962	645	770	7.55	11.3
43	670/800	1,452	973	1,162	11.40	15.8
57.5	670/800	2,597	1,740	2,077	20.38	30.0
63.5	670/800	3,167	2,122	2,534	24.86	32.4
75	670/800	4,418	2,960	3,534	34.68	43.5

Slika 32. Tablica GEWI® PLUS Soil Nail s tehničkim podacima. [15]

Određivanje nosivosti štapnih sidara prema EC7 uključuje proračune na temelju pilota opterećenih vlačnom silom. Međutim, zbog ograničenog istraživanja tla/stijena u području sidrenja, otpor trenja na površini tijela sidra izračunava se korištenjem koeficijenta modela (nacionalni dodatak). Ovaj koeficijent se koristi za procjenu otpora plašta tijela sidra, koji se određuje sljedećom formulom. [4]

$$R_{S;d} = \frac{R_{S;k}}{\gamma_{S;t} * KM} \quad (11)$$

Gdje je:

- $R_{S;d}$  otpornost plašta tijela sidra
- $R_{S;k}$  proračunska otpornost plašta tijela sidra
- $\gamma_{S;t}$  otpor trenjem po plaštu vlačnog pilota
- $KM$  koeficijent modela

Vrijednost  $KM$  je 1,5 za sve pilote (proračunski pristup 2), 1,1 za pilote (proračunski pristup 3) u krupnozrnim tlu i 1,3 za pilote u sitnozrnim tlu (proračunski pristup 3). Parcijalni faktor  $\gamma_{S;t}$  za otpor na površini vlačnog pilota iznosi 1,2 za zabijene i bušene pilote s PP2, odnosno 1,0 za PP3. Nacionalni dodatak omogućuje dimenzioniranje vlačnih pilota prema PP2 ( $A1 + M1 + R2$ ) ili PP3 ( $A1$  ili  $A2 + M2 + R3$ ) koji je korišten u ovom radu. Prema prethodnom, za PP3 u sitnozrnim tlu i bušeni pilot, dobiva se faktor sigurnosti:  $\gamma_{S;t} * KM = 1.0 * 1.3 = 1.3$

Generalno, silu koju čelično tijelo sidra (natega) prenosi na sidrišno tijelo, a ono na tlo možemo odrediti na osnovi jedinične otpornosti na plaštu sidrišnog tijela (trenje):

$$R_{S;k} = q_{S;k} * (2r\pi) * L_s \quad (12)$$

Gdje je:

- $r$  polumjer presjeka sidrišnog tijela
- $q_{S;k}$  karakteristična jedinična otpornost po plaštu sidrišnog tijela
- $L_s$  dužina sidrišnog tijela

Za koherentno tlo (nije primjenjivo za čvrstu stijenu) može se odrediti i kao:

$$q_{S;k} = \frac{\alpha * c_k + \sigma_n * tg(\varphi_k)}{\gamma_{S;t} * KM} \quad (13)$$

$$q_{S;k} = \frac{10 + 19.6 * 5 * tg(34^\circ)}{1.3}$$

$$q_{S;k} = 58.53 \text{ kPa}$$

Gdje je:

- $\alpha$  koeficijent prionjivosti ( $\alpha * c$  - adhezija)
- $\sigma_n$  geostatičko normalno naprezanje na površinu sidrišnog tijela

Karakteristične vrijednosti za proračun stabilnosti sidara izračunavaju se pojedinačno s obzirom na položaj sidra, te se dodatno reduciraju s parcijalnim koeficijentom za materijal  $\gamma_M = 1,25$ . Iako su vrijednosti, slika 33, za temeljna sidra veće, usporedba s vrijednostima korištenim u proračunu pokazuje da su konzervativne i prikladne za sidra bez naknadnog injektiranja.

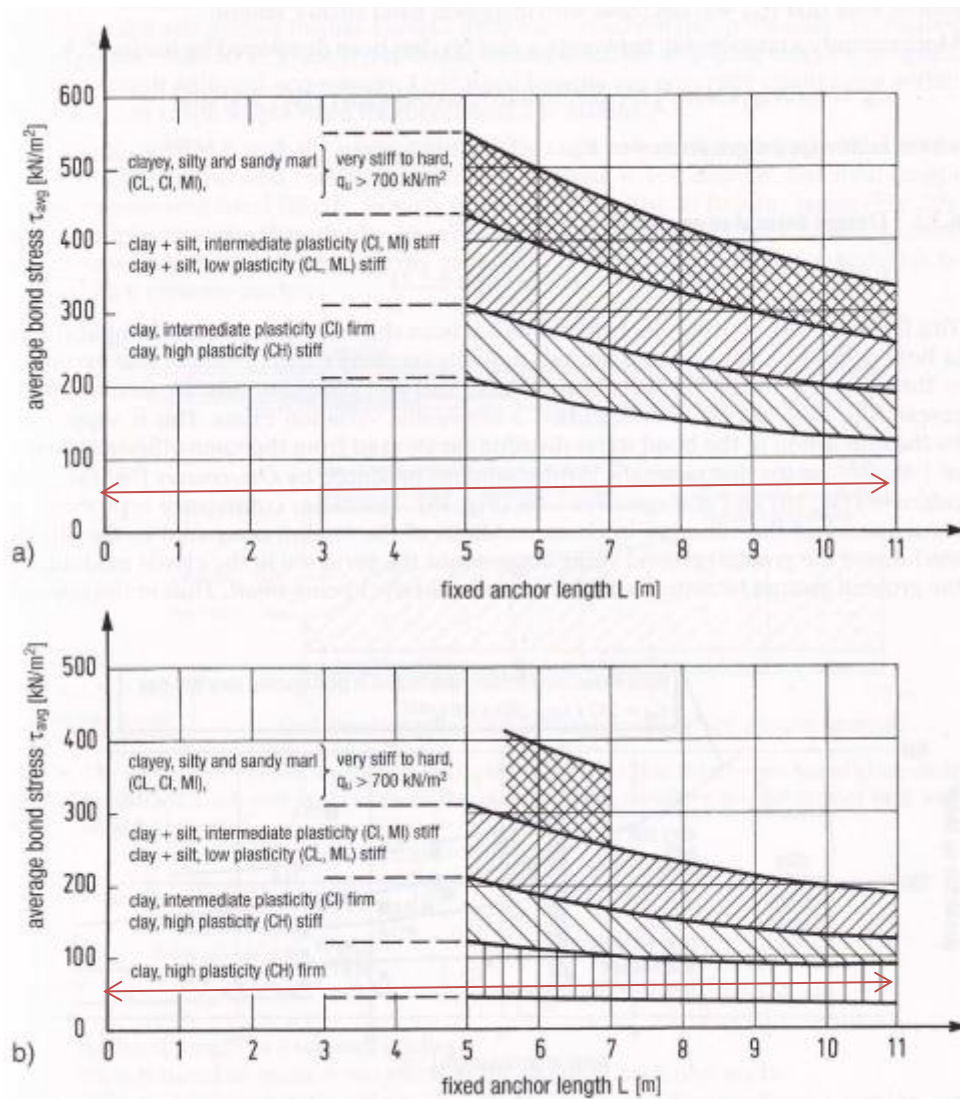


Fig. 18. Average bond stress at ultimate limit state of anchors in cohesive soils  
a) with post-grouting, b) without post-grouting

Slika 33. Sugerirane vrijednosti trenja plašt sidrišnog tijela-okolno tlo [7]

Prema katalogu ponuđenih sidara, slika 32, odabiru se sidra promjera 22 mm te proračunska nosivost sidra iznosi:

$$S_d = 304 \text{ kN}$$

Orijentaciona potrebna duljina sidra (sidrišnog tijela) za postizanje tražene nosivosti računa se prema sljedećoj formuli:

$$L = \frac{S_d}{q_{S;k} * \pi * D} = \frac{S_d}{\alpha * c_k + \sigma_n * \text{tg}(\varphi_k) * \pi * D} \quad (14)$$

Gdje je:

- $L$  potrebna duljina sidra
- $q_{S;k}$  karakteristična jedinična otpornost po plaštu sidrišnog tijela
- $S_d$  proračunska nosivost sidra
- $D$  promjer bušotine

Za dubinu 5 m od površine terena

$$L = \frac{304 \text{ kN}}{\frac{10 + 19.6 \text{ kN/m}^3 * 5 \text{ m} * \text{tg}(34^\circ)}{1.3} * \pi * 0,15 \text{ m}} = 11.01 \text{ m}$$

Za dubinu 10 m od površine terena

$$L = \frac{304 \text{ kN}}{\frac{10 + 19.6 \text{ kN/m}^3 * 10 \text{ m} * \text{tg}(34^\circ)}{1.3} * \pi * 0,15 \text{ m}} = 5.89 \text{ m}$$

Pregledom gore navedenih modela utvrđene su minimalne duljine sidara na način koji će osigurati potrebnu stabilnost predusjeka i potrebnu nosivost sidara.

## 8. REZULTATI ANALIZE U PROGRAMU GEO5

## 8.1 Geometrija ulaznih modela

Na slikama 37 i 38 prikazane su geometrija poprečnih presjeka na ulaznom i izlaznom predusjeku tunela. Prema navedenim slikama formirana su dva modela za ispitivanje stabilnosti kosine. Nagibi kosina odabrani su prema slikama 34 i 35 koje prikazuje orijentacione veličine nagiba kosina usjeka i nasipa za određene vrste tla. Model 1 predstavlja presjek na stacionaži 20+929.00 (ulazni predusjek tunela, slika 36), a model 2 predstavlja presjek na stacionaži 21+602.00 (izlazni predusjek tunela, slika 37). Početna analiza radi se bez sidara u svrhu određivanja kritične klizne plohe, zatim je definiranjem kritične klizne plohe definirana potrebna dužina sidara, te provedena ponovna kontrola stabilnosti.

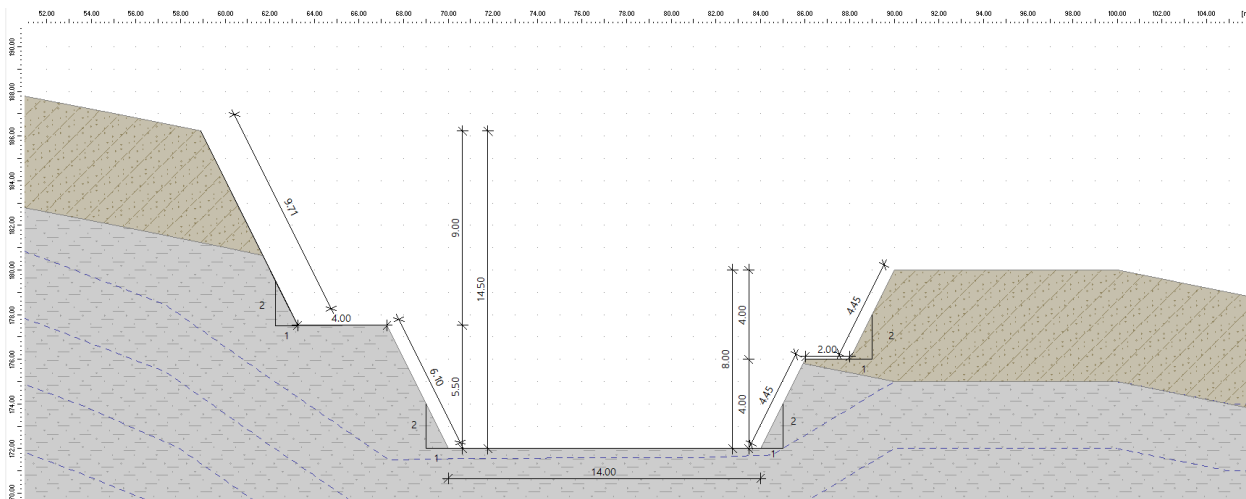
kategorija tla prema GN 200	brzina širenja seizmičkih valova $v_p$ [km/sek]	vršni kut trenja $\varphi^\circ$	dubina usjeka [m]			
			<3	3-6	6-9	9-12
I	<0,2	10-15	1:2	1:3	1:4	1:5
II	0,2-0,5	15-35	1:1,75	1:2	1:3	1:4
III	0,5-1,0	35-40	1:1,5	1:2	1:1,25	1:3
IV	1,0-2,0	40-50	1:1	1:1,5	1:1,75	1:2
V	2,0-3,0	50-60	1:0,5	1:0,75	1:1	1:1
VI	>3	>60	1:0,2	1:0,2	1:0,2	1:0,2

Slika 34. Ovisnost nagiba kosine usjeka o dubini usjeka i vrsti tla [19]

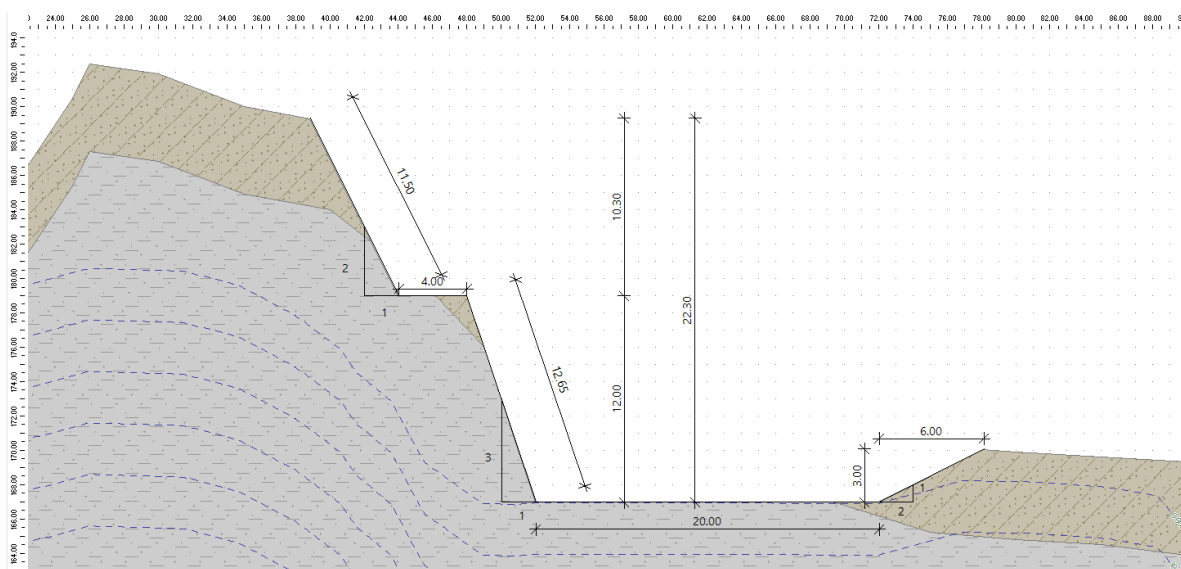
vrsta tla	svojstvo	stanje tla	prosorna težina $\rho_{s, \text{m}^3}$	visina nasipa [m]				dubina usjeka [m]**				
				<3	3-6	6-9	9-12	<3*	3-6	6-9	9-12	
				Nagib kosine								
stijena	čvrsta			-	-	-	-	uspravan				
	trošna			-	-	-	-	2:1-5:1				
nevezano	lomljeni kamen (krupan)			1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	
	lomljeni kamen (sitani)			1:1,5	1:1,5	1:1,5	1:1,5	1:1,5	1:1,5	1:1,5		
	šljunak, krupnozrni ili pjeskoviti šljunak	Jako zbijeno, velike gustoće	21-24	1:1,5	1:1,5	1:1,5	1:1,5	1:1,5	1:1,5	1:1,5		
	krupno do srednje zrnati pijesak, bez praha, jednolik		18-21	1:1,5	1:1,5	1:1,75	1:1,75	1:1,5	1:1,5	1:1,75	1:1,75	
	sitnozrni, prašnasti pijesak, jednolik		17-21	1:1,5	1:1,75	1:2	1:2	1:1,5	1:1,75	1:2	1:2	
vezano	prašnasti pijesak, vezani			17-21	1:1,5	1:1,25	1:2,75	1:3	1:1,5	1:2	1:2	1:2
	srednje do visoko - plastični prah vezani			18-22	1:1,25**	1:2	1:2,25	1:3	1:1,25	1:1,25	1:1,75	1:2
	pjeskovita glina, vezana			18-22	1:1,25**	1:1,75	1:2	1:2,75	1:1,25	1:1,25	1:1,5	1:1,25
	srednjeplastična glina, vezana	prirodna vlažnost ispod granice plastičnosti	17-23	1:1,25**	1:1,75	1:1,25	1:3	1:1,25	1:1,5	1:1,75	1:2	
	visokoplastična glina		17-23	1:1,25**	1:1,75	1:3	1:4	1:1,25	1:1,25	1:2	1:2	

Slika 35. Orijetacione veličine nagiba kosina usjeka i nasipa za određene vrste tla [1]





Slika 36. Geometrija zasjeka na ulaznom predusjeku tunela, Model 1

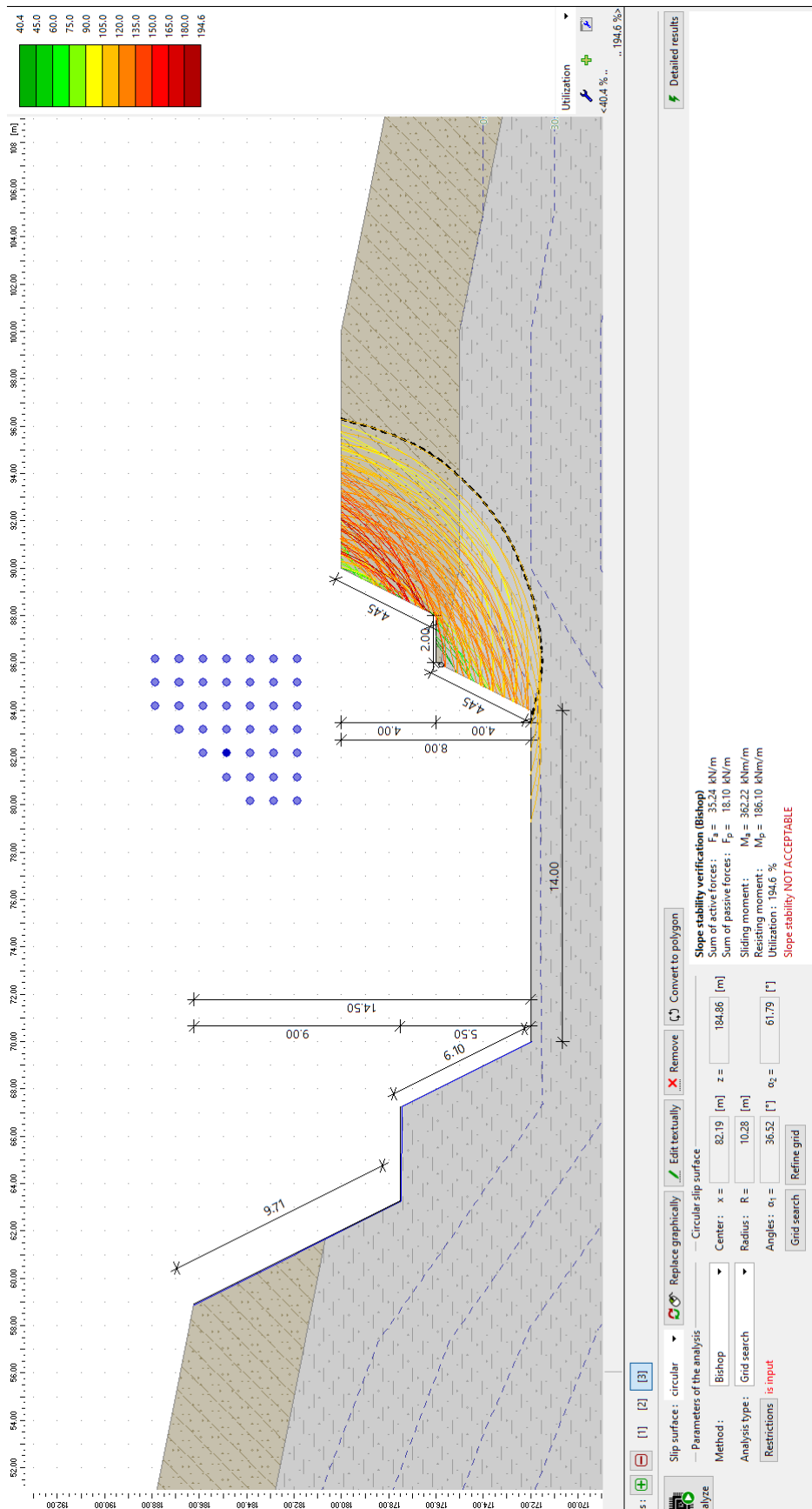


Slika 37. Geometrija zasjeka na izlaznom predusjeku tunela, Model 2

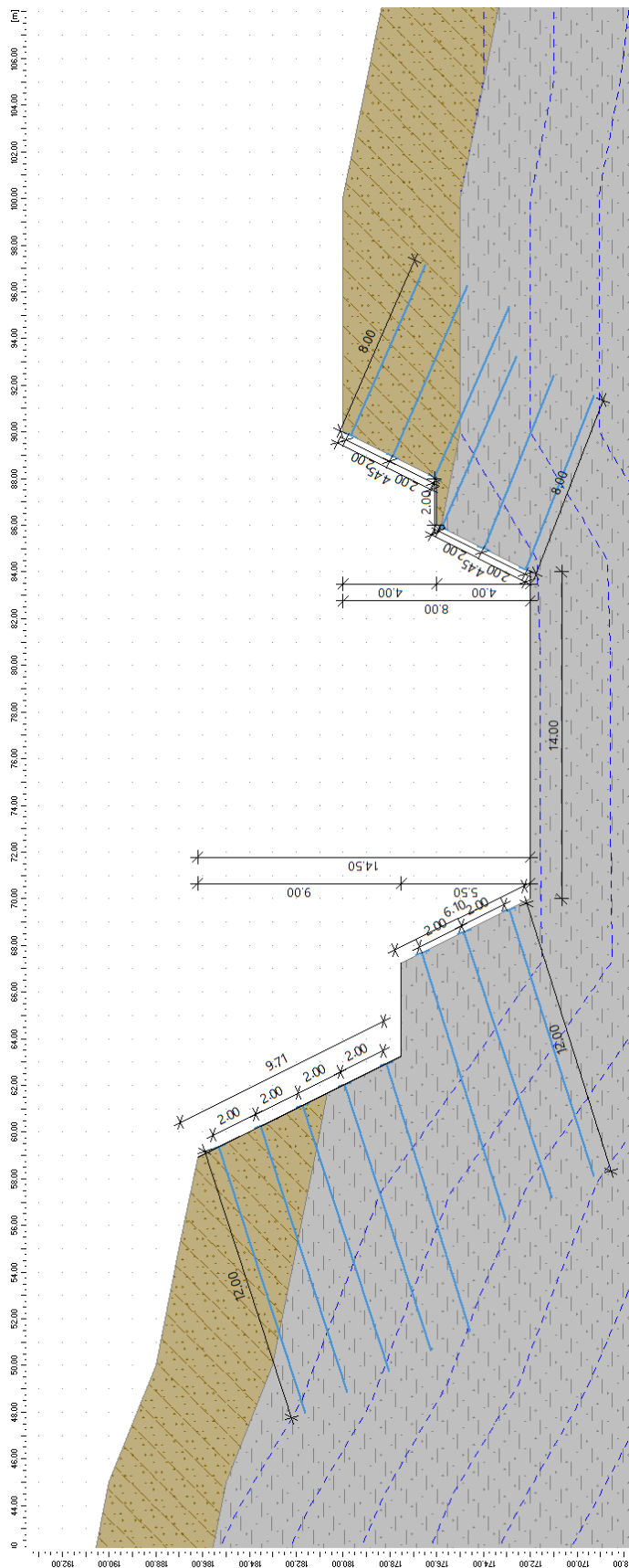
## 8.2 Definiranje kritične klizne plohe za analizu stabilnosti kosine

Metode granične ravnoteže naširoko su korištene za analizu stabilnosti kosina u inženjerskoj praksi. Kritična klizna ploha koja ima minimalni faktor sigurnosti, često se pretpostavlja kao najvjerojatnija klizna ploha i naknadno se koristi kao kritična klizna ploha u analizi i dizajnu mjera stabilizacije kosina. U načelu je moguće zamisliti beskonačan broj kliznih ploha u svakom promatranom slučaju kosine pa bi, opet u načelu, za pronalaženje kritične trebalo odrediti i beskonačan broj faktora sigurnosti. Nakon definiranja kritične klizne plohe (slike 38, 39 i 45) u analizi stabilnosti, stabilizacija padine izvodi se pomoću sidara. Sidrenje uključuje ugradnju strukturnih elemenata, u kosinu kako bi se pružio dodatni otpor i spriječilo daljnje pomicanje duž kritične klizne plohe. Sidra se postavljaju duboko u stabilne slojeve tla izvan površine klizanja i zatežu se kako bi se stvorila aktivna sila zadržavanja. Ova sila suprotstavlja se silama koje djeluju na kosinu, poboljšavajući njegovu stabilnost.

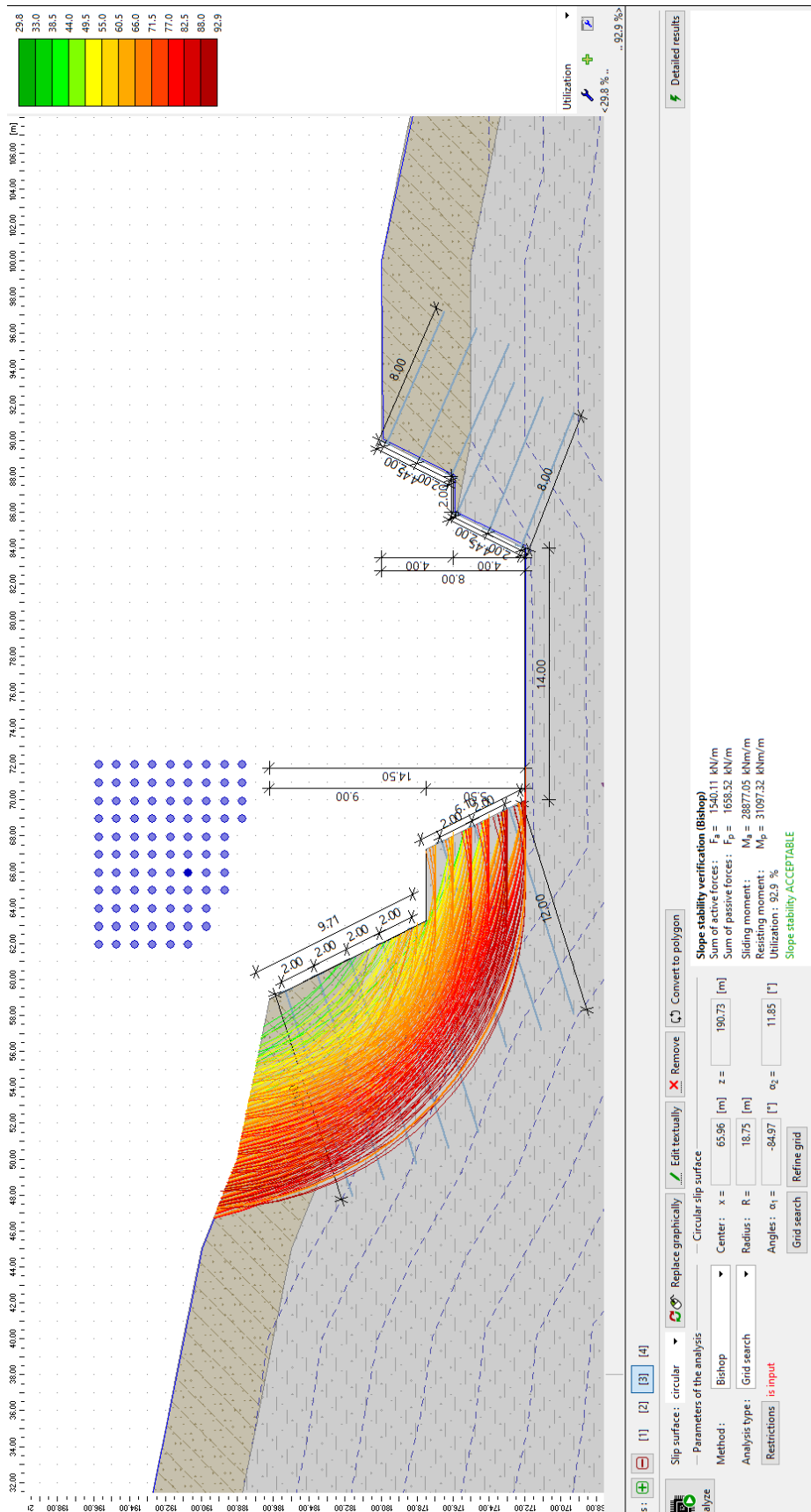




Slika 39. Kontrola stabilnosti desne strane zasljeva na ulaznom predusjeku tunela bez stabilizacije pomoću sidara (stac. 20+915.00)



Slika 40. Geometrija zasjeka na ulaznom predusjeku tunela stabilizirana sidarima (stac. 20+915.00)



Slika 41. Kontrola stabilnosti lijeve strane zaszjeka na ulaznom predusjeku tunela stabilizirano sa sidarima (stac. 20+915.00)

Detailed results

**Slope stability verification (Bishop)**  
Sum of active forces:  $F_a = 1540.11$  kN/m  
Sum of passive forces:  $F_p = 1658.52$  kN/m  
Sliding moment:  $M_a = 28877.05$  kNm/m  
Resisting moment:  $M_p = 31097.32$  kNm/m  
Utilization: 92.9 %  
Slope stability **ACCEPTABLE**

**Nails bearing capacity**

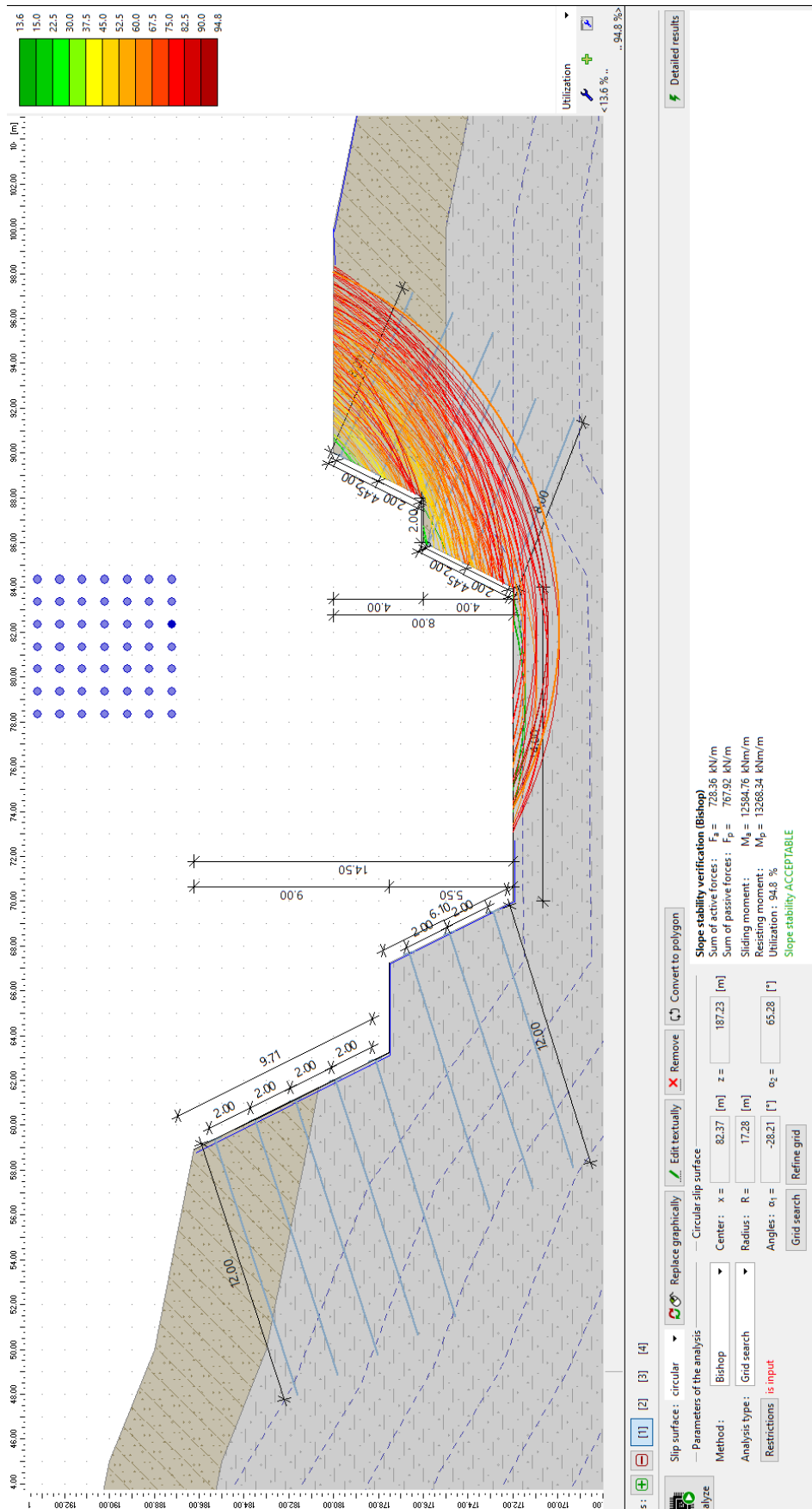
Nail	Bearing capacity [kN/m]
1	17.12
2	21.27
3	28.86
4	42.44
5	61.53
6	38.66
7	83.11
8	127.88
9	0.00
10	0.00
11	0.00
12	0.00
13	0.00
14	0.00

**Slip surface grid search (Bishop)**

No.	Center		Radius R [m]	Utilization	Verification
	x [m]	z [m]			
1	71.96	188.73	16.75	61.1 %	ACCEPTABLE
2	71.96	189.73	16.75	59.0 %	ACCEPTABLE
3	71.96	189.73	17.75	63.3 %	ACCEPTABLE
4	71.96	190.73	16.75	47.8 %	ACCEPTABLE
5	71.96	190.73	17.75	61.9 %	ACCEPTABLE
6	71.96	190.73	18.75	66.2 %	ACCEPTABLE

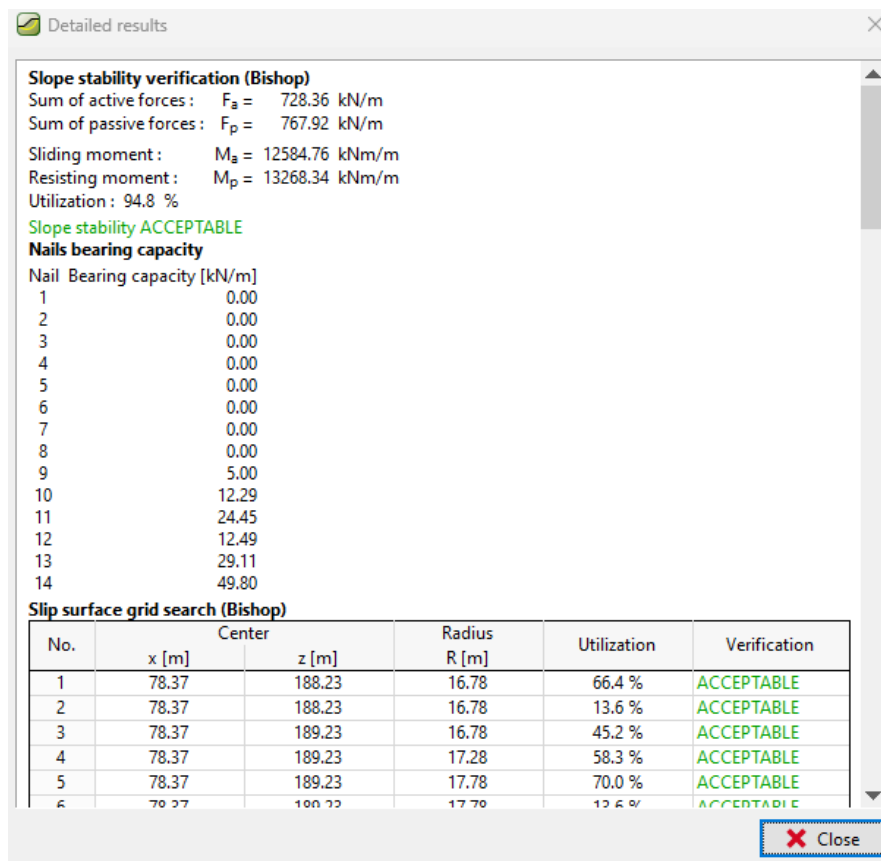
Close

Slika 42. Nosivost štapnih sidara lijeve strane ulaznog predusjeka tunela



Slika 43. Kontrola stabilnosti desne strane zasjeka na ulaznom predusjeku tunela stabilizirano sa sidarima (stac. 20+915.00)





Slika 44. Nosivost štapnih sidara desne strane ulaznog predusjeka tunela

Analizom stabilnosti kosine s podgradnim elementima, za kombinaciju opterećenja stalno + potres, dobiven je faktor sigurnosti na način:

Lijeva stran zasjeka:

$$FS = \frac{F_p}{F_a} = \frac{1658.52}{1540.11} = 1.0768$$

Desna strana zasjeka:

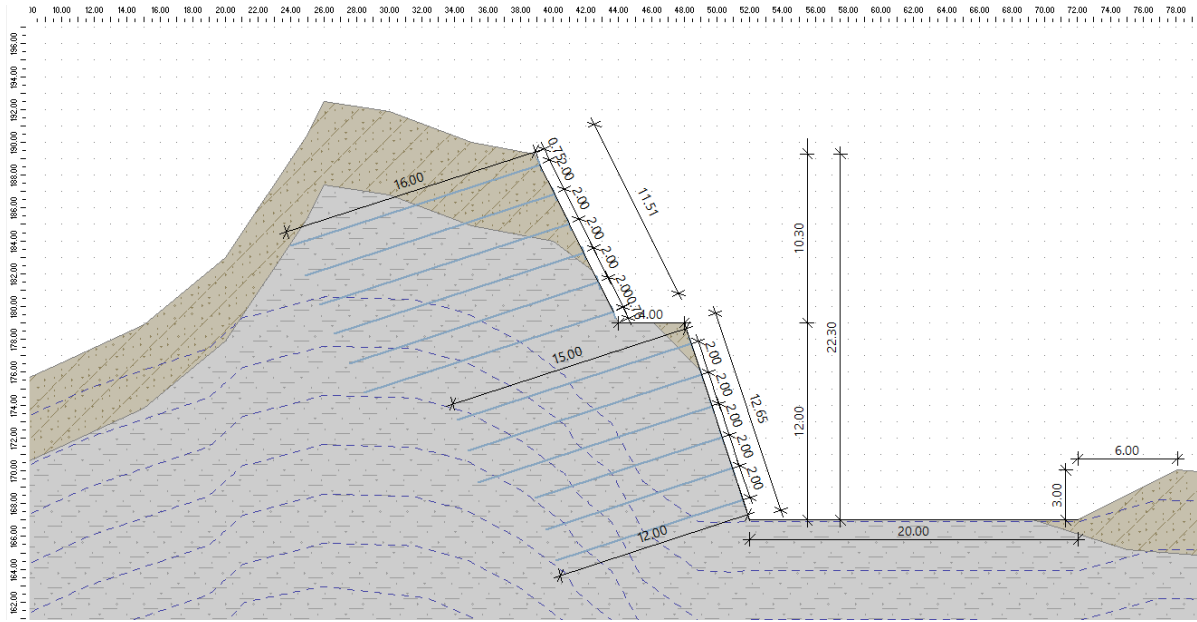
$$FS = \frac{F_p}{F_a} = \frac{767.92}{728.36} = 1.0543$$

Gdje je:

- $FS$  Faktor sigurnosti
- $F_p$  Suma pasivnih sila
- $F_a$  Suma aktivnih sila

Time je zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.





Slika 46. Geometrija presjeka na izlaznom predusjeku tunela stabilizirana sidarima (stac. 21+602.00)

Edit nail properties ✕

---

— Nail location

Start pt. : x =  [m]  
 z =  [m]

Length : l =  [m]

Inclination :  $\alpha$  =  [°]

Nail spacing : b =  [m]

— Tension strength

Nail diameter :  $d_s$  =  [mm]

Tensile strength :  $f_y$  =  [MPa]

— Pull out resistance

Hole diameter : d =  [mm]

— Nail head strength

$R_f$  =  [kN]

Slika 47. Podaci o svojstvima sidara korištenih za stabilizaciju ulaznog i izlaznog predusjeka tunela



**Slope stability verification (Bishop)**  
Sum of active forces:  $F_a = 3864.72$  kN/m  
Sum of passive forces:  $F_p = 3960.19$  kN/m  
Sliding moment:  $M_a = 132418.16$  kNm/m  
Resisting moment:  $M_p = 135689.26$  kNm/m  
Utilization: 97.6 %

**Slope stability ACCEPTABLE**

**Nails bearing capacity**

Nail	Bearing capacity [kN/m]
1	22.20
2	33.48
3	46.08
4	59.52
5	78.68
6	103.39
7	18.39
8	67.35
9	130.62
10	88.34
11	142.61
12	152.05

**Slip surface grid search (Bishop)**

No.	Center		Radius R [m]	Utilization	Verification
	x [m]	z [m]			
1	67.10	197.84	34.26	69.5 %	ACCEPTABLE
2	67.10	198.84	34.26	67.8 %	ACCEPTABLE
3	67.10	198.84	34.76	67.8 %	ACCEPTABLE
4	67.10	199.84	34.26	61.3 %	ACCEPTABLE
5	67.10	199.84	34.76	65.8 %	ACCEPTABLE
6	67.10	199.84	35.26	66.1 %	ACCEPTABLE
7	67.10	200.84	34.26	58.6 %	ACCEPTABLE

Slika 49. Nosivost štapnih sidara lijeve strane izlaznog predusjeka tunela

Analizom stabilnosti kosine s podgradnim elementima, za kombinaciju opterećenja stalno + potres, dobiven je faktor sigurnosti na način:

$$FS = \frac{F_p}{F_a} = \frac{3960.19}{3864.72} = 1.0246$$

Gdje je:

- $FS$  Faktor sigurnosti
- $F_p$  Suma pasivnih sila
- $F_a$  Suma aktivnih sila

Time je zadovoljen globalni uvjet stabilnosti.

Tablica 11. Vrijednosti faktora sigurnosti kosina ulaznog i izlaznog predusjeka tunela bez stabilizacije sa sidrima, te stabilizacijom sa sidrima.

	<b>BEZ SIDARA</b>	<b>SA SIDRIMA</b>
<b>ULAZNI PREDUSJEK</b> (LIJEVA STRANA)	$FS = \frac{F_p}{F_a} = \frac{32.44}{78.65} = 0.412$ (Slika 38)	$FS = \frac{F_p}{F_a} = \frac{1658.52}{1540.11} = 1.076$ (Slika 41)
<b>ULAZNI PREDUSJEK</b> (DESNA STRANA)	$FS = \frac{F_p}{F_a} = \frac{18.10}{35.24} = 0.513$ (Slika 39)	$FS = \frac{F_p}{F_a} = \frac{767.92}{728.36} = 1.054$ (Slika 43)
<b>IZLAZNI PREDUSJEK</b>	$FS = \frac{F_p}{F_a} = \frac{35.8}{123.4} = 0.288$ (Slika 45)	$FS = \frac{F_p}{F_a} = \frac{3960.19}{3864.72} = 1.0246$ (Slika 48)

## 9. ZAKLJUČAK

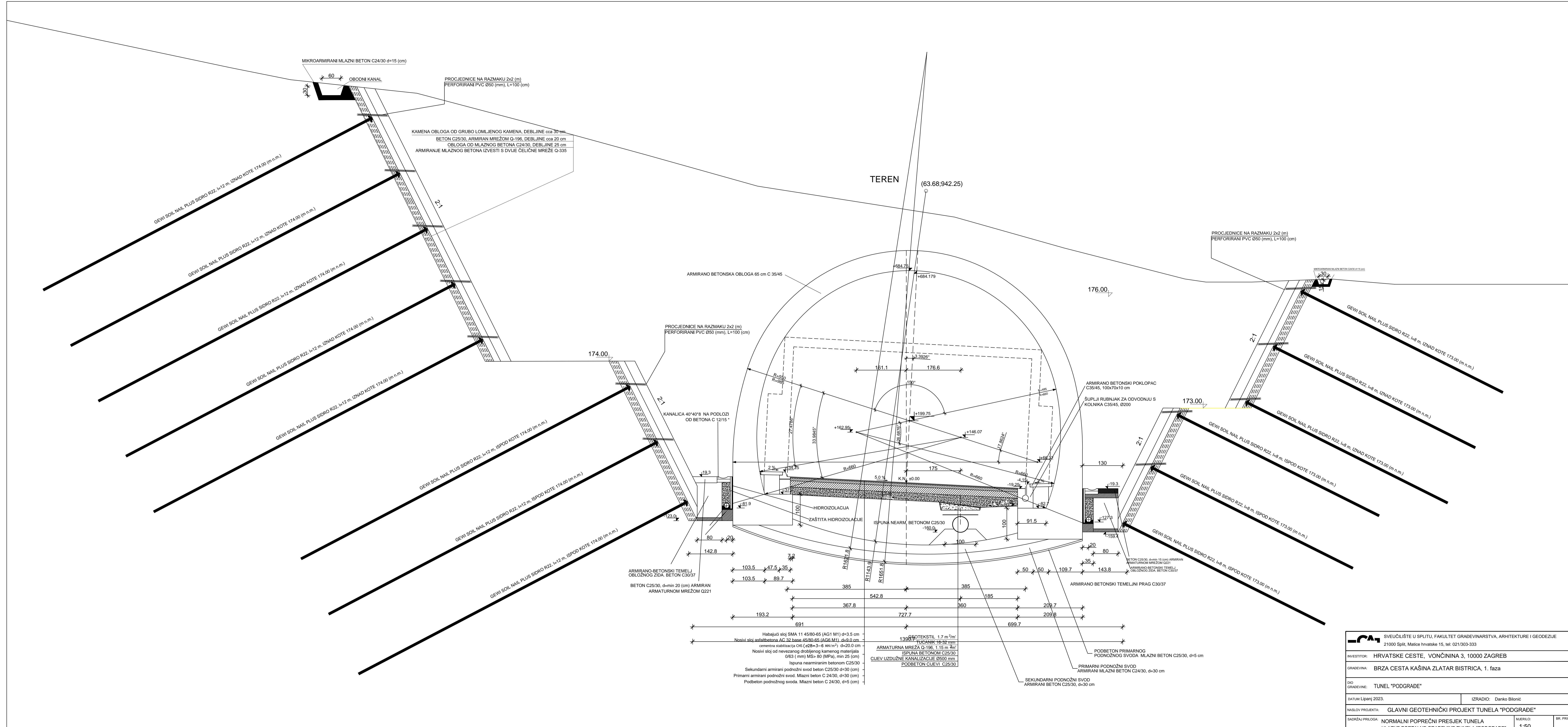
Cilj ovog diplomskog rada je bio upoznati se s predmetnom lokacijom, te u sklopu brze ceste na ulazu i izlazu tunela koji prolazi kroz morfološki uzdignuti teren odabrati stabilne nagibe pokosa na kosinama predusjeka. Obradom podataka izvučenih iz „Geotehnički elaborat BC Kašina – ZL. Bistrica „, te dviju bušotina izvedenih u neposrednoj blizini ulaznog (GP-22) i izlaznog (GP-23) portala tunela, izvršena je analiza stabilnosti kosina ulaznog i izlaznog predusjeka, bez stabilizacije sa sidrima, te sa stabilizacijom sa sidrima u programskom paketu GEO5.

Utvrđene su dvije geotehničke sredine, te obradom laboratorijskih istraživanja odabrani su parametri tla koje izgrađuju iste. Također, proračunate su potrebne duljine štapnih sidara kojima se osigurava globalna i lokalna stabilnost ulaznog i izlaznog predusjeka tunela. Odabiru se sidra *GEWI PLUS SOIL NAIL R22*, dužina 16, 15, 12 i 8 metara na rasterima 2,0 m x 2,0 m. Projektirani promjer bušotine za sidra iznosi 150 mm kako bi se osiguralo što bolje prianjanje i međusobno povezivanje sidra sa stijenskom masom, te kako bi se osigurala trajnost sidara.

Sastavni dio osiguranja stabilnosti pokosa predusjeka čini i ugradnja armiranog mlaznog betona klase C25/30, debljine 25 (cm), koji se armira u dva sloja pomoću čeličnih armaturnih mreža Q-335. Ovako projektirano osiguranje pokosa predusjeka dat će trajnu globalnu i lokalnu stabilnost objektu.

## 10. LITERATURA

- [1] „Zemljani radovi“ – (dr.sc. Tanja Roje-Bonacci), 2012. godine
- [2] „Glavni geotehnički projekt tunela Podgrađe“ – (dr.sc. Davor Bojanić), 2021. godine u Splitu
- [3] „Geotehnički elaborat BC Kašina – ZL. Bistrica, 1. faza, izgradnja jednog kolinika od čvora Zlatar Bistrica do čvora/raskrižja u razini Marija Bistrica, L=cca 2,27 km brze ceste i L=1,3 km spojene ceste“ – (dipl.ing.građ. Pero Šiša, dipl.ing.geol. Saša Kasapović, mag.ing.aedif. Adrijan Đaković Alavanja, dipl.ing.rud Ivana Dobrilović), 2021. godine
- [4] „Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1.dio: Opća pravila – Nacionalni dodatak“
- [5] „Potporne građevine i građevinske jame“ – (dr.sc. Tanja Roje-Bonacci), 2005. godine, Sveučilište u Splitu Građevinsko-arhitektonski fakultet, sveučilišni udžbenik, Split.
- [6] „Mehanika tla i stijena“ – (Vlasta Szavits-Nossan)
- [7] „Geotehničko inženjerstvo predavanja“ – (prof.dr.sc Predrag Mišćević dipl.ing.građ), 2022. godine, Sveučilište u Splitu Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split.
- [8] [https://download.fine.cz/manuals/geo\\_2022\\_userguide\\_en.pdf](https://download.fine.cz/manuals/geo_2022_userguide_en.pdf) GEO5 USER GUIDE
- [9] „Mehanika tla“ – (dr.sc Tanja Roje-Bonacci), 2017. godine
- [10] <https://www.tectra.hr/laboratorijska>
- [11] <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>
- [12] „An Overview on Methods for Slope Stability Analysis“ - International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)
- [13] „Geotehničko inženjerstvo vježbe“ – (prof.dr.sc Predrag Mišćević dipl.ing.građ), 2022. godine, Sveučilište u Splitu Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split.
- [14] „Zaštita kosine na pristupnom putu ve Mesihovina“ – prof.dr.sc. Maja Prskalo dipl.ing.građ, Niko Tomić, mag.građ.
- [15] [http://www.comiter.hr/DSI\\_DYWIDAG%20geotehnika%20sa%20logom.pdf](http://www.comiter.hr/DSI_DYWIDAG%20geotehnika%20sa%20logom.pdf)
- [16] „Ground Anchors and Anchored Structures“ – John Wiley and Sons, Xanthakos,
- [17] <https://www.grad.unizg.hr/download/repository/NASPOT12-boja.pdf>
- [18] „Uvod u mehaniku tla, Udžbenik Tehničkog veleučilišta u Zagrebu“ – Sonja Zlatović
- [19] „Geotehnika saobraćajnica“ – Lukić, Anagnosti, 2010



ARMIRANO BETONSKI TEMELJI OBLONOG ZIDA, BETON C30/37	103.5	47.5	35	385	385	185	109.7	143.8	209.7	209.8
BETON C25/30, d=20 (cm) ARMIRAN ARMATURNOM MREŽOM Q221	103.5	89.7		542.8	360		193.2	691	727.7	699.7
Habajni sloj SMA 11 45/80-65 (AC1 M1) d=3.5 cm										
Nosivi sloj asfaltnog betona AC 32 base 45/80-65 (AG6 M1), d=9.0 cm										
cementna stabilizacija OS (σ28=3-6 MN/m²), d=20.0 cm										
Nosivi sloj od nevezanog drobljenog kamenog materijala 0/63 (mm) MS-80 (MPa), min 25 (cm)										
Ispuna nearmiranim betonom C25/30										
Sekundarni armirani podnožni svod beton C25/30 d=30 (cm)										
Primarni armirani podnožni svod. Mlazni beton C 24/30, d=30 (cm)										
Podbeton podnožnog svoda. Mlazni beton C 24/30, d=5 (cm)										
1390 <sup>2</sup> PUCANIK 16-32 mm <sup>2</sup>										
ARMATURNI MREŽA Q-196, 1.15 m <sup>2</sup> 40 <sup>2</sup>										
ISPUNA BETONOM C25/30										
ČLJEV UZDUŽNE KANALIZACIJE Ø500 mm										
PODBETON ČLJEVI C25/30										
PODBETON PRIMARNOG PODNOŽNOG SVODA. MLAZNI BETON C25/30, d=5 cm										
PRIMARNI PODNOŽNI SVOD ARMIRANI MLAZNI BETON C24/30, d=30 cm										
SEKUNDARNI PODNOŽNI SVOD ARMIRANI BETON C25/30, d=30 cm										

SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE 21000 Split, Matice hrvatske 15, tel: 021/303-333		
INVESTITOR:	HRVATSKE CESTE, VONČINIČINA 3, 10000 ZAGREB	
GRAĐEVINA:	BRZA CESTA KAŠINA ZLATAR BISTRICA, 1. faza	
DIO GRAĐEVINE:	TUNEL "PODGRADE"	
DATUM: Lipanj 2023.	IZRADIO: Danko Bilinić	
NASLOV PROJEKTA:	GLAVNI GEOTEHNIČKI PROJEKT TUNELA "PODGRADE"	
SADRŽAJ PRILOGA:	MJERILO:	BR. PRILOGA:
NORMALNI POPREČNI PRESJEK TUNELA ULAŽNE PORTALNE GRAĐEVINE TUNELA "PODGRADE"	1:50	1



